

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет»



ISSN 1684-8519

# ИЗВЕСТИЯ

## ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Том 325, № 2, 2014

Математика, физика  
и механика

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ

г. Томск

# ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Сонькин М.А., гл. редактор, д-р техн. наук (Россия)  
Глазырин А.С., выпуск. редактор, канд. техн. наук (Россия)  
Кириянова Л.Г., выпуск. редактор, канд. филос. наук (Россия)

### Ресурсы Планеты

Савичев О.Г., редактор серии, д-р географ. наук (Россия)  
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)  
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)  
Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Шварцев С.Л., д-р геол.-минерал. наук (Россия)

### Математика, физика и механика

Никитенков Н.Н., редактор серии, д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Силкин В.М., канд. физ.-мат. наук (Испания)  
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Уленков О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Рожкова С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)

### Химия и химические технологии

Коршунов А.В., редактор серии, д-р хим. наук (Россия)  
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)  
Тойпель У., Dsc (Германия)  
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)  
Ильин А.П., д-р физ.-мат. наук (Россия)

### Техника и технологии в энергетике

Заворин А.С., редактор серии, д-р техн. наук (Россия)  
Ханьялич К., Dsc. (Нидерланды)  
Кабов О.А., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Маренго М., PhD (Италия)  
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)

### Информационные технологии

Кочегуров А.И., редактор серии, канд. техн. наук (Россия)  
Хамкер Ф.Х., Dsc (Германия)  
Руи Д., PhD (Португалия)  
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)  
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)

### Социально-гуманитарные технологии

Барышева Г.А., редактор серии, д-р экон. наук (Россия)  
Завадскас Э.К., PhD, Dsc (Литва)  
Касати Ф., PhD (Италия)  
Грюнвальд А., PhD (Германия)  
Бутовская М.Л., д-р ист. наук (Россия)  
Головаха Е.И., д-р филос. наук (Украина)

Входит в Перечень ВАК РФ – ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Подписной индекс по каталогу  
агентства «Роспечать» – 18054

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2014

## УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Журнал «Известия Томского политехнического университета» (Известия ТПУ) – рецензируемый мультидисциплинарный журнал, предназначенный для ученых, исследующих специфику развития техники и технологии в различных научных сферах.

Журнал издается с 1903 года. Учредителем является Томский политехнический университет. Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), [scholar.google.com](http://scholar.google.com)

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – Свидетельство ПИ № 77-16615 от 24 октября 2003 г.

ISSN 1684-8519

Импакт-фактор РИНЦ 2012 – 0,174

Особое внимание в журнале уделяется ключевым проблемам развития современной техники и технологии, что выражается в тематических разделах журнала, охватывающих следующие аспекты науки и техники:

- Ресурсы Планеты
- Математика, физика и механика
- Химия и химические технологии
- Техника и технологии в энергетике
- Информационные технологии
- Социально-гуманитарные технологии

К публикации принимаются статьи, ранее нигде не опубликованные и не представленные к печати в других изданиях.

Статьи, отбираемые для публикации в журнале, проходят закрытое (слепое) рецензирование.

Автор статьи имеет право предложить двух рецензентов по научному направлению своего исследования.

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале «Известия ТПУ» на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

В серии «Математика и механика. Физика» публикуются статьи по следующим направлениям:

Математика: алгебра, математическая логика, теория чисел, математический анализ, геометрия, топология, дифференциальные уравнения, вычислительная математика, численные методы математической физики, дискретная математика, теория управляющих систем, теория функциональных систем, стохастические системы, управление в социально-экономических системах, вычислительная техника в управлении.

Физика: результаты экспериментальных и теоретических исследований в области современных вакуумных ионно-плазменных, пучковых и других технологий нанесения покрытий, тонких пленок и поверхностных наноструктур; технологии модификации поверхности; математическое моделирование процессов, связанных с указанными технологиями; разработка методов исследования поверхности.

Механика: теоретическая и прикладная механика; колебания систем (механических, электромагнитных, электро-механических и т. д.); электродинамика, электромагнитный анализ и приложения.

Ministry of Education and Science of the Russian Federation  
National Research Tomsk Polytechnic University



ISSN 1684-8519

# BULLETIN

## OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY

Volume 325, № 2, 2014

Mathematics, Physics  
and Mechanics

TPU  PUBLISHING

Tomsk

# BULLETIN OF TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY

## EDITORIAL BOARD

Sonkin M.A., editor in chief, Dr. Sc. (Russia)  
Glazyrin A.S., managing editor, Cand. Sc. (Russia)  
Kiryanova L.G., managing editor, Cand. Sc. (Russia)

### The Planet Resources

Savichev O.G., *section editor*, Dr. Sc. (Russia)  
Pokrovsky O.S., Cand. Sc. (France)  
Starostenko V.I., Dr. Sc. (Ukraine)  
Kontorovich A.Eh., Dr. Sc. (Russia)  
Shvartsev S.L., Dr. Sc. (Russia)

### Mathematics, Physics and Mechanics

Nikitenkov N.N., *section editor*, Dr. Sc. (Russia)  
Silkin V.M., Cand. Sc. (Spain)  
Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia)  
Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia)  
Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia)  
Rozhkova S.V., Dr. Sc. (Russia)

### Chemistry and Chemical Technology

Korshunov A.V., *section editor*, Cand. Sc. (Russia)  
Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia)  
Teipel U., Dsc (Germany)  
Jin-Chun Kim, Dsc (South Korea)  
Ilyin A.P., Dr. Sc. (Russia)

### Power Engineering

Zavorin A.S., *section editor*, Dr. Sc. (Russia)  
Hanjalic K., Dsc. (Netherlands)  
Kabov O.A., Dr. Sc. (Russia)  
Marengo M., PhD (Italy)  
Aleksenko S.V., Dr. Sc. (Russia)  
Voropai N.I., Dr. Sc. (Russia)

### IT Technologies

Kochegurov A.I., *section editor*, Cand. Sc. (Russia)  
Hamker F.H., Dsc (Germany)  
Rui D., PhD (Portugal)  
Muravyov S.V., Dr. Sc. (Russia)  
Spitsyn V.G., Dr. Sc. (Russia)

### Humanities and Social Sciences Technologies

Barysheva G.A., *section editor*, Dr. Sc. (Russia)  
Zavadskas E.K., PhD, DSc (Lithuania)  
Casati F., PhD (Italy)  
Grunwald A., PhD (Germany)  
Butovskaya M.L., Dr. Sc. (Russia)  
Golovakha E.I., Dr. Sc. (Ukraine)

## AIMS AND SCOPES

Bulletin of Tomsk Polytechnic University (TPU Bulletin) is peer-reviewed multidisciplinary journal owned by Tomsk Polytechnic University. The Journal focuses on the key problems of the development of modern technologies and engineering.

The journal was founded in 1903. The journal is on open access on [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), [scholar.google.com](http://scholar.google.com).

The journal is registered internationally (ISSN 1684-8519) and nationally (Certificate PE № 77-166615, October 24, 2003 from the RF Ministry of Press, Broadcasting and Mass Communications).

Topical sections of the Journal focuses on the following aspect of science and engineering:

- The Planet Resources
- Mathematics, Physics and Mechanics
- Chemistry and Chemical Technology
- Power Engineering
- IT Technologies
- Humanities and Social Sciences Technologies

TPU Bulletin publishes only original research articles. All articles are peer reviewed by international experts. Both general and technical aspects of the submitted paper are reviewed before publication. Authors are advised to suggest 2 potential reviewers who are familiar with the research focus of the article. Final decision on any paper is made by the Editor In Chief.

The Bulletin of Tomsk Polytechnic University is published monthly.

The publication of manuscripts is free of charge.

*The Mathematics, Physics and Mechanics.* The Journal publishes papers in the following areas:

Mathematics: algebra, mathematical logic, number theory, mathematical analysis, geometry, topology, differential equations, computational mathematics, numerical techniques of mathematical physics, discrete mathematics, control system theory, functional system theory, stochastic systems, management in economic and social systems, computer engineering in management.

Physics: results of experimental and theoretical investigations in the field of up-to-date vacuum ion-plasma, beam and other techniques of coating, filming and applying surface nanostructures; surface modification techniques; mathematical simulation of processes associated with the given techniques; development of surface exploration methods.

Mechanics: theoretical and applied mechanics; oscillation of systems (mechanical, electromagnetic, electromechanical etc.); electrodynamics; electromagnetic analysis and applications.



## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

- Анализ концепции построения и исследования фазовых портретов экспериментальных и модельных распределений параметров низкотемпературной плазмы**  
Зимин В.П. **7**
- Анализ концепции построения и исследования фазовых портретов экспериментальных и модельных распределений параметров низкотемпературной плазмы**  
Зимин В.П. **7**
- Модернизация распределений Орда для аппроксимации двухсторонних дискретных распределений экспериментальных данных**  
Карпов И.Г., Грибков А.Н. **15**
- О задаче сопряжения для гиперболического и псевдопараболического уравнений четвертого порядка**  
Саадалов Т.Ы. **22**
- D-аналог метода определения однопараметрической обобщенной обратной матрицы Дразина, основанный на скелетном разложении матрицы**  
Асланян Г.А., Симонян С.А. **29**
- Оценка спектра мощности стационарного случайного процесса сплайном первого порядка**  
Устинова И.Г., Лазарева Е.Г., Подберезина Е.И. **35**
- Уравновешивание автобалансином ротора в упруго-вязко закрепленном корпусе, совершающем пространственное движение**  
Филимонихин Г.Б., Гончаров В.В. **41**
- Направления развития теории безопасности рабочего процесса комплекта грузоподъемных машин трубоукладочной колонны**  
Щербakov В.С., Кoryтов М.С., Шабалин А.Н. **50**
- Метод оценки эффективности пылеуловительных систем**  
Куц В.П., Слободян С.М. **58**
- Влияние нерастворенного газа в рабочей жидкости на динамику гидропривода лесопогрузчика**  
Никитин А.А., Мандраков Е.А. **65**
- Стенд для исследований усталостного разрушения комбинацией методов акустической эмиссии, картирования деформации на поверхности и тензометрии**  
Панин С.В., Бяков А.В., Любутин П.С., Суднер Р., Гренке В.В., Шакиров И.В., Башков О.В. **72**
- Закономерности изнашивания титановых сплавов ПТ-3в и ВТ6 с крупнозернистой и ультрамелкозернистой структурой**  
Круковский К.В., Кашин О.А., Гирсова Н.В. **81**
- Метод управления пространственными характеристиками излучения диодных лазеров**  
Паращук В.В., Гуделев В.Г. **91**
- Особенности эволюции структуры титанового сплава ВТ6 в субмикрорекристаллическом состоянии при сверхпластической деформации**  
Раточка И. В., Лыкова О. Н., Грабовецкая Г.П. **99**
- Антистатические композиционные покрытия для защиты магниевых сплавов на основе порошковых красок, обработанных в планетарной шаровой мельнице**  
Языков С.Ю., Даммер В.Х., Панин С.В., Овечкин Б.Б. **105**
- Фазовый переход металл-полупроводник в технологии наногетероэпитаксиальных структур**  
Марончук И.И., Марончук И.Е., Кулюткина Т.Ф. **114**
- Анализ вариантов осушения влажного воздуха с помощью силикагеля при консервации агрегатов пароводяного тракта тепловой электрической станции**  
Голдаев С.В., Хушвактов А.А. **120**
- Лидарное зондирование малых газовых составляющих атмосферы методом дифференциального поглощения: результаты моделирования и экспериментов**  
Бочковский Д.А., Романовский О.А., Харченко О.В., Яковлев С.В. **127**
- Analysis of the concept of constructing and researching phase portraits of experimental and model parameter distributions of low-temperature plasma**  
Zimin V.P. **7**
- Modernization of Ord distribution for approximation of the bilateral discrete distributions of experimental data**  
Karpov I.G., Gribkov A.N. **15**
- The conjugate problem for hyperbolic and pseudoparabolic fourth-order equations**  
Saadalov T.Y. **22**
- D-analogue of an algorithm for determining single-parametric Drazin generalized inverse matrix based on matrix full rank factorization**  
Aslanyan H.A., Simonyan S.H. **29**
- Evaluation of the power spectrum of a stationary random process as a first-order spline**  
Ustinova I.G., Lazareva E.G., Podberезina E.I. **35**
- Rotor balancing by auto-balancer in visco-elastic fixed bed being in spatial motion**  
Filimonikhin G.B., Goncharov V.V. **41**
- Directions in developing safety theory of working process for a load-lifting cars set of a pipe-laying column**  
Shcherbakov V.S., Korytov M.S., Shabalin A.N. **50**
- Method for estimating dedusting system efficiency**  
Kuts V.P., Slobodyan S.M. **58**
- Influence of undissolved gas in working liquid on dynamics of a logger hydraulic drive**  
Nikitin A.A., Mandrakov E.A. **65**
- Test bench for fatigue failure investigation by combination of acoustic emission, surface strain mapping and tensometry**  
Panin S.V., Byakov A.V., Lyubutin P.S., Sunder R., Grenke V.V., Shakirov I.V., Bashkov O.V. **72**
- The regularities of wear of titanium alloys PT-3V and VT6 with coarse-grained and ultrafine-grained structure**  
Krukovskiy K.V., Kashin O.A., Girsova N.V. **81**
- Method for controlling spatial characteristics of diode lasers radiation**  
Parashchuk V.V., Gudelev V.G. **91**
- Features of evolution of Ti-6Al-4V submicrocrystalline titanium alloy structure under superplastic deformation**  
Ratochka I.V., Lykova O.N., Grabovetskaya G.P. **99**
- Antistatic composite coatings for protecting magnesium alloys based on powder paints processed in a planetary ball mill**  
Yazykov S.Yu., Dammer V.Kh., Panin S.V., Ovechkin B.B. **105**
- Metal-semiconductor phase transition in nanoheteroepitaxial structures technology**  
Maronchuk I.I., Maronchuk I.E., Kulyutkina T.F. **114**
- Analyzing options of moist air dehumidifying with silica gel at conservation of units of steam and water tract at thermal power plant**  
Goladaev S.V., Khushvaktov A.A. **120**
- Lidar sounding of atmosphere trace gases by the differential absorption method: simulation and experiment results**  
Bochkovskii D.A., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V., Yakovlev S.V. **127**

- Интерференционные измерения динамики температуры в твердотельных акустооптических модуляторах** 137  
Белоусов А.П., Белоусов П.Я., Борыняк Л.А.
- Особенности нагрева немагнитных изделий прямоугольного сечения во вращающемся поле постоянных магнитов** 143  
Бикеев Р.А., Промзелев В.А., Бланк А.В., Морев А.Э.
- Влияние продолжительности изотермической выдержки на магнитные и структурные свойства продуктов химической карбонизации поливинилиденфторида** 149  
Живулин В.Е., Песин Л.А., Меженина О.А., Ковалев И.Н., Злобина Н.А., Гаврилов М.А., Морилова В.М., Корякова О.В.
- Плазмохимическое модифицирование полимерных материалов, предназначенных для сердечно-сосудистой хирургии, с целью управления степенью смачиваемости** 158  
Ходыревская Ю.И., Твердохлебов С.И., Кудрявцева Ю.А.
- Математическое моделирование генерации лазерного излучения в He-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> плазме, возбуждаемой осколками деления урана** 166  
Будник А.П., Кузнецова Е.Э.
- Temperature dynamics interference measuring in solid-state acoustooptical modulators**  
Belousov A.P., Belousov P.Ya., Borynyak L.A.
- Features of heating non-magnetic items of rectangular section in rotating field of permanent magnets**  
Bikeev R.A., Promzelev V.A., Blank A.V., Morev A.E.
- Influence of isothermal heat-treatment duration on magnetic and structural properties of chemically carbonized poly(vinylidene fluoride) derivatives**  
Zhivulin V.E., Pesin L.A., Mezhenina O.A., Kovalyov I.N., Zlobina N.A., Gavrilov M.A., Morilova V.M., Koryakova O.V.
- Plasma-chemical modification of polymer materials for cardiovascular surgery in order to change their wettability**  
Khodyrevskaya Yu.I., Tverdokhlebov S.I., Kudryavtseva Yu.A.
- Mathematical modeling of laser radiation generation in He-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> plasma excited by uranium fission fragments**  
Budnik A.P., Kuznetsova E.E.,

УДК 004.415.2:533.9

## АНАЛИЗ КОНЦЕПЦИИ ПОСТРОЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ФАЗОВЫХ ПОРТРЕТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И МОДЕЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

**Зимин Вячеслав Прокопьевич,**

канд. техн. наук, ст. науч. сотр., доцент кафедры прикладной математики  
Института кибернетики ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.

E-mail: zimin@tpu.ru

*Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки новых подходов к анализу и интерпретации модельных и экспериментальных распределений параметров низкотемпературной плазмы термоэмиссионного диода и создания критериев (функционалов), которые позволяют получать количественные оценки при проведении вычислительного эксперимента верификации модели.*

**Цель работы:** описание и обоснование концепции (алгоритма) обработки экспериментальных и вычисление неизмеряемых распределений параметров низкотемпературной плазмы и конструирование функционалов, позволяющих получать количественные оценки верификации модели.

**Методы исследования:** аппроксимация экспериментальных данных и их экстраполяция в приэлектродных областях межэлектродного зазора, где невозможно проводить измерения. Построение фазовых портретов модельных и экспериментальных распределений параметров плазмы.

**Результаты:** Сформулирована и проанализирована концепция построения и исследования фазовых портретов экспериментальных и модельных параметров низкотемпературной цезиевой плазмы в термоэмиссионном диоде на плоскостях плотность плазмы – плотность ионного тока, температура электронов – плотность энергии электронов и др. На основе анализа фазовых портретов параметров плазмы предложены функционалы, позволяющие оценить отклонение состояния токнесущей плазмы от состояния термодинамического равновесия. Для модельных распределений параметров плазмы проанализировано поведение этого функционала для плотности плазмы и температуры электронов. Показана возможность формулировать и проверять гипотезы о механизмах физических процессов в плазме на основе анализа фазовых портретов параметров плазмы.

### **Ключевые слова:**

Концепция, фазовый портрет, экспериментальные данные, аппроксимация функциями, функционал, низкотемпературная плазма, термоэмиссионный диод.

### **Введение**

Верификация модели на основе сравнения распределения экспериментальных и модельных временных является одним из важных этапов вычислительного эксперимента. Результатом этого этапа является проверка модели на адекватность, формулировка и проверка гипотез о механизмах физических процессов в плазме. Возможны два способа сравнения модельных и экспериментальных результатов: качественный и количественный. Первый способ основан на сравнении в основном формы и особенностей экспериментальных и модельных конфигураций параметров плазмы, а второй способ требует конструирования и использования некоторого функционала. Для сравнения параметров низкотемпературной цезиевой плазмы в термоэмиссионном диоде преимущественно использовался первый способ [1, 2].

Кратко перечислим подходы, применяемые для сравнения экспериментальных и модельных распределений параметров низкотемпературной плазмы термоэмиссионного диода. В работе [3] сравнивались экспериментальные распределения параметров дуговой плазмы (концентрация и температура электронов), полученные зондовым и спектроскопическим методами. Для спектроскопического метода распределение потенциала пространства, занятого плазмой, вычислялось по известной формуле. Если нормированные на макси-

мальные значения распределения плотности плазмы были довольно близки, то максимальные значения плотности плазмы для разных методов измерения отличались в полтора-два раза. В [4] получено удовлетворительное согласие между суммарным значением расчетных составляющих электронного тока в различных сечениях межэлектродного промежутка с экспериментально измеренными величинами тока через термоэмиссионный диод и другими параметрами плазмы. В работах [5, 6] проводилось в основном качественное сравнение экспериментальных и теоретических пространственных распределений параметров плазмы. На основе экспериментальных параметров плазмы в приэмиттерной области вычислялось время ионизации в цезиевой плазме. В [7] на основе аппроксимации функцией, являющейся решением модели с постоянной температурой электронов по зазору, экспериментальных распределений плотности плазмы в районе максимума определялась температура электронов. В работе [8] качественно сравнивались экспериментальные и модельные параметры плазмы: концентрация и потенциал пространства, занятого плазмой, и отмечалось качественное согласие.

Имеется несколько причин, требующих разработки новых методов исследования как экспериментальных параметров цезиевой плазмы, так и моделей процессов в такой плазме:

1. Трудности интерпретации особенностей экспериментальных распределений параметров цезиевой плазмы в межэлектродном зазоре термоэмиссионного диода, особенно температуры электронов в дуговом режиме [2].
2. Необходимость исследования поведения параметров плазмы в приэлектродных областях, где экспериментальные измерения параметров крайне затруднительны, а в большинстве случаев невозможны [1, 2].
3. Трудности сравнения большого количества моделей, описывающих процессы в объеме цезиевой плазмы и в приэлектродных областях, которые формулируются в виде нелинейных краевых задач.
4. Трудности сравнения модельных и экспериментальных распределений параметров низкотемпературной плазмы при недостаточном знании работ выхода электродов в рабочих режимах диода.
5. Необходимость исследования моделей нестационарных процессов в низкотемпературной плазме и динамических вольтамперных характеристик (ВАХ) диода [9], трудоемкость анализа которых существенно возрастает по сравнению со стационарными моделями.
6. Необходимость создания эффективных алгоритмов поиска решений стационарных и нестационарных нелинейных краевых задач.

В данной работе формулируется концепция построения и исследования фазовых портретов как экспериментальных, так и модельных параметров плазмы на основе ранее полученных результатов исследования краевых задач [10–14] на фазовых плоскостях плотность плазмы – ионный ток, плотность плазмы – плотность энергии электронного газа, температура электронов – плотность энергии электронного газа и др.

#### Концепция исследования фазовых портретов параметров плазмы и её анализ

Концепция (концептуальная модель) исследования экспериментальных и модельных распределений параметров цезиевой плазмы термоэмиссионного диода включает следующие этапы.

1. Аппроксимация экспериментальных распределений параметров плазмы и построение их фазовых портретов. Качественная и количественная оценка близости таблично заданных функций и аппроксимирующих функций. Построение функционала на основе фазовых портретов параметров плазмы для получения количественных оценок верификации модели.
2. Построение на основе функций аппроксимации экспериментальных данных фазовых портретов неизмеряемых переменных: вычисление плотности ионного тока  $J_i = J_i(x)$  и плотности энергии электронного газа  $q_e = q_e(x)$ .
3. Вычисление интегральных и распределенных оценок характерных длин и характерных времен процессов в плазме на основе аппроксима-

ции экспериментальных распределений её параметров с целью выделения и анализа тех областей, где возможны исследования по разнообразным алгоритмам.

4. Диагностика параметров моделей и проверка гипотез о механизмах физических процессов в низкотемпературной цезиевой плазме термоэмиссионного диода на основе обработки выделенных участков фазовых портретов экспериментальных и неизмеряемых распределений параметров плазмы.
5. Сравнение фазовых портретов экспериментальных и неизмеряемых распределений параметров плазмы с фазовыми портретами модельных параметров и соответствующего им функционала, описывающего отклонение токонесущей от термодинамической равновесной (ТДР) плазмы.

В зависимости от полноты экспериментальных распределений параметров плазмы и модельных приближений реализуются все или только некоторые этапы указанной концепции. Проанализируем подробно постановки задач, решаемых в рамках приведенной выше концепции.

1. Аппроксимация экспериментальных распределений параметров плазмы и построение их фазовых портретов.

В зависимости от режима работы термоэмиссионного диода и методики экспериментальных измерений параметров плазмы могут быть сформированы несколько наборов таблично заданных функций.

В диффузионном режиме работы термоэмиссионного диода с малым межэлектродным расстоянием (порядка миллиметра) применима только зондовая диагностика параметров плазмы [2]. При этом могут быть получены экспериментальные распределения (в виде таблично заданных функций) плотности плазмы  $n_e = n_e(x)$ ; температуры электронов  $T_{e3} = T_{e3}(x)$ ; потенциала пространства, занятого плазмой,  $V_3 = V_3(x)$ ; значения приэлектродных скачков потенциала  $V_{E3}$  и  $V_{C3}$ ,  $0 < x_{E3} < x < x_{C3} < d$ ,  $x_{E3}$ ,  $x_{C3}$  – границы интервала, в котором снимаются экспериментальные параметры плазмы,  $d$  – межэлектродное расстояние. Отметим, что определение температуры электронов во многих экспериментах было затруднено из-за большой эмиссии электронов с зонда, по сравнению с током ионов на зонд [2]. В распоряжении автора имеется один источник [4], в котором представлены измеренные распределения температуры электронов и других параметров плазмы. В большинстве случаев [2] в рабочей точке ВАХ диффузионного режима измерялись распределения концентрации плазмы и потенциала пространства, занятого плазмой.

В дуговом режиме для изучения параметров плотной плазмы использовалась как зондовая, так и спектроскопическая методики [1–6]. С помощью зондовых характеристик, как и в диффузионном режиме, можно определить экспериментальные

распределения плотности плазмы  $n_0 = n_0(x)$ , потенциала пространства, занятого плазмой,  $V_0 = V_0(x)$ , значения приэлектродных скачков потенциала  $V_{E_0}$  и  $V_{C_0}$ . При некоторых параметрах диода определялись два распределения температуры электронов  $T_{et0} = T_{et0}(x)$  и  $T_{eg0} = T_{eg0}(x)$  [2, 4, 5]. С помощью спектроскопической методики [3–5] измерялись распределения плотности плазмы  $n_0 = n_0(x)$  и температура электронов  $T_{eca} = T_{eca}(x)$ . Причем из сравнения результатов обработки спектроскопических и зондовых данных [3] был сделан вывод, что получаемые распределения температуры электронов с помощью спектров близки к распределениям  $T_{eg0} = T_{eg0}(x)$ , получаемых с помощью зондов.

Для построения фазовых портретов параметров плазмы требуется знание пространственных производных этих параметров. Численное дифференцирование данных является некорректной задачей, т. к. из-за возможности потери значащих цифр отсутствует устойчивость её решения. Поэтому в предлагаемой концепции анализа данных требуется решать задачу аппроксимации функциями экспериментальных данных.

В общем случае постановка задачи аппроксимации функциями распределений параметров плазмы формулируется как задача нелинейной оптимизации функционала, зависящего от параметров этих функций. Если аппроксимирующая функция зависит линейным образом от искомым параметров, то в конечном итоге для их определения требуется решать систему линейных алгебраических уравнений. Для составления последней обычно применяется метод наименьших квадратов. Рассмотрим алгоритм построения фазовых портретов для плотности плазмы  $n = n(x)$ .

- 1) В точках  $x_i, i=1, 2, \dots, N$ , принадлежащих интервалу  $[x_{E_0}; x_{C_0}]$ ,  $0 < x_{E_0}, x_{C_0} < d$  заданна функция  $n_i = n(x_i)$ .
- 2) Используя характерные особенности экспериментальных значений в виде таблично заданной функции, формируется набор  $n_{ap,j} = n_{ap,j}(x, p_{1j}, p_{2j}, \dots, p_{L_{nj}})$ ,  $j=1, 2, \dots, M_n, L_n$  – количество параметров для  $j$ -й функции аппроксимации,  $M_n$  – количество аппроксимирующих функций.
- 3) Для каждого из  $M_n$  типов функций решается задача аппроксимации и вычисляются параметры  $p_{1j}, p_{2j}, \dots, p_{L_{nj}}$  ( $j=1, 2, \dots, M_n$ ) этой функции.
- 4) Используя визуальное представление функций и количественные критерии близости функций, исследуется качество аппроксимации таблично заданной функции.

Качественная и количественная оценка близости таблично заданных функций и аппроксимирующих функций оценивается по нескольким критериям, в основу которых положена оценка невязки между этими функциями. Например, для плотности плазмы невязка записывается в виде

$$\delta = \sum_{k=1}^K w_k (n_0(x_k) - n_{ap,j}(x_k))^2,$$

где  $w_k$  – заданные веса в точках  $x_k$ . Веса связаны с точностью измерения параметров плазмы: чем ни-

же точность, тем больше отклонение (увеличение) весов от единицы.

- 1) Используя экстраполяцию аппроксимирующих функций на интервалах  $[0; x_{E_0}]$  и  $[x_{C_0}; d]$ , определяется набор  $n_{ap,j} = n_{ap,j}(x, p_{1j}, p_{2j}, \dots, p_{L_{nj}})$ ,  $j=1, 2, \dots, M_n$  на интервале  $[0; d]$ .
- 2) Вычисляются пространственные производные от аппроксимирующих функций на интервале  $[0; d]$  и строятся фазовые портреты для всех  $M_n$  функций аппроксимации.
- 3) На основании анализа физических ограничений, накладываемых на параметры плазмы, характерного поведения переменной плазмы и её производной в межэлектродном зазоре из  $M_n$ -набора аппроксимирующих функций и фазовых портретов отбираются те из них, которые пригодны для исследования на последующих этапах концепции.

Таким образом, на первом этапе будут построены в общем случае наборы фазовых портретов экспериментальных параметров плазмы  $(n_{ap,j}, dn_{ap,j}/dx)$ ,  $j=1, 2, \dots, M_n$ ,  $(T_{et,j}, dT_{et,j}/dx)$ ,  $j=1, 2, \dots, M_{T_{et}}$ ,  $(T_{eg,j}, dT_{eg,j}/dx)$ ,  $j=1, 2, \dots, M_{T_{eg}}$ ,  $(V, dV/dx)$ ,  $j=1, 2, \dots, M_V$ .

Вычисления и анализ на всех шагах первого этапа обработки экспериментальных данных должны сопровождаться визуализацией в виде соответствующих графиков функций и фазовых портретов распределений параметров плазмы. Решение задачи аппроксимации, интерполяции и экстраполяции функций, вычисление их производных реализовано во многих программах. Рекомендуется использовать, например, программу cftool математического пакета Matlab.

Распределение параметра плазмы можно рассматривать как некоторую структуру [12]. Поэтому нужно конструировать функционал, основанный не на сравнении фазовых портретов распределений параметров плазмы в одной или в нескольких точках, например в точке, где имеется максимум по одной из координат фазовой плоскости, а на структуре, как едином целом.

Один из простых функционалов для таких структур – это вычисление отклонения состояния токопроводящей плазмы от состояния плазмы изотермического диода, находящейся в ТДР. Этот функционал кроме количественных оценок отличия фазовых портретов параметров плазмы имеет физический смысл. В изотермическом диоде температуры и работы выхода эмиттера и коллектора равны между собой:  $T_E = T_C, F_E = F_C$ . ТДР-плазма такого диода для нулевого проходящего тока  $J=0$  характеризуется однородным распределением плотности плазмы в зазоре диода, равным плотности Саха, и однородными распределениями температур частиц, равных температуре эмиттера. Распределения плотностей токов заряженных частиц и потоков энергии равны нулю. Так как производные от распределений параметров ТДР-плазмы равны нулю, то проекции объемного фазового портрета такой плазмы на фазовые плоскости представляют собой точки. Площадь фазового портрета



ТДР-плазмы как на отдельных плоскостях, так и в сумме на всех плоскостях равна нулю. Объем, занимаемый фазовым портретом этой плазмы в фазовом пространстве, также равен нулю.

Функционал для нормированных распределений токнесущей плазмы определяется как площадь, заключенная между кривой фазового портрета на фазовой плоскости и двумя отрезками прямых, соединяющими фазовый портрет ТДР-плазмы и точки фазового портрета изучаемого состояния плазмы, которые соответствуют значениям переменных при  $x=0$  и  $x=d$ . Для нормирования фазовых переменных параметров плазмы и расстояния в межэлектродном зазоре используются параметры ТДР-плазмы изотермического диода.

Указанный выше функционал вводится для сравнения фазовых портретов параметров плазмы, полученных для одинаковых параметров диода. При сравнении фазовых портретов параметров плазмы, полученных для диодов с различными параметрами, используются характеристики ТДР-плазмы изотермического диода, параметры которого равны параметрам одного из диодов, либо берутся параметры базового изотермического диода, которые отличаются от параметров двух сравниваемых диодов. При этом можно использовать то обстоятельство, что характеристики ТДР-плазмы изотермического диода не зависят от межэлектродного расстояния.

Отметим, что прямые, ограничивающие площадь фазового портрета параметров плазмы, для случая параметров ТДР-плазмы, тождественно равных нулю, проходят через начало координат фазовых плоскостей, т. е. в этом случае вычисление функционала фактически основано на использовании эффективных граничных условий III рода [11]. Использование таких условий позволяет построить второй функционал для ненулевых параметров ТДР-плазмы.

2. Построение на основе функций аппроксимации экспериментальных данных фазовых портретов неизмеряемых переменных: вычисление плотности ионного тока  $J_i=J_i(x)$  и плотности энергии электронного газа  $q_e=q_e(x)$ .

На основании полученных результатов на первом этапе вычисляются наборы модельных переменных  $J_{ap,i}=J_{ap,i}(x)$ ,  $q_{ap,e}=q_{ap,e}(x)$  в межэлектродном зазоре,  $x \in [0;d]$ , и строятся наборы фазовых портретов  $(n_{ap,j}, J_{ap,i,j})$ ,  $j=1,2,\dots,M_n$ ,  $(T_{ap,ei}, q_{ap,e,i})$ ,  $i=1,2,\dots,M_{Tei}$ ,  $(T_{ap,eg,j}, q_{ap,e,j})$ ,  $j=1,2,\dots,M_{Teg}$ . При необходимости строятся фазовые портреты для других переменных, например  $(n_{ap,j}, q_{ap,e,j})$ ,  $j=1,2,\dots,\min\{M_n, M_{Tei}, M_{Teg}\}$ . При построении фазовых портретов неизмеряемых параметров плазмы требуется знание коэффициентов переноса: подвижности, диффузии, теплопроводности и др.

3. Вычисление интегральных и распределенных оценок характерных длин и характерных времен процессов в плазме на основе аппроксимации экспериментальных распределений её параметров с целью выделения и анализа тех областей, где воз-

можны исследования по разнообразным алгоритмам.

На третьем этапе вычисляются следующие характерные величины плазмы:

- 1) Длина (радиус) Дебая  $r_D$  у электродов и в межэлектродном зазоре для оценки расстояния, на котором в основном изменяется потенциал, и для оценки применимости плазменного приближения  $n_e \approx n_i \approx n$ .
  - 2) Ширина приэлектродного слоя  $\sim (eV_E/kT_e)^{1/2} r_D$ ,  $V_E$  – величина приэлектродного скачка потенциала, где нарушается плазменное приближение  $n_e \neq n_i \neq n$ .
  - 3) Параметры равновесной плазмы изотермического диода: плотность плазмы Саха  $n_{shT}=n_{sh}(T_e, n_{aE})$ ,  $T_e=T_E$ , где  $n_{aE}=n_a(T_E)$  – плотность атомов цезия в зазоре; скачок потенциала у электродов для равновесной плазмы  $V_{ET}=\mu(T_E, p_{Cs})-F_E$  для оценки отклонения параметров токнесущей плазмы от параметров плазмы, находящейся в ТДР.
  - 4) Длины свободного пробега при рассеянии электронов на атомах  $l_{ea}$ , электронов на ионах  $l_{ei}$  и при смешанном механизме рассеяния  $l_e=(l_{ea}^{-1}+l_{ei}^{-1})^{-1}$  для оценки: применимости приближения диффузионной плазмы  $l \ll d$ , влияния столкновений на транспортные процессы в плазме, длины хаотизации направленной скорости пучка электронов с эмиттера.
  - 5) Длины свободного пробега ионов на атомах  $l_{ia}$ , ионов на электронах  $l_{ei}$  и при смешанном механизме рассеяния  $l_i=(l_{ia}^{-1}+l_{ei}^{-1})^{-1}$  для оценки: применимости приближения диффузионной плазмы  $l \ll d$ , влияния на транспортные процессы в плазме столкновений, длины хаотизации направленной скорости пучка ионов и максвеллизации ионов.
  - 6) Длина релаксации возмущения функции распределения электронов по энергии, длина максвеллизации  $L_M$ , вызванной ускорением эмиттерных электронов эмиссии на приэмиттерном скачке потенциала [2].
  - 7) Длина релаксации приэлектродного возмущения  $L_{ME}$  функции распределения электронов [1], для оценки области неравновесной ионизации в межэлектродном зазоре.
  - 8) Плотность плазмы Саха  $n_{sh}=n_{sh}(T_{eg}, n_a)$ ,  $T_{eg}=T_{eg}(x)$ ,  $n_a=n_a(x)$  и уравнение состояния (парциальные давления) для оценки влияния рекомбинации в межэлектродном зазоре (малое влияние рекомбинации при  $n \ll n_{sh}$ ).
  - 9) Вычисление градиента температуры электронов  $dT_{ei}/dx$  в межэлектродном зазоре для оценки влияния термодиффузионного члена на транспортные процессы в межэлектродном зазоре.
4. Диагностика параметров моделей и проверка гипотез о механизмах физических процессов в низкотемпературной цезиевой плазме термоэмиссионного диода на основе обработки выделенных участков фазовых портретов экспериментальных и неизмеряемых распределений параметров плазмы.

На данном этапе формулируются и решаются разнообразные задачи, устанавливающие связи между экспериментальными и модельными данными.

Например, отдельно выделяется рассмотрение поведения параметров плазмы в приэлектродных областях термоэмиссионного диода. При этом проверяется как обоснованность экстраполяции, так и описание параметров плазмы в приэлектродных областях [13, 14].

Для исследования и решения проблемы двух температур электронов в дуговом режиме работы диода [2, 4, 5, 10–12] необходимо выделять в межэлектродном зазоре слой плазмы с малым влиянием на процессы переноса кулоновских столкновений и малым влиянием рекомбинации на процессы ионообразования.

5. Сравнение фазовых портретов экспериментальных и неизмеряемых распределений параметров плазмы с фазовыми портретами модельных параметров и соответствующих им функционалов, описывающих различие между токонесущей и ТДР-плазмой.

На основании численного решения моделей (краевых задач) низкотемпературной плазмы [1, 2, 5, 6, 8, 10] строятся фазовые портреты на плоскостях  $(n, J)$ ,  $(T_{e1}, q_e)$ ,  $(T_{e2}, q_e)$ ,  $(V, E)$  и др. Проводится сравнение с фазовыми портретами экспериментальных распределений параметров плазмы, и при необходимости корректируются модели процессов в плазме.

Проиллюстрируем выше приведенные рассуждения о построении фазовых портретов и функционалов на примере модельных параметров плазмы и ВАХ термоэмиссионного диода. Расчеты были выполнены в помощь, по-видимому, наиболее полной на настоящее время модели процессов в плазме диода [8]. При расчетах использованы следующие значения параметров:  $T_E=1800$  К,  $T_C=1000$  К, давление насыщенных паров Cs  $p_{Cs}=1$  мм рт. ст.,  $d=0,04$  см, плотность тока с эмиттера  $J_{Ee}^{(0)}=25$  А/см<sup>2</sup>, плотность ТДР-плазмы  $n_T=3,57 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>, температура электронов ТДР-плазмы  $T_{eT}=T_E$ . На нелинейной ВАХ термоэмиссионного диода (рис. 1) в области  $1,3 \leq J \leq 2,8$  А/см<sup>2</sup> имеется участок с отрицательным сопротивлением. Для трех точек ВАХ, указанных маркерами, рассчитаны распределения параметров плазмы на конфигурационных (рис. 2, а, рис. 3, а) и фазовых (рис. 2, б, рис. 3, б) плоскостях.

Приняты следующие обозначения: квадрату ( $J_1=0$  А/см<sup>2</sup>) на рис. 1 соответствуют сплошные кривые на рис. 2, 3; пятиугольнику ( $J_2=0,79$  А/см<sup>2</sup>) – пунктирные кривые, и шестиугольнику ( $J_3=1,69$  А/см<sup>2</sup>) – штрихпунктирные. Штриховые кривые рис. 2, а и рис. 3, а соответствуют распределениям ТДР-плазмы. Центры кружков на рис. 2, б и рис. 3, б изображают нормированные фазовые портреты распределений ТДР-плазмы.

Опишем область на ВАХ, характерную для диффузионного режима и перехода из диффузион-

ного режима работы в дуговой ( $J < 3$  А/см<sup>2</sup>). На конфигурационных плоскостях распределения параметров плазмы  $n=n(x)$  и  $T_e=T_e(x)$  представляют собой монотонно изменяющиеся зависимости (рис. 2, а, рис. 3, а). Нормированные фазовые портреты параметров плазмы также являются монотонными зависимостями (рис. 2, б, рис. 3, б), за исключением портрета для плотности плазмы при  $J_3=1,69$  А/см<sup>2</sup> (рис. 2, б, штрихпунктир), относящегося к области отрицательного сопротивления на ВАХ (рис. 1). Немонотонное поведение данного фазового портрета обусловлено небольшими изменениями производной  $dn'/d\xi$  у эмиттера.

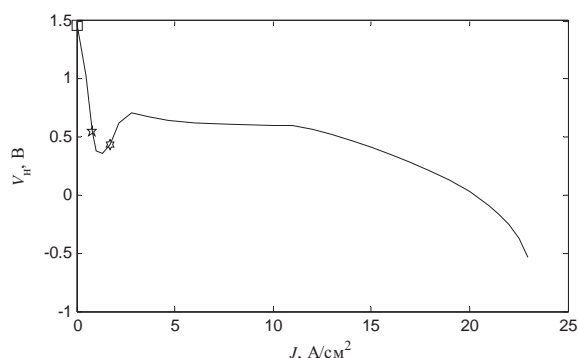
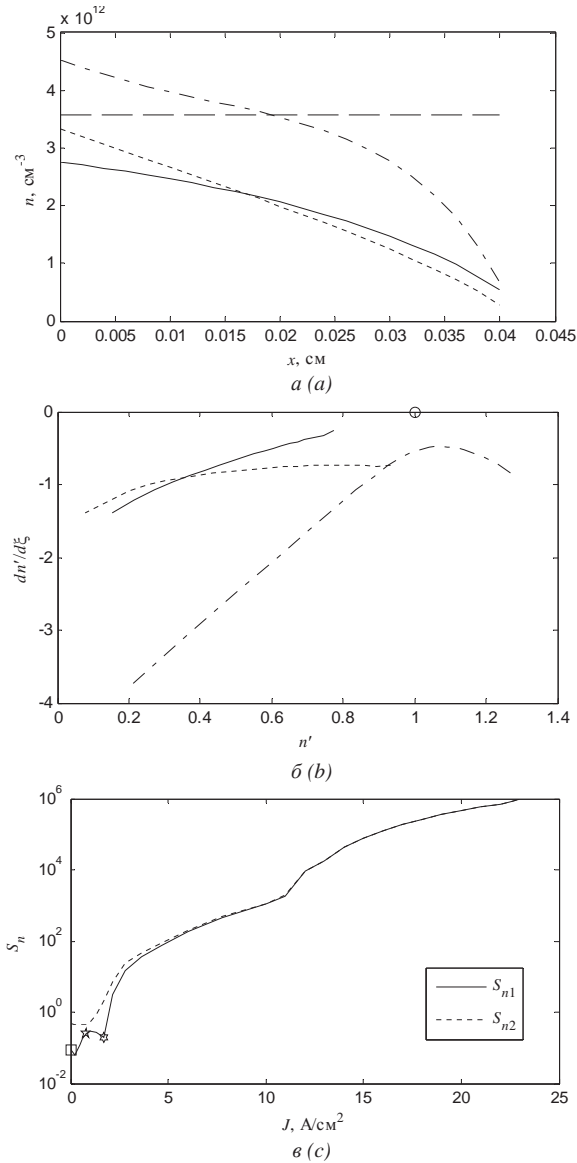


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика термоэмиссионного диода

Fig. 1. Current-voltage characteristic of a thermionic diode

В общем случае зависимости функционалов параметров плазмы от плотности тока диода имеют многоэкстремальный характер. Если значения разных типов функционалов  $S_{n1}$ ,  $S_{n2}$  значительно отличаются только в области диффузионного режима и слаборазвитой дуги  $J \leq 7$  А/см<sup>2</sup>, то значения функционалов  $S_{Te1}$ ,  $S_{Te2}$  отличаются во всем расчетном диапазоне по  $J$ . В области дугового разряда  $J \geq 3$  А/см<sup>2</sup> зависимость функционалов  $S_{n1}$ ,  $S_{n2}$  имеет монотонный характер, в то время как для функционалов  $S_{Te1}$ ,  $S_{Te2}$  зависимость немонотонная, с несколькими экстремумами. Функционалы для температуры электронов имеют глобальный максимум в области поджига разряда. При малых отклонениях от режима холостого хода  $J \leq 0,2$  А/см<sup>2</sup> значения  $S_{n1}$  и  $S_{Te1}$  уменьшаются, а при приближении  $J$  к плотности тока квазинасыщения значения этих функционалов начинают увеличиваться. Кроме этого, на зависимости  $S_{n1}$  при  $J_3=1,69$  А/см<sup>2</sup> имеется еще один локальный минимум, который объясняется наличием на нормированном фазовом портрете распределения плотности плазмы значительного участка (рис. 2, б, штрихпунктир).

На примере анализа фазовых портретов плотности плазмы покажем возможность получения дополнительной информации и формулирования некоторых заключений о физических механизмах в плазме термоэмиссионного диода.



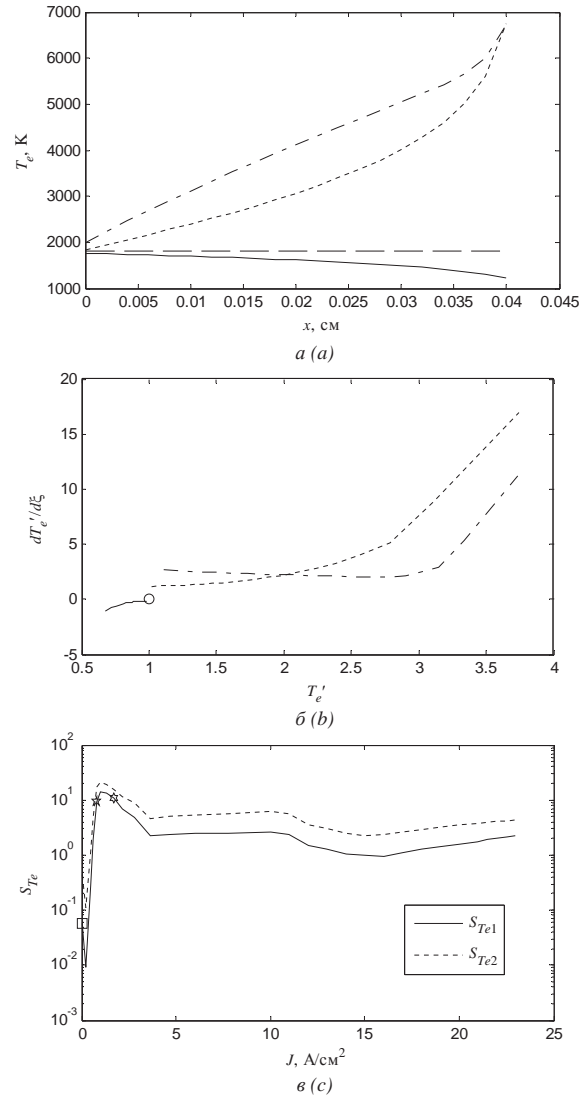
**Рис. 2.** Распределения плотности плазмы на плоскостях: конфигурационной (а) и фазовой (б); зависимости функционалов от плотности тока (в)  
**Fig. 2.** Plasma density distribution on planes: a) configuration, b) phase; c) functional dependence on current density

Если распределение плотности плазмы или заметная его часть на фазовой плоскости представляет собой отрезок прямой линии, то последняя может быть представлена в виде дифференциального уравнения первого порядка

$$a \frac{dn'}{d\xi} + bn' + c = 0,$$

где  $a, b, c$  – параметры отрезка прямой нормированного фазового портрета на плоскости  $(n', dn'/d\xi)$ . Решение этого дифференциального уравнения записывается в виде

$$n' = -\frac{c}{b} + C_1 e^{-b\xi/a},$$



**Рис. 3.** Распределения температуры электронов на плоскостях: конфигурационной (а) и фазовой (б); зависимости функционалов от плотности тока (в)  
**Fig. 3.** Electron temperature distribution on planes: a) configuration, b) phase; c) functional dependence on current density

где  $C_1$  – произвольная постоянная. В зависимости от знака отношения  $b/a$  будут реализовываться на конфигурационной плоскости для  $n'=n'(\xi)$  либо монотонно растущие, либо монотонно убывающие решения. Тогда решения для зависимости  $S_{n1}=S_{n1}(J)$ , когда отклонение от состояния ТДР-плазмы вычисляется от точки фазовой плоскости с координатами  $(1, 0)$  и  $b=1, c=-1$ , имеют вид

$$n' = 1 + C_1 e^{-\xi/a},$$

а решения для  $S_{n2}=S_{n2}(J)$  (от точки с координатами  $(0, 0)$  и  $b=1, c=0$ )

$$n' = C_1 e^{-\xi/a}$$



будут приводить к локальным минимумам на данных функционалах (рис. 2, в).

Отметим особый случай  $b=0$ , когда фазовый портрет плотности плазмы расположен параллельно оси  $on'$  и решение записывается в виде

$$n' = -\frac{c}{a}\xi + C_1.$$

Это означает, что ионизационные процессы в объеме плазмы пренебрежительно малы.

Если нормированный фазовый портрет (или значительную его часть) плотности плазмы нельзя аппроксимировать отрезком прямой линии, то для описания её поведения необходимо повышать порядок дифференциального уравнения. При больших значениях плотности тока в дуговом режиме в межэлектродном зазоре возникает состояние локального термодинамического равновесия плазмы [1, 2]. Фазовый портрет плотности плазмы такого состояния стремится к точке [12], поэтому на зависимости  $S_n = S_n(J)$  в режиме развитой дуги (сильноионизированная плазма) должен наблюдаться максимум.

Приведенный выше анализ на конфигурационных и фазовых плоскостях, а также анализ особенностей изменения функционалов  $S_{n1}$  и  $S_{n2}$  можно распространить и на другие плазменные перемен-

ные. Это позволяет формировать и проверять гипотезы о механизмах физических процессов в межэлектродном зазоре плазменного термоэмиссионного диода.

### Выводы

Предложена концепция построения фазовых портретов экспериментальных и модельных распределений параметров низкотемпературной плазмы термоэмиссионного диода, включающая конструирование функционалов для фазовых портретов, которые позволяют оценить отклонение параметров токнесущей плазмы от равновесной. В качестве примера построены и проанализированы модельные зависимости функционалов от плотности тока диода для плотности плазмы и температуры электронов. Все это вместе взятое позволяет:

1. Единообразно анализировать и обобщать экспериментальные и модельные распределения параметров плазмы термоэмиссионного диода, использовать для их сравнения адекватные качественные и количественные критерии.
2. Формировать и проверять гипотезы о механизмах физических процессов в низкотемпературной плазме термоэмиссионного диода, как показано на примере анализа распределений плотности плазмы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физические основы термоэмиссионного преобразования энергии / И.П. Стаханов, В.П. Пащенко, А.С. Степанов и др. / под ред. И.П. Стаханова. – М.: Атомиздат, 1973. – 374 с.
2. Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма / Ф.Г. Бакшт, Г.А. Дюжев, А.М. Марциновский и др. / под ред. Б.Я. Мойжеса, Г.Е. Пикуса. – М.: Наука, 1973. – 480 с.
3. Сравнение зондового и оптического методов измерения параметров низкотемпературной цезиевой плазмы / Г.А. Дюжев, В.Б. Каплан, Б.Я. Мойжес и др. // Журнал технической физики. – 1968. – Т. 38. – Вып. 6. – С. 963–967.
4. Зондовые и спектральные исследования плотной плазмы ТЭП / Г.А. Дюжев, А.М. Марциновский, Б.Я. Мойжес и др. // Термоэмиссионное преобразование энергии: сборник докладов советских ученых на II Международной конференции по термоэмиссионному преобразованию энергии. – Стреза, Италия, 27–31 мая 1968. – М.: ВНИИТ, 1969. – С. 111–122.
5. Низковольтная дуга в термоэмиссионных преобразователях. Сравнение теории с экспериментом / Ф.Г. Бакшт, Г.А. Дюжев, И.Л. Коробова и др. // Журнал технической физики. – 1968. – Т. 38. – Вып. 7. – С. 1075–1094.
6. Белоконь А.А., Сонин Э.Б. К теории низковольтной дуги в термоэмиссионном преобразователе // Журнал технической физики. – 1969. – Т. 39. – Вып. 11. – С. 2105–2118.
7. Кармазин В.П., Пащенко В.П., Стаханов И.П. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований параметров дугового термоэмиссионного преобразователя // Журнал технической физики. – 1972. – Т. 42. – Вып. 4. – С. 800–808.
8. Гуськов Ю.К., Ружников В.А., Сидельников В.Н. Расчетные вольт-амперные характеристики ТЭП. Ч. 1. Влияние величины межэлектродного зазора на ВАХ ТЭП. – Обнинск: Изд-во, 1984. – 18 с.
9. Дейнеженко А.Л., Зимин В.П. Численное моделирование нестационарных вольтамперных характеристик плазменного диода в дуговом режиме // Известия СО АН СССР. Сер. Технические наук. – 1987. – Вып. 6. – С. 84–87.
10. Зимин В.П. Алгоритм расчета вольтамперных характеристик термоэмиссионного преобразователя с постоянной температурой электронов // Известия вузов. Физика. – 1984. – № 7. – 36 с. – Деп. в ВИНТИ 21.03.1984, № 1571–84.
11. Зимин В.П. Изображение и анализ граничных условий для уравнения теплопроводности на фазовых плоскостях // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 4. – С. 29–33.
12. Зимин В.П. Развитие метода фазовой плоскости для анализа решений краевых задач // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 2. – С. 17–21.
13. Зимин В.П. Исследование особенностей плазменных граничных уравнений у эмиттера термоэмиссионного диода // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 2. – С. 11–15.
14. Зимин В.П. Исследование особенностей плазменных граничных уравнений у коллектора термоэмиссионного диода // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 2. – С. 158–163.

Поступила 03.09.2013 г.

UDC 004.415.2:533.9

## ANALYSIS OF THE CONCEPT OF CONSTRUCTING AND RESEARCHING PHASE PORTRAITS OF EXPERIMENTAL AND MODEL PARAMETER DISTRIBUTIONS OF LOW-TEMPERATURE PLASMA

Vyacheslav P. Zimin,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue,  
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: zimin@tpu.ru

Relevance of the work is caused by the need to develop new approaches to analysis and interpretation of model and experimental parameter distributions of low-temperature plasma of thermionic diode and to establish criteria (functionals) which allow obtaining quantitative estimates at model verification computer simulation.

**The main aim of the study:** description and justification of the concept (algorithm) for processing experimental and calculation non-measurable parameter distributions of low-temperature plasma and design of functionals, which allow obtaining quantitative estimates of model verification.

**The methods used in the study:** experimental data approximation and extrapolation in electrode sheath of a interelectrode gap, where it is impossible to carry out measurements; construction of phase portraits for model and experimental distributions of plasma parameters.

**The results:** The author has stated and analyzed the concept of constructing and studying phase portraits of experimental and model parameters of low-temperature cesium plasma in thermionic diode on the planes plasma density – ion current density, electron temperature – electron energy density etc. Based on the analysis of the phase portraits of the plasma parameters the functionals were proposed. They allow estimating deviation in current-carry plasma state from thermodynamic equilibrium state. The behavior of this functional for plasma density and electron temperature was analyzed for model distributions of plasma parameters. The paper demonstrates the possibility to state and to test hypotheses on mechanisms of physical processes in plasma based on the analysis of plasma parameter phase portraits.

### Key words:

Concept, phase portrait, experimental data, function approximation, functional, low-temperature plasma, thermionic diode.

### REFERENCES

1. Stakhanov I.P., Pashchenko V.P., Stepanov A.S. *Fizicheskoe osnovy termoemissionnogo preobrazovaniya energii* [Physical basis of thermionic energy conversion]. Ed. by I.P. Stakhanov. Moscow, Atomizdat Publ., 1973. 374 p.
2. Baksht F.G., Dyuzhev G.A., Martsinkovsky A.M. *Termoemissionnye preobrazovateli i nizkotemperaturnaya plazma* [Thermionic converters and low-temperature plasma]. Eds. B.Ya. Moyzhes, G.E. Pikus. Moscow, Nauka Publ., 1973. 480 p.
3. Dyuzhev G.A., Kaplan V.B., Moyzhes B.Ya. *Sravnienie zondovogo i opticheskogo metodov izmereniya parametrov nizkotemperaturnoy tsezievoy plazmy* [Comparison of probe and optical measurement methods of low-temperature cesium plasma]. *Zhurnal Tekhnicheskoy fiziki – Journal of Technical Physics*, 1968, vol. 38, no. 6, pp. 963–967.
4. Dyuzhev G.A., Martsinkovsky A.M., Moyzhes B.Ya. *Zondovye i spektralnye issledovaniya plotnoy plazmy TEP* [Probe and spectral studies of thick plasma TEC]. *Termoemissionnoe preobrazovanie energii: sbornik dokladov sovetskikh uchennykh na II Mezhdunarodnoy konferentsii po termoemissionnomu preobrazovaniyu energii* [Thermionic energy conversion. Collected papers of Soviet scientists at the II International conference in thermionic energy conversion]. Italy, Stresa, 27–31 May 1968. Moscow, VNIIT, 1969, pp. 111–122.
5. Baksht F.G., Dyuzhev G.A., Korobova I.L. *Nizkovoltnaya duga v termoemissionnykh preobrazovatelyakh. Sravnienie teorii s eksperimentom.* [Low-voltage arc in thermionic converters. Comparison of theory and experiment]. *Zhurnal Tekhnicheskoy fiziki – Journal of Technical Physics*, 1968, vol. 38, no. 7, pp. 1075–1094.
6. Belokon A.A., Sonin E.B. *K teorii nizkovoltnoy dugi v termoemissionnom preobrazovatele* [On the theory of low-voltage arc in thermionic converter]. *Zhurnal Tekhnicheskoy fiziki – Journal of Technical Physics*, 1969, vol. 39, no. 11, pp. 2105–2118.
7. Karmazin V.P., Pashchenko V.P., Stakhanov I.P. *Sravnienie rezultatov teoreticheskikh i eksperimentalnykh issledovaniy parametrov dugovogo termoemissionnogo preobrazovatelya* [Comparison of the results of theoretical and experimental studies of arc thermionic converter parameters]. *Zhurnal Tekhnicheskoy fiziki – Journal of Technical Physics*, 1972, vol. 42, no. 4, pp. 800–808.
8. Guskov Yu.K., Ruzhnikov V.A., Sidelnikov V.N. *Rashchetnye volt-ampernye kharakteristiki TEP. Chast 1. Vliyaniye velichiny mezhelektrodnogo zazora na VAH TEP* [Calculated current-voltage characteristics of the TEC. P. 1. The effect of the interelectrode gap in the VAC TEC]. Obninsk, Изд-во, 1984. 18 p.
9. Deynezhenko A.L., Zimin V.P. *Chislennoe modelirovaniye nestatsionarnykh voltampernykh kharakteristik plazmennogo dioda v dugovom rezhime* [Numerical simulation of unsteady plasma diode current-voltage characteristics in the arc mode]. *Izvestiya SO AN SSSR. Seriya Tekhnicheskikh nauk – Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Ser. technical Sciences*, 1987, no. 6, pp. 84–87.
10. Zimin V.P. *Algoritm rascheta voltampernykh kharakteristik termoemissionnogo preobrazovatelya s postoyannoy temperaturoy elektronov* [Algorithm for calculating the current-voltage characteristics of the thermionic converter with constant temperature of electrons]. *Bulletin of Higher Education. Physics*, 1984, no. 7, 36 p. Dep. v VINITI 21.03.1984, no. 1571–84.
11. Zimin V.P. *Izobrazheniye i analiz granichnykh usloviy dlya uravneniya teploprovodnosti na fazovykh ploskostyakh* [Image analysis and boundary conditions for the heat equation on the phase planes]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, № 4, pp. 29–33.
12. Zimin V.P. *Razvitiye metoda fazovoy ploskosti dlya analiza resheniy kraevykh zadach* [Development of phase plane method for analyzing solutions of boundary value problems]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, № 2, pp. 17–21.
13. Zimin V.P. *Issledovaniye osobennostey plazmennykh granichnykh uravneniy u emittera termoemissionnogo dioda* [Studying the features of plasma boundary equations for thermionic emitter diode]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, № 2, pp. 11–15.
14. Zimin V.P. *Issledovaniye osobennostey plazmennykh granichnykh uravneniy u kollektora termoemissionnogo dioda* [Studying the features of plasma boundary equations for thermionic diode collector]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, № 2, pp. 158–163.

Received: 03 September 2013.

УДК 519.224

## МОДЕРНИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОРДА ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ ДВУХСТОРОННИХ ДИСКРЕТНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

**Карпов Иван Георгиевич,**

д-р техн. наук, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации» Тамбовского государственного технического университета, Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106. E-mail: zeratul68@mail.ru

**Грибков Алексей Николаевич,**

канд. техн. наук, доцент кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» Тамбовского государственного технического университета, Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106. E-mail: GribkovAlexey@yandex.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения точности и упрощения процедуры аппроксимации двухсторонних дискретных законов распределения экспериментальных данных. Дискретные законы распределения находят широкое практическое применение в качестве вероятностных моделей флуктуаций сигналов при решении задач синтеза оптимальных методов приема и обработки информации в оптической локации и связи. При этом зачастую возникает необходимость применения обобщенного дискретного закона распределения, поскольку каждый из известных законов распределения в отдельности может не позволить добиться необходимой степени обобщения данных по флуктуациям оптических сигналов.

**Цель работы:** модернизация разностного уравнения Орда и получение на основе его решения обобщенного закона распределения двухсторонней дискретной случайной величины, а также разработка метода идентификации основных видов дискретных законов распределения, применяемых на практике.

**Методы исследования:** расчеты с использованием методов теории вероятностей и математической статистики, а также программного продукта MathCAD; методы интегрального и дифференциального исчисления.

**Результаты:** Произведена модернизация разностного уравнения Орда, и получено его решение в виде обобщенного распределения вероятностей. Показано, что частными случаями полученного распределения являются известные дискретные законы распределения, такие как равномерный, биномиальный, Пуассона, отрицательный биномиальный, гипергеометрический, отрицательный гипергеометрический. Приведена диаграмма двухсторонних законов распределения дискретной случайной величины, где показаны области существования указанных выше дискретных законов распределения. Рассмотрены числовые характеристики полученного обобщенного распределения, а также на его основе разработан метод идентификации основных видов дискретных законов распределения, применяемых на практике.

### Ключевые слова:

Распределения Орда, дискретный закон распределения, аппроксимация законов распределения, плотность распределения вероятностей, дискретная случайная величина.

### Постановка задачи

Для решения задач синтеза оптимальных методов приема и обработки информации в оптической локации и связи очень часто используют в качестве вероятностных моделей флуктуаций сигналов дискретные законы распределения. Наиболее широко применяются законы распределения Пуассона, Лагерра, биномиальный, отрицательный биномиальный [1–7]. Однако каждый из этих законов распределения в отдельности зачастую не дает необходимой степени обобщения данных по флуктуациям оптических сигналов, а некоторые из них дублируют друг друга.

В работах [8, 9] было получено выражение для обобщенного дискретного закона распределения односторонней случайной величины, когда она может принимать только положительные значения. Существенным недостатком полученного распределения является то, что оно не позволяет описывать распределения с ненулевым параметром сдвига. Могут также возникать ситуации, когда дискретная случайная величина (СВ) принимает как положительные, так и отрицательные значения, то есть является двухсторонней.

Дж. К. Орд в своих работах [10, 11] в качестве источника дискретных распределений рассматривал разностное уравнение первого порядка с переменными коэффициентами

$$\frac{\Delta p(x-1)}{p(x-1)} = \frac{p(x) - p(x-1)}{p(x-1)} = \frac{x-a}{b_2 x(x-1) + b_1 x + b_0}, \quad (1)$$

где  $a$ ,  $b_2$ ,  $b_1$  и  $b_0$  – параметры дискретных законов распределения;  $x$  – целочисленная дискретная переменная, принимающая значения на интервале  $(-\infty, \infty)$  либо  $[0, \infty)$ , либо на конечном интервале  $[l_1, l_2]$ .

В результате решения разностного уравнения (1), при различных корнях квадратного трехчлена знаменателя, Орд получил семейство дискретных распределений. В частности такие распределения, как: биномиальное, гипергеометрическое, Пуассона, отрицательное биномиальное, отрицательное гипергеометрическое и еще несколько других распределений. Однако, из-за сложности идентификации распределений этого семейства по сравнению с непрерывными распределениями Пирсона, распределения Орда используются на практике редко [12, 13].

Основная цель работы – произвести модернизацию разностного уравнения Орда (1) и в результате его решения получить обобщенный закон распределения двухсторонней дискретной случайной величины, а на его основе разработать метод идентификации дискретных законов распределения.

### Основные результаты

По аналогии с разностным уравнением Орда (1) весьма разнообразный характер дискретных законов распределения можно задать с помощью разностного уравнения

$$\frac{\Delta p(x)}{p(x)} = \frac{a_1(x - m_1) - a_0}{b_2(x + 1 - m_1)^2 + b_1(x + 1 - m_1) + b_0}, \quad (2)$$

где  $\Delta p(x) = p(x+1) - p(x)$ ;  $a_1, a_0, b_2, b_1$  и  $b_0$  – параметры дискретных законов распределения,  $m_1$  – начальный момент 1-го порядка. Необходимо отметить, что уравнение (2) аналогично модернизированному дифференциальному уравнению Пирсона для плотностей вероятностей [14].

Используя общие свойства вероятностей возможных значений  $p(x)$ , установим правила определения параметров  $a_1, a_0, b_2, b_1$  и  $b_0$ , входящих в уравнение (2). Для этого запишем уравнение (2) в следующем виде

$$(x - m_\xi)^n \left[ \begin{array}{l} b_0 + b_1(x + 1 - m_1) + \\ + b_2(x + 1 - m_1)^2 \end{array} \right] \Delta p(x) = \\ = (x - m_1)^n [a_1(x - m_1) - a_0] p(x)$$

либо

$$y^n [b_0 + b_1(y + 1) + b_2(y + 1)^2] \Delta p(y) = \\ = y^n [a_1 y - a_0] p(y), \quad (3)$$

где  $y = x - m_1$ .

Пусть допустимые значения центрированной дискретной СВ  $\xi_0$  заключены в интервале  $[l_1, l_2]$ . Просуммируем левую часть равенства (3) по частям, используя формулу суммирования по частям [15, 16]

$$\sum_{x=l_1}^{l_2} u(x) \Delta f(x) = [u(x) f(x)]_{l_1}^{l_2+1} - \sum_{x=l_1}^{l_2} f(x+1) \Delta u(x).$$

В результате получим

$$\{(y - 1)^n [b_0 + b_1 y + b_2 y^2] p(y)\}_{l_1}^{l_2+1} - \\ - \sum_{x=l_1}^{l_2} \left[ y^n (b_0 + b_1(y + 1) + b_2(y + 1)^2) - \right. \\ \left. - (y - 1)^n (b_0 + b_1 y + b_2 y^2) \right] p(y) = \\ = \sum_{x=l_1}^{l_2} y^n (a_1 y - a_0) p(y).$$

Выражение в фигурных скобках обращается в нуль на верхней границе интервала суммирования, так как  $p(l_2 + 1) = 0$ , а на нижней границе интервала суммирования в общем случае равно

$$(l_1 - 1)^n (b_0 + b_1 l_1 + b_2 l_1^2) p(l_1).$$

Рассмотрим, при каких условиях оно равно нулю. Если допустимые значения СВ  $\xi_0$  имеют конеч-

ное множество значений в интервале  $[0, N]$  либо счетное множество значений на неограниченном интервале  $[0, \infty)$ , то  $l_1 = -m_1$ . При этом можно положить, что

$$b_2 m_1^2 - b_1 m_1 + b_0 = 0. \quad (4)$$

При всех других интервалах допустимых значений дискретной СВ будем полагать, что

$$p(l_1) = 0. \quad (5)$$

Используя определение центральных моментов для дискретной СВ [17] и полагая, что выполняется условие (4) либо (5), имеем

$$a_0 \mu_n - b_0 \mathcal{G}_{n0} - b_1 \mathcal{G}_{n1} - b_2 \mathcal{G}_{n2} = a_1 \mu_{n+1}, \quad (6)$$

где  $\mu_n = \langle y^n \rangle$  – центральный момент  $n$ -го порядка;

$$\mathcal{G}_{n0} = \langle y^n - (y - 1)^n \rangle; \quad \mathcal{G}_{n1} = \langle y^n (y + 1) - y(y - 1)^n \rangle;$$

$$\mathcal{G}_{n2} = \langle y^n (y + 1)^2 - y^2 (y - 1)^n \rangle.$$

Уравнение (6) позволяет получить рекуррентные соотношения для определения моментов более высокого порядка по моментам более низкого порядка. Последовательно полагая в (6)  $n = 0, 1, 2, 3$  и учитывая, что  $\mu_0 = 1, \mu_1 = 0, \mathcal{G}_{00} = 0, \mathcal{G}_{01} = 1, \mathcal{G}_{02} = 1, \mathcal{G}_{10} = 1, \mathcal{G}_{11} = 0, \mathcal{G}_{12} = 3\mu_2, \mathcal{G}_{20} = 4\mu_3, \mathcal{G}_{21} = 4\mu_3 - 3\mu_2, \mathcal{G}_{22} = 5\mu_4 - 2\mu_3 + \mu_2$ , получим:

$$a_0 - b_1 - b_2 = 0; \\ -b_0 - 3b_2 \mu_2 = a_1 \mu_2; \\ a_0 \mu_2 + b_0 - 3b_1 \mu_2 - 4b_2 \mu_3 = a_1 \mu_3; \\ (a_0 - 4b_1 + 2b_2) \mu_3 - b_0 - (3b_0 - 3b_1 + b_2) \mu_2 = \\ = (a_1 + 5b_2) \mu_4. \quad (7)$$

Выразим параметры  $a_1, a_0, b_2, b_1$  и  $b_0$  через центральные моменты  $\mu_2, \mu_3, \mu_4$ . Из второго уравнения системы (7) следует, что  $b_0 \neq 0$ . Поэтому систему уравнений (7) можно решить относительно параметров  $a_1, a_0, b_2$  и  $b_1$ . В результате решения системы уравнений (7) и некоторых преобразований получим:

$$b_2 = \frac{b_0(1 - K_2)}{(2 - K_2)\mu_2}; \quad b_1 = \frac{[0,5(K_1 + 1) + 1 - K_2]b_0}{(2 - K_2)\mu_2}; \\ a_0 = \frac{0,5b_0(K_1 - 4K_2 + 5)}{(2 - K_2)\mu_2}; \quad a_1 = \frac{b_0(4K_2 - 5)}{(2 - K_2)\mu_2}, \quad (8)$$

где коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$  определяются соотношениями

$$K_1 = \mu_3 / \mu_2, \quad K_2 = \frac{1,5\mu_3^2 + 6\mu_2^3 - 1,5\mu_2^2}{\mu_2(\mu_4 + 3\mu_2^2 - \mu_2)}. \quad (9)$$

С целью упрощения выражений для параметров  $a_1, a_0, b_2$  и  $b_1$  положим, что  $b_0 = (2 - K_2)\mu_2$ . Тогда из (8) следует

$$b_2 = 1 - K_2; \quad a_1 = 4K_2 - 5; \quad b_1 = 0,5K_1 + 1,5 - K_2; \\ b_0 = (2 - K_2)\mu_2; \quad a_0 = 0,5(K_1 - 4K_2 + 5). \quad (10)$$

Следовательно, параметры  $a_1, a_0, b_2, b_0$  и  $b_1$  определяются коэффициентами  $K_1$  и  $K_2$ , вычисляемым по формулам (9), а также центральным моментом  $\mu_2$ .



Решение разностного уравнения (2) в рекуррентной форме с учетом (10) имеет следующий вид

$$p(x) = \begin{cases} C, & x = \mu, \\ \left(1 + \frac{a_1(x - m_1) - 0,5(a_1 + K_1)}{(x - m_1)(b_2(x - m_1) + b_1) + b_0}\right) p(x-1), & x > \mu, \\ \left(1 + \frac{a_1(m_1 - x) - 0,5(a_1 - K_1)}{(m_1 - x)(b_2(m_1 - x) + b_1 - K_1) + b_0}\right) \times \\ \times p(x+1), & x < \mu \end{cases} \quad (11)$$

либо в обычной форме

$$p(x) = \begin{cases} C, & x = \mu \\ C \prod_{k=1+\mu}^x \left(1 + \frac{a_1(k - m_1) - 0,5(a_1 + K_1)}{(k - m_1)(b_2(k - m_1) + b_1) + b_0}\right), & x > \mu, \\ C \prod_{k=x}^{\mu-1} \left(1 + \frac{a_1(m_1 - k) - 0,5(a_1 - K_1)}{(m_1 - k)(b_2(m_1 - k) + b_1 - K_1) + b_0}\right), & x < \mu, \end{cases} \quad (12)$$

где  $C$  – коэффициент нормировки;  $\mu$  – параметр сдвига.

Рассмотрим основные частные случаи распределения (12), чтобы выяснить, каким образом оно связано с известными уже дискретными законами распределения. Оценку потенциальных возможностей распределения (12) будем производить с помощью коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$ .

**Распределение I.** Пусть для коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  выполняются неравенства  $-\infty < K_1 < \infty, 1 < K_2 < 1,5$ . Положим, что

$$m_1 = \mu + \frac{bN}{b+c}, \quad \mu_2 = \frac{bcN(b+c+N)}{(b+c)^2(b+c+1)},$$

$$K_1 = \frac{(c-b)(2N+b+c)}{(b+c)(b+c+2)}, \quad K_2 = \frac{b+c+3}{b+c+2}.$$

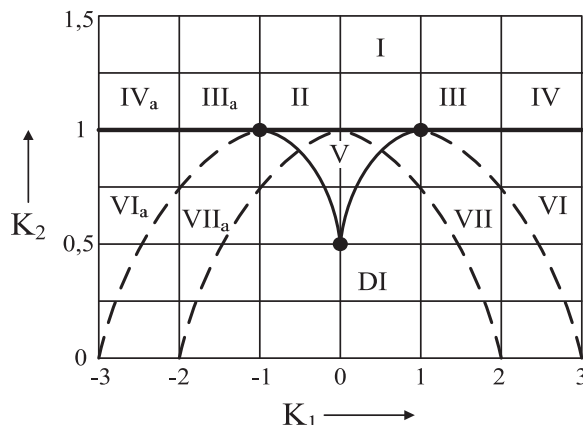
При этом (12) преобразуется к виду

$$p(x) = \frac{(c)_N (N+1-x+\mu)_{x-\mu} (b)_{x-\mu}}{(b+c)_N (N+c-x+\mu)_{x-\mu} (x-\mu)!},$$

$$x = \mu, \mu+1, \dots, \mu+N, \quad (13)$$

где  $(a)_k = a(a+1)\dots(a+k-1)$  – символ Похгаммера;  $c > 0, b > 0, N \geq 2, -\infty < \mu < \infty$  – параметры распределения [18].

Частными случаями распределения (13) являются бета-биномиальное распределение при  $\mu=0$ , дискретный равномерный закон при  $b=1, c=1$  и отрицательное гипергеометрическое распределение при  $b=m, c=M-m+1, \mu=0$  и  $N=S-M$  [13, 19]. На рисунке представлена область существования распределения (13) в координатах  $K_1$  и  $K_2$ . Для него справедливо неравенство  $1 < K_2 < 1,5$ .



**Рисунок.** Диаграмма двухсторонних законов распределения дискретной СВ

**Figure.** Diagram of bilateral laws of random variable distribution

**Распределение II.** Пусть для коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  выполняются соотношения  $-1 < K_1 < 1; K_2 = 1$ . Положим  $m_1 = \mu + pN, \mu_2 = pN(1-p)$  и  $K_1 = 1 - 2p$ . Тогда (12) преобразуется к виду

$$p(x) = \frac{(N+1-x+\mu)_{x-\mu} p^{x-\mu}}{(x-\mu)!(1-p)^{x-\mu-N}},$$

$$x = \mu, \mu+1, \dots, \mu+N, \quad (14)$$

где  $0 < p < 1, N \geq 1$  – параметры распределения. Частным случаем (14) при  $\mu=0$  является биномиальное распределение [6, 13].

На рисунке представлена область существования распределения (14). Ей соответствует отрезок прямой II.

**Распределение III.** Пусть для коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  выполняются соотношения  $K_1 = 1; K_2 = 1$  а  $m_1 = \mu + \lambda$  и  $m_2 = \lambda$ . При этом (12) преобразуется к виду

$$p(x) = \frac{\lambda^{x-\mu}}{(x-\mu)!} \exp(-\lambda), \quad x = \mu, \mu+1, \dots, \infty, \quad (15)$$

где  $\lambda > 0$  – параметр распределения.

Частным случаем распределения (15) при  $\mu=0$  является распределение Пуассона. На рисунке области существования распределения (15) соответствует точка с координатами  $K_1 = 1; K_2 = 1$ .

**Распределение IIIa.** Пусть для коэффициентов  $K_1, K_2$  выполняются соответственно неравенства  $K_1 = -1; K_2 = 1$ , а  $m_1 = \mu - \lambda$  и  $m_2 = \lambda$ . При этом (12) преобразуется к виду

$$p(x) = \frac{\lambda^{\mu-x}}{(\mu-x)!} \exp(-\lambda), \quad -\infty < x \leq \mu. \quad (16)$$

На рисунке области существования распределения (16) соответствует точка с координатами  $K_1 = -1; K_2 = 1$ .

**Распределение IV.** Пусть для коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  выполняются соотношения  $K_1 > 1, K_2 = 1$ . Положим

$$m_1 = \mu + \frac{\alpha q}{1-q}, \quad \mu_2 = \frac{\alpha q}{(1-q)^2}, \quad K_1 = \frac{1+q}{1-q}.$$

При этом (12) преобразуется к виду

$$p(x) = \frac{(\alpha)_{x-\mu}}{(x-\mu)!} q^{x-\mu} (1-q)^\alpha, \quad x = \mu, \mu+1, \dots, \infty, \quad (17)$$

где  $0 < q < 1$ ,  $\alpha > 0$  – параметры распределения.

Частными случаями распределения (17) являются: отрицательное биномиальное распределение при  $\mu=0$ , распределение Паскаля при  $\alpha=m$ , геометрическое распределение при  $\alpha=1$  и  $\mu=0$ ; распределение Фарри при  $\alpha=1$  и  $\mu=1$  [6, 13, 19]. На рисунке представлена область существования распределения (17). Ей соответствует отрезок прямой IV.

**Распределение IVa.** Пусть для коэффициентов  $K_1, K_2$  выполняются соответственно неравенства  $K_1 < -1, K_2 = 1$ . Положим

$$m_1 = \mu - \frac{\alpha q}{1-q}, \quad \mu_2 = \frac{\alpha q}{(1-q)^2} \quad \text{и} \quad K_1 = -\frac{1+q}{1-q}.$$

При этом (12) преобразуется к виду

$$p(x) = \frac{(\alpha)_{\mu-x}}{(\mu-x)!} q^{\mu-x} (1-q)^\alpha, \quad -\infty < x \leq \mu, \quad (18)$$

где  $0 < q < 1$ ,  $\alpha > 0$  – параметры распределения.

На рисунке представлена область существования распределения (18). Ей соответствует отрезок прямой IVa.

**Распределение V.** Пусть для коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  выполняются неравенства  $-1 \leq K_1 \leq 0, K_2 < 1$ . Введем вспомогательные коэффициенты  $K_3$  и  $K_4$ , определяемые соотношениями

$$K_3 = \frac{K_1 + 3 - 2K_2}{4\sqrt{(1-K_2)(2-K_2)\mu_2}}; \\ K_4 = \frac{K_1 - 3 + 2K_2}{4\sqrt{(1-K_2)(2-K_2)\mu_2}}. \quad (19)$$

Если  $K_3 \geq 1, K_4 \leq -1$ , то можно положить, что

$$m_1 = \mu + \frac{Nb}{b+c}, \quad \mu_2 = \frac{Nbc(b+c-N)}{(b+c)^2(b+c-1)}, \\ K_1 = \frac{(c-b)(b+c-2N)}{(b+c)(b+c-2)}, \quad K_2 = \frac{b+c-3}{b+c-2}.$$

Тогда распределение (12) преобразуется к виду

$$p(x) = \frac{(1+c-N)_N (N+1-x+\mu)_{x-\mu} (b+1-x+\mu)_{x-\mu}}{(1+b+c-N)_N (1+c-N)_{x-\mu} (x-\mu)!}, \\ \mu \leq x \leq \mu+N, \quad (20)$$

где  $c \geq N, b \geq N, N \geq 2$  – параметры распределения.

Частными случаями (20) являются гипергеометрическое распределение при  $\mu=0$  либо при  $\mu=M, c=N+M$  [6, 13, 19]. На рисунке представлена область существования распределения (20). Для нее справедливы неравенства  $-1 \leq K_1 \leq 0, K_2 < 1, K_3 \geq 1, K_4 \leq -1$ .

**Распределение VI.** Пусть для коэффициентов  $K_1, K_2, K_3$  и  $K_4$  выполняются неравенства  $K_1 > 0, K_2 < 1, K_3 > 1, K_4 \geq 1$ . Положим, что

$$m_1 = \mu + \frac{ab}{c}, \quad \mu_2 = \frac{ab(a+c)(b+c)}{c^2(c-1)}, \\ K_1 = \frac{(2a+c)(2b+c)}{c(c-2)}, \quad K_2 = \frac{c-3}{c-2}.$$

Тогда распределение (12) преобразуется к виду

$$p(x) = \frac{B(a+c+1, b+c+1)(a)_{x-\mu} (b)_{x-\mu}}{B(c+1, a+b+c+1)(a+b+c+1)_{x-\mu} (x-\mu)!}, \\ x = \mu, \mu+1, \dots, \infty, \quad (21)$$

где  $a > 0, b \geq a, c > 0$  – параметры распределения;  $B(\alpha, \nu)$  – бета-функция [20].

Частными случаями распределения (21) являются отрицательное бета-биномиальное распределение при  $\mu=0$  и бета-распределение Паскаля при  $\mu=M, c=a+b-M$  [6, 13]. На рисунке представлена область существования распределения (21). Для нее справедливы неравенства  $K_1 > 0, K_2 < 1, K_3 > 1, K_4 \geq 1$ .

**Распределение VIa.** Пусть для коэффициентов  $K_1, K_2, K_3$  и  $K_4$  выполняются неравенства  $K_1 < -0, K_2 < 1, K_3 \leq -1, K_4 < -1$ . Положим

$$m_1 = \mu - \frac{ab}{c}, \quad \mu_2 = \frac{ab(a+c)(b+c)}{c^2(c-1)}, \\ K_1 = -\frac{(2a+c)(2b+c)}{c(c-2)}, \quad K_2 = \frac{c-3}{c-2}.$$

Тогда распределение (12) преобразуется к виду

$$p(x) = \frac{B(a+c+1, b+c+1)(a)_{\mu-x} (b)_{\mu-x}}{B(c+1, a+b+c+1)(a+b+c+1)_{\mu-x} (\mu-x)!}, \\ -\infty < x \leq \mu, \quad (22)$$

где  $a > 0, b \geq a, c > 0$  – параметры распределения.

На рисунке представлена область существования распределения (22). Для нее справедливы неравенства  $K_1 < -0, K_2 < 1, K_3 \geq -1, K_4 < -1$ .

**Распределение VII.** Пусть для коэффициентов  $K_1, K_2, K_3$  и  $K_4$  выполняются неравенства  $K_1 > 0, K_2 < 1, -K_3 \leq 1, -1 < K_4 < 1$ . Положим

$$m_1 = \mu + \frac{a+b^2}{c}, \quad \mu_2 = \frac{(a+b^2)[(b+c)^2+a]}{c^2(c-1)}, \\ K_1 = \frac{4a+(2b+c)^2}{c(c-2)}, \quad K_2 = \frac{c-3}{c-2}.$$

Тогда распределение (12) преобразуется к виду

$$p(x) = \frac{|\Gamma(c+b+1+i\sqrt{a})|^2}{\Gamma(c+1)\Gamma(c+2b+1+x-\mu)} \times \\ \times \frac{|\Gamma(x-\mu+b+i\sqrt{a})|^2}{(x-\mu)! |\Gamma(b+i\sqrt{a})|^2}, \quad x = \mu, \mu+1, \dots, \infty, \quad (23)$$

где  $c > 0, b \geq -0,5c, a > 0$  – параметры распределения.

На рисунке представлена область существования распределения (23). Для нее справедливы неравенства  $K_1 > 0, K_2 < 1, -K_3 \geq 1, -1 < K_4 < 1$ .

**Распределение VIIa.** Пусть для коэффициентов  $K_1, K_2, K_3$  и  $K_4$  выполняются неравенства  $K_1 < 0, K_2 < 1, -1 < K_3 < 1, K_4 \leq -1$ . Положим

$$m_1 = \mu - \frac{a + b^2}{c}, \quad \mu_2 = \frac{(a + b^2)[(b + c)^2 + a]}{c^2(c - 1)},$$

$$K_1 = -\frac{4a + (2b + c)^2}{c(c - 2)}, \quad K_2 = \frac{c - 3}{c - 2}.$$

Тогда распределение (12) преобразуется к виду

$$p(x) = \frac{|\Gamma(c + b + 1 + i\sqrt{a})|^2}{\Gamma(c + 1)\Gamma(c + 2b + 1 + \mu - x)} \times$$

$$\times \frac{|\Gamma(\mu - x + b + i\sqrt{a})|^2}{(\mu - x)!|\Gamma(b + i\sqrt{a})|^2}, \quad -\infty < x \leq \mu, \quad (24)$$

где  $c > 0, b \geq -0,5c, a > 0$  – параметры распределения.

На рисунке представлена область существования распределения (24). Для нее справедливы неравенства  $K_1 < 0, K_2 < 1, -1 < K_3 < 1, K_4 \leq -1$ .

**Распределение DI.** Пусть для коэффициентов  $K_1, K_2, K_3$  и  $K_4$  выполняются неравенства  $-\infty < K_1 < \infty, K_2 < 1, -1 < K_3 < 1, -1 < K_4 < 1$ . Положим

$$m_1 = \mu + \frac{\lambda_2^2 - \lambda_1^2}{c}, \quad \mu_2 = \frac{\lambda_1^2 c^2 + (0,25c^2 + \lambda_2^2 - \lambda_1^2)^2}{c^2(c - 1)},$$

$$K_1 = \frac{4(\lambda_2^2 - \lambda_1^2)}{c(c - 2)}, \quad K_2 = \frac{c - 3}{c - 2}.$$

Тогда распределение (11) преобразуется к виду

$$p(x) = \begin{cases} C, & x = \mu, \\ \frac{(x - \mu - 0,25(c + 4))^2 + \lambda_2^2}{(x - \mu + 0,25c)^2 + \lambda_1^2} p(x - 1), & x > \mu, \\ \frac{(\mu - x - 0,25(c + 4))^2 + \lambda_1^2}{(\mu - x + 0,25c)^2 + \lambda_2^2} p(x + 1), & x < \mu \end{cases}$$

либо в обычной форме

$$p(x) = \begin{cases} C \frac{\left[ \frac{|\Gamma(x - \mu - 0,25c + j\lambda_2)|^2 \times}{|\Gamma(0,25(c + 4) + j\lambda_1)|^2} \right]}{\left[ \frac{|\Gamma(-0,25c + j\lambda_2)|^2 \times}{|\Gamma(0,25(c + 4) + x - \mu + j\lambda_1)|^2} \right]}, & x \geq \mu, \\ C \frac{\left[ \frac{|\Gamma(\mu - x - 0,25c + j\lambda_1)|^2 \times}{|\Gamma(0,25(c + 4) + j\lambda_2)|^2} \right]}{\left[ \frac{|\Gamma(-0,25c + j\lambda_1)|^2 \times}{|\Gamma(0,25(c + 4) + \mu - x + j\lambda_2)|^2} \right]}, & x < \mu, \end{cases} \quad (25)$$

где

$$C = (C_1 + C_2 - 1)^{-1}, \quad \lambda_1 > 0, \quad \lambda_2 > 0, \quad c > 0$$

– параметры распределения;

$$C_1 = {}_3F_2 \left( \begin{matrix} 1, -0,25c + j\lambda_2, -0,25c - j\lambda_2; \\ 0,25(c + 4) + j\lambda_1, 0,25(c + 4) - j\lambda_1; 1 \end{matrix} \right);$$

$$C_2 = {}_3F_2 \left( \begin{matrix} 1, -0,25c + j\lambda_1, -0,25c - j\lambda_1; \\ 0,25(c + 4) + j\lambda_2, 0,25(c + 4) - j\lambda_2; 1 \end{matrix} \right);$$

$${}_pF_q(a_1, \dots, a_p; b_1, \dots, b_q; z)$$

– обобщенная гипергеометрическая функция [21].

Если  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ , то  $K_1 = 0$ . При этом (25) преобразуется к виду

$$p(x) = \frac{C \left[ \frac{|\Gamma(|x - \mu| - 0,25c + j\lambda)|^2 \times}{|\Gamma(0,25(c + 4) + j\lambda)|^2} \right]}{\left[ \frac{|\Gamma(-0,25c + j\lambda)|^2 \times}{|\Gamma(0,25(c + 4) + |x - \mu| + j\lambda)|^2} \right]}. \quad (26)$$

Распределение (26) является симметричным. Его непрерывным аналогом является распределение Стьюдента.

На рисунке представлена область существования распределения (25). Для нее справедливы неравенства  $-\infty < K_1 < \infty, K_2 < 1, -1 < K_3 < 1, -1 < K_4 < 1$ . Слева она ограничена областью существования частного случая распределения VIIa при  $b = -0,5c$ , а справа – областью существования частного случая распределения VII при  $b = -0,5c$ .

На основе соотношения (4) можно получить выражения для параметра сдвига  $\mu$  при различных значениях параметров  $K_1, K_2, K_3$  и  $K_4$ . Причем, если  $1 < K_2 < 1,5$ , то

$$\mu = m_1 + \frac{3 + K_1 - 2K_2}{4(K_2 - 1)} - \sqrt{\left[ \frac{3 + K_1 - 2K_2}{4(K_2 - 1)} \right]^2 + \mu_2 \frac{2 - K_2}{K_2 - 1}}.$$

При  $K_2 = 1$

$$\mu = \begin{cases} m_1 - 2\mu_2 / (1 + K_1), & K_1 > -1; \\ m_1 + 2\mu_2 / (1 - K_1), & K_1 \leq -1. \end{cases}$$

Если  $K_2 < 1$ , то

$$\mu = m_1 - \sqrt{\mu_2 \frac{2 - K_2}{1 - K_2} (K_3 - \sqrt{K_3^2 - 1})}$$

при  $K_3 \geq 1, -\infty < K_4 < \infty$ ;

$$\mu = m_1 - K_1 / 4(1 - K_2)$$

при  $-1 < K_3 < 1, -1 < K_4 < 1$ ;

$$\mu = m_1 - \sqrt{\mu_2 \frac{2 - K_2}{1 - K_2} (K_4 + \sqrt{K_4^2 - 1})}$$

при  $-\infty < K_3 < 1, K_4 \leq -1$ .

## Выводы

Таким образом, произведена модернизация разностного уравнения Орда и получено его решение в виде обобщенного распределения вероятностей (12). Показано, что частными случаями распределения (12) являются известные дискретные законы распределения, такие как равномерный, биномиальный, Пуассона, отрицательный биномиаль-

ный, гипергеометрический, отрицательный гипергеометрический. Рассмотрены числовые характеристики обобщенного распределения (12), а также на его основе разработан метод идентификации основных видов дискретных законов распределения с помощью коэффициентов  $K_1$ ,  $K_2$  и вспомогательных коэффициентов  $K_3$ ,  $K_4$ , определяемых при помощи формул (9) и (19) соответственно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шереметьев А.Г. Статистическая теория лазерной связи. – М.: Связь, 1971. – 264 с.
2. Гальярди Р.М., Карп Ш. Оптическая связь. – М.: Связь, 1978. – 424 с.
3. Курикса А.А. Квантовая оптика и оптическая локация. – М.: Советское радио, 1973. – 184 с.
4. Основы импульсной лазерной локации / под. ред. В.Н. Рождествина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 512 с.
5. Хименко В.И., Тигин Д.В. Статистическая акустооптика и обработка сигналов. – СПб.: Изд-во С.-Петербургского университета, 1996. – 292 с.
6. Вадзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям. – СПб.: Наука, 2001. – 296 с.
7. Китаева А.В. Рекуррентное оценивание функции интенсивности пуассоновского процесса // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 5. – С. 5–9.
8. Карпов И.Г. Обобщенный дискретный закон распределения флуктуаций оптических сигналов // Радиотехника. – 2002. – № 4. – С. 70–75.
9. Карпов И.Г., Карпов М.Г., Проскурин Д.К. Методы обобщенного вероятностного описания и идентификации негауссовских случайных величин и процессов. – Воронеж: ВГУ, 2010. – 172 с.
10. Ord J.K. On a system of discrete distributions // Biometrika. – 1967. – V. 54. – № 3–4. – P. 649–656.
11. Ord J.K. Approximations to distribution functions which are hypergeometric series // Biometrika. – 1968. – V. 55. – № 1. – P. 243–248.
12. Бостанджиян В.А. Пособие по статистическим распределениям. – Черноголовка: Редакционно-издательский отдел ИПХФ РАН, 2000. – 1007 с.
13. Джонсон Н.Л., Коц С., Кемп А. Одномерные дискретные распределения. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 560 с.
14. Карпов И.Г., Грибков А.Н. Модернизация распределений Пирсона для аппроксимации двухсторонних законов распределения экспериментальных данных // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 2. – С. 5–10.
15. Никифоров А.Ф., Суслов С.К., Уваров В.Б. Классические ортогональные полиномы дискретной переменной. – М.: Наука, 1985. – 216 с.
16. Бейтмен Г., Эрдейи А. Высшие трансцендентные функции. Функции Бесселя, функции параболического цилиндра, ортогональные многочлены. – М.: Наука, 1966. – 296 с.
17. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей. – М.: Наука, 1988. – 448 с.
18. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды. Элементарные функции. – М.: Наука, 1984. – 800 с.
19. Вероятность и математическая статистика: энциклопедия / гл. ред. Ю.В. Прохоров. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1999. – 910 с.
20. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды. Специальные функции. – М.: Наука, 1983. – 750 с.
21. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды. Дополнительные главы. – М.: Наука, 1986. – 800 с.

Поступила 27.11.2013 г.

UDC 519.224

## MODERNIZATION OF ORD DISTRIBUTION FOR APPROXIMATION OF THE BILATERAL DISCRETE DISTRIBUTIONS OF EXPERIMENTAL DATA

Ivan G. Karpov,

Dr. Sc., Tambov state technical university, 106, Sovetskaya street, Tambov, 392000, Russia. E-mail: zeratul68@mail.ru

Aleksey N. Gribkov,

Cand. Sc., Tambov state technical university, 106, Sovetskaya street, Tambov, 392000, Russia. E-mail: GribkovAlexey@yandex.ru

*The urgency of considered issue is caused by the need to improve the accuracy and to simplify the approximation of experimental discrete data laws for bilateral distribution. Discrete distribution laws have wide practical application of probabilistic models as signal fluctuations in solving the synthesis of optimal methods for receiving and processing information in optical radar and communications. It is often necessary to use a generalized discrete distribution law, as each of the known laws of distribution alone can not achieve the necessary degree of integration of data with respect to fluctuations of optical signals.*



**The main aim of the study:** modernization of the Ord difference equation and getting on basis of its solving the distribution law for generalized two-way discrete random variable, and development of the method for identifying the main types of discrete distribution laws applied in practice.

**The methods used in the study:** calculations using methods of the probability theory and statistics, as well as the software MathCAD; methods of integral and differential calculus.

**The results:** The authors have modernized the Ord difference equation and have received its solution in the form of generalized probability distribution. It was shown that the known discrete distribution laws, such as uniform, binomial, Poisson, negative binomial, hypergeometric, negative hypergeometric particular are the particular cases of the obtained distribution. The paper introduces the diagram of the bilateral distribution laws of discrete random variable, which shows the existence areas of the above discrete distribution laws. The authors considered numerical characteristics of the generalized distribution and on its basis developed the method of identifying the main types of discrete distribution laws applied in practice.

**Key words:**

Ord distribution, discrete distribution law, approximation of distribution laws, density of probabilities distribution, discrete random variable.

**REFERENCES**

1. Sheremetev A.G. *Statisticheskaya teoriya lazernoy svyazi* [Statistical theory of laser communication]. Moscow, Svyaz Publ., 1971. 264 p.
2. Galyardi R.M., Karp Sh. *Opticheskaya svyaz* [Optical communications]. Moscow, Svyaz Publ., 1978. 424 p.
3. Kuriksha A.A. *Kvantovaya optika i opticheskaya lokatsiya* [Quantum optics and optical location]. Moscow, Sovetskoe radio publ., 1973. 184 p.
4. *Osnovy impulsnoy lazernoy lokatsii* [Basics pulsed laser location]. Ed. by V.N. Rozhdestvin. Moscow, MG TU im. N.E. Bauman Press, 2006. 512 p.
5. Khimenko V.I., Tigin D.V. *Statisticheskaya akustooptika i obrabotka signalov* [Statistical acoustooptics and signal processing]. St. Petersburg, S.-Petersburg university Press, 1996. 292 p.
6. Vadzinskiy R.N. *Spravochnik po veroyatnostnym raspredeleniyam* [Handbook of probability distributions]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2001. 296 p.
7. Kitaeva A.V. Rekurrentnoe otsenivanie funktsii otsenivnosti puassonovskogo protsesssa [Recurrent estimation of the Poisson process function intensity]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 312, no. 5, pp. 5–9.
8. Karpov I.G. Obobshchenny diskretny zakon raspredeleniya fluktuatsiy opticheskikh signalov [Generalized discrete distribution law of optical signals fluctuations]. *Radiotekhnika*, 2002, no. 4, pp. 70–75.
9. Karpov I.G., Karpov M.G., Proskurin D.K. *Metody obobshchennogo veroyatnostnogo opisaniya i identifikatsii negaussovskikh sluchaynykh velichin i protsessov* [Methods of generalized probabilistic description and identification of non-Gaussian random variables and processes]. Voronezh, VGU Press, 2010. 172 p.
10. Ord J.K. On a system of discrete distributions. *Biometrika*, 1967, vol. 54, no. 3–4, pp. 649–656.
11. Ord J.K. Approximations to distribution functions which are hypergeometric series. *Biometrika*, 1968, vol. 55, no. 1, pp. 243–248.
12. Bostandzhiyan V.A. *Posobie po statisticheskim raspredeleniyam* [Manual on statistical distributions]. Chernogolovka, IPHF RAN Publ. Dep., 2000. 1007 p.
13. Dzhonson N.L., Kots S., Kemp A. *Odnomernye diskretnye raspredeleniya* [Dimensional discrete distributions]. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2010. 560 p.
14. Karpov I.G., Gribkov A.N. Modernizatsiya raspredeleniy Pirsona dlya approksimatsii dvukhstoronnihh zakonov raspredeleniya eksperimentalnykh dannykh [Modernization of Pearson distribution for approximation of the bilateral distribution laws of experimental data]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 2, pp. 5–10.
15. Nikiforov A.F., Suslov S.K., Uvarov V.B. *Klassicheskie ortogonalnye polinomy diskretnoy peremennoy* [Classical orthogonal polynomials of a discrete variable]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 216 p.
16. Beytmen G., Erdeyi A. *Vysshie transtsendentnye funktsii. Funktsii Besselya, funktsii parabolicheskogo tsilindra, ortogonalnye mnogochleny* [Higher transcendental functions. Bessel functions, parabolic cylinder functions, orthogonal polynomials]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 296 p.
17. Gnedenko B.V. *Kurs teorii veroyatnostey* [Course on probability theory]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 448 p.
18. Prudnikov A.P., Bryichkov Yu.A., Marichev O.I. *Integraly i ryady. Elementarnye funktsii* [Integrals and series. Elementary function]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 800 p.
19. *Veroyatnost i matematicheskaya statistika: entsiklopediya* [Probability and mathematical statistics: Encyclopedia]. Ed. by Yu.V. Prohorov. Moscow, Bolshaya Rossiyskaya entsiklopediya Publ., 1999. 910 p.
20. Prudnikov A.P., Bryichkov Yu.A., Marichev O.I. *Integraly i ryady. Spetsialnyie funktsii* [Integrals and series. Special functions]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 750 p.
21. Prudnikov A.P., Bryichkov Yu.A., Marichev O.I. *Integraly i ryady. Dopolnitelnye glavy* [Integrals and series. Additional functions]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 800 p.

Received: 27 November 2013.

УДК 517.956.6

## О ЗАДАЧЕ СОПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ГИПЕРБОЛИЧЕСКОГО И ПСЕВДОПАРАБОЛИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЙ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА

**Саадалов Толонбай Ысманович,**

ст. преподаватель кафедры информатики Ошского технологического  
университета им. М.М. Адышева, Кыргызская Республика,  
714081, г. Ош, ул. Исанова, 81. E-mail: saadtol\_68@mail.ru

Актуальность работы обусловлена доказательством корректности задачи сопряжения для линейного гиперболического и псевдопараболического уравнений четвертого порядка с младшими членами.

**Цель работы:** доказательство существования и единственности решения задачи сопряжения для гиперболического и псевдопараболического уравнений четвертого порядка, когда условия сопряжения задаются на не характеристической линии

**Методы исследования:** Методом функции Римана и интегральных уравнений разрешимость задачи эквивалентным образом сводится к решению системы интегральных уравнений Фредгольма второго рода, решение которого устанавливается методом последовательных приближений.

**Результаты:** В работе исследована разрешимость задачи сопряжения для гиперболического и псевдопараболического уравнений четвертого порядка с младшими переменными коэффициентами. Установлено, что когда порядок уравнения равен четырем и условия сопряжения задаются на не характеристической линии, то для корректности задачи, вместо обычных двух условий склеивания, необходимо задание четырех условий склеивания. Особенностью данной задачи является то, что условия сопряжения задаются не на координатной оси, а на биссектрисе первой четверти плоскости. С целью определения следа искомой функции и ее производных второго, третьего, четвертого порядков на линии изменения типа уравнений, а также для получения явного представления решения, построены функции Римана для линейного гиперболического и псевдопараболического уравнений четвертого порядка, определяемые как решения соответствующих сопряженных задач Гурса. Изучены некоторые свойства функции Римана, и получены представления решения задачи Коши для линейного гиперболического и псевдопараболического уравнений четвертого порядка с переменными коэффициентами. Разрешимость задачи сопряжения установлена эквивалентным сведением ее к разрешимости системы четырех линейных интегральных уравнений Фредгольма второго рода. Доказаны теоремы существования и единственности решений задачи сопряжения для гиперболического и псевдопараболического уравнений четвертого порядка.

**Ключевые слова:**

Задачи сопряжения, гиперболические и псевдопараболические уравнения, краевые и начальные условия, функции Римана, уравнения Вольтерра и Фредгольма.

**Постановка задачи**

При изучении физико-химических процессов, происходящихся в составных телах, часто используются математические модели, которые основаны на сопряжении различных типов уравнений в разных частях рассматриваемой области [1–3]. Задачи сопряжения уравнений в частных производных третьего и четвертого порядков изучены в работах [4–18].

В работе в области

$$D = \{(x, y) : 0 < x < \ell, 0 < y < \ell\}$$

рассмотрим задачу сопряжения для гиперболического и псевдопараболического уравнений четвертого порядка вида

$$L_1(u) \equiv u_{xxyy} + b(x, y)u_{xy} + c_1(x, y)u_x + c_2(x, y)u_y + d(x, y)u = 0, (x, y) \in D_1, \quad (1)$$

$$L_2(u) \equiv u_{xxyy} + \beta(x, y)u_{xy} + \gamma_1(x, y)u_x + \gamma_2(x, y)u_y + \delta(x, y)u = 0, (x, y) \in D_2, \quad (2)$$

где  $b, \beta, d, \delta, c_i, g_i$  ( $i=1,2$ ) – заданные функции, а  $D_1 = D \cap \{x < y\}$ ,  $D_2 = D \cap \{x > y\}$ .

Через  $C^{n+m}$  обозначим класс функций, имеющих производные  $\partial^{r+s} / \partial x^r \partial y^s$  ( $r=0,1,\dots,n; s=0,1,\dots,m$ ). Отметим, что линия  $y=x$  не является характеристикой уравнения (1) и (2).

**Задача 1 (Задача сопряжения).** Найти функцию  $u(x, y) \in C(\bar{D})[C^{2+2}(D_1) \cup C^{3+2}(D_2)]$ , удовлетворяющую уравнениям (1) и (2) соответственно в областях  $D_1$  и  $D_2$ , краевым условиям

$$u(0, y) = \varphi_1(y), \quad u_x(0, y) = \varphi_2(y), \quad 0 \leq y \leq \ell, \quad (3)$$

$$u_{xx}(\ell, y) = \varphi_3(y), \quad 0 \leq y \leq \ell, \quad (4)$$

$$u(x, 0) = \psi(x), \quad 0 \leq x \leq \ell, \quad (5)$$

и условиям сопряжения

$$u(y-0, y) = u(y+0, y),$$

$$u_x(y-0, y) = u_x(y+0, y), \quad 0 \leq y \leq \ell,$$

$$u_{xy}(y-0, y) = u_{xy}(y+0, y),$$

$$u_{xxy}(y-0, y) = u_{xxy}(y+0, y), \quad 0 \leq y \leq \ell, \quad (6)$$

где  $\varphi_i$  ( $i=1,3$ ) – заданные функции, причем для них выполняются следующие условия

$$\varphi_i \in C^2[0, \ell] \quad (i=1,2), \quad \varphi_3 \in C^1[0, \ell], \quad \psi \in C^2[0, \ell], \quad (7)$$

$$b \in C(\bar{D}_1) \cap C^{1+1}(D_1), \quad c_1 \in C(\bar{D}_1) \cap C^{1+0}(D_1),$$

$$c_2 \in C(\bar{D}_1) \cap C^{0+1}(D_1), \quad d \in C(\bar{D}_1), \quad (8)$$

$$\beta \in C(\bar{D}_2) \cap C^{1+1}(D_2), \quad \gamma_1 \in C(\bar{D}_2) \cap C^{1+0}(D_2),$$

$$\gamma_2 \in C(\bar{D}_2) \cap C^{0+1}(D_2), \quad \delta \in C(\bar{D}_2), \quad (9)$$

$$\varphi_{i+1}(0) = \psi^{(i)}(0) (i = 0, 1), \quad \varphi_3(0) = \psi''(\ell). \quad (10)$$

Уравнения (1) и (2) в области  $D$  в силу условиям сопряжения (6) являются уравнениями смешанного типа [19]. Задача 1 в случае  $b, \beta, c_i, \gamma_i = 0 (i=1,2), d, \delta = \text{const}$  изучена в работе [20].

Для решения задачи 1 введем следующие обозначения:

$$u(y, y) = \tau(y), \quad u_x(y, y) = v(y), \\ u_{xy}(y, y) = \mu(y), \quad u_{xxy}(y, y) = \chi(y), \quad 0 \leq x \leq \ell, \quad (11)$$

где  $\tau(x), \nu(x), \mu(x), \chi(x)$  – пока неизвестные функции.

Если удастся определить функции  $\tau(x), \nu(x), \mu(x), \chi(x)$ , то решение задачи 1 сводится к определению решения уравнений (1) и (2) в областях  $D_1$  и  $D_2$  соответственно.

### Решение вспомогательных задач Коши

Рассмотрим следующие вспомогательные задачи.

**Задача 2.** Найти функцию  $u(x, y) \in C(\bar{D}_1) \cap C^{2+2}(D_1)$  удовлетворяющую в области  $D_1$  уравнению (1) и начальным условиям (11).

**Задача 3.** Найти функцию  $u(x, y) \in C(D_{-2}) \cap C^{3+1}(D_2)$  удовлетворяющую в области  $D_2$  уравнению (2) и начальным условиям (11).

**Теорема 1.** Если выполняются условия (8) и  $\tau(y) \in C^2[0, \ell], \nu(y) \in C^1[0, \ell], \mu(y) \in C^1[0, \ell], \chi(y) \in \tilde{N}[0, \ell]$ , то решение задачи 2 существует, единственно и представимо в виде

$$u(x, y) = \tau(y) - \int_x^y \left[ A_1(x, y; \xi) \tau(\xi) + B_1(x, y; \xi) \nu(\xi) + C_1(x, y; \xi) \mu(\xi) + \vartheta(x, y; \xi, \xi) \chi(\xi) \right] d\xi, \\ (x, y) \in D_1, \quad (12)$$

где

$$A_1(x, y; \xi) = \vartheta_{\eta\xi}(x, y; \xi, \xi) + b(\xi, \xi) \vartheta_{\eta}(x, y; \xi, \xi) + \\ + [b_{\eta}(\xi, \xi) - c_1(\xi, \xi) + c_2(\xi, \xi)] \vartheta(x, y; \xi, \xi), \\ B_1(x, y; \xi) = \vartheta_{\eta\xi}(x, y; \xi, \xi) + b(\xi, \xi) \vartheta(x, y; \xi, \xi), \\ C_1(x, y; \xi) = \vartheta_{\eta}(x, y; \xi, \xi),$$

а  $\vartheta(x, y; \xi, \eta)$  – функция Римана, определяемая в области

$$D_1^* = \{(\xi, \eta) : x < \xi < y, \xi < \eta < y\}$$

как решение следующей задачи Гурса [9]:

$$L_1^*(\vartheta) \equiv \vartheta_{\eta\xi\xi} + (b\vartheta)_{\eta\xi} - (c_1\vartheta)_{\xi} - (c_2\vartheta)_{\eta} + d\vartheta = 0, \\ (x, y) \in D_1^*, \quad (13)$$

$$\vartheta(x, y; \xi, \eta)|_{\xi=x} = 0, \quad \vartheta_{\xi}(x, y; \xi, \eta)|_{\xi=x} = \eta - y, \\ x \leq \eta \leq y, \\ \vartheta(x, y; \xi, \eta)|_{\eta=y} = 0, \quad \vartheta_{\eta}(x, y; \xi, \eta)|_{\eta=y} = \xi - x, \\ x \leq \xi \leq y. \quad (14)$$

**Доказательство.** Из уравнения (13), с учетом краевых условий (14), методом интегрирования получим интегральное уравнение Вольтерра второго рода для функции Римана:

$$\vartheta(x, y; \xi, \eta) = (\xi - x)(\eta - y) - \int_x^{\xi} \int_y^{\eta} K(\xi, \eta; s, t) \vartheta(x, y; s, t) dt, \quad (15)$$

где

$$K(\xi, \eta; s, t) = b(s, t) - (\eta - t)c_1(s, t) - \\ - (\xi - s)c_2(s, t) + (\xi - s)(\eta - t)d(s, t),$$

которое допускает единственное решение. Из (12) найдем производные

$$u_x(x, y) = v(x) - \int_x^y \left[ A_{1x}(x, y; \xi) \tau(\xi) + B_{1x}(x, y; \xi) \nu(\xi) + C_{1x}(x, y; \xi) \mu(\xi) + \vartheta_x(x, y; \xi, \xi) \chi(\xi) \right] d\xi, \\ (x, y) \in D_1, \quad (16)$$

$$u_{xy}(x, y) = \mu(y) + \tau(y) \int_x^y c_2(s, y) ds - \int_x^y \left[ A_{1xy}(x, y; \xi) \tau(\xi) + B_{1xy}(x, y; \xi) \nu(\xi) + C_{1xy}(x, y; \xi) \mu(\xi) + \vartheta_{xy}(x, y; \xi, \xi) \chi(\xi) \right] d\xi, \\ (x, y) \in D_1, \quad (17)$$

$$u_{xxy}(x, y) = \chi(x) + c_2(x, x) \tau(x) - c_2(x, y) \tau(y) - \int_x^y \left[ A_{1xxy}(x, y; \xi) \tau(\xi) + B_{1xxy}(x, y; \xi) \nu(\xi) + C_{1xxy}(x, y; \xi) \mu(\xi) + \vartheta_{xxy}(x, y; \xi, \xi) \chi(\xi) \right] d\xi, \\ (x, y) \in D_1. \quad (18)$$

Из формул (12), (16)–(18) легко усмотреть, что начальные условия (11) выполняются.

**Теорема 2.** Если выполняются условия (9) и  $\tau(y) \in C^1[0, \ell], \nu(y) \in C^2[0, \ell], \mu(y) \in C^1[0, \ell], \chi(y) \in C[0, \ell]$ , то решение задачи 3 существует, единственно и представимо в виде

$$u(x, y) = A_2(x, y) \tau(y) + \int_y^x \left[ B_2(x, y; \xi) \tau(\xi) + C_2(x, y; \xi) \nu(\xi) + w_{\xi}(x, y; \xi, \xi) \mu(\xi) - w(x, y; \xi, \xi) \chi(\xi) \right] d\xi, \\ (x, y) \in D_2, \quad (19)$$

где

$$A_2(x, y) = w_{\xi\xi}(x, y; y, y) + \beta(y, y) w(x, y; y, y), \\ B_2(x, y; \xi) = w_{\xi\xi\eta}(x, y; \xi, \xi) + \beta(\xi, \xi) w_{\eta}(x, y; \xi, \xi) + \\ + [\beta_{\eta}(\xi, \xi) - \gamma_1(\xi, \xi) + \gamma_2(\xi, \xi)] w(x, y; \xi, \xi), \\ C_2(x, y; \xi) = w_{\xi\xi}(x, y; \xi, \xi) + \beta(\xi, \xi) w(x, y; \xi, \xi),$$

$w(x, y; \xi, \eta)$  – функция Римана, определяемая в области

$$D_2^* = \{(\xi, \eta) : y < \xi < x, y < \eta < \xi\}$$

как решение задачи Гурса [9]:

$$L_2^*(w) \equiv w_{\xi\xi\xi\eta} + (\beta w)_{\xi\eta} - (\gamma_1 w)_{\xi} - (\gamma_2 w)_{\eta} + \delta w = 0, \\ (x, y) \in D_2^*, \quad (20)$$

$$w(x, y; \xi, \eta)|_{\xi=x} = 0, \quad w_{\xi}(x, y; \xi, \eta)|_{\xi=x} = 0, \\ w_{\xi\xi}(x, y; \xi, \eta)|_{\xi=x} = 1, \quad y \leq \eta \leq x, \\ w(x, y; \xi, \eta)|_{\eta=y} = \omega(x, y; \xi), \quad y \leq \xi \leq x, \quad (21)$$

а  $\omega(x, y; \xi)$  – решение следующей задачи Коши:

$$w_{\xi\xi\xi}(x, y; \xi, y) + [\beta(\xi, y)w(x, y; \xi, y)]_{\xi} - \gamma_2(\xi, y)w(x, y; \xi, y) = 0, \quad y < \xi < x, \quad (22)$$

$$w(x, y; \xi, y)|_{\xi=x} = 0, \quad w_{\xi}(x, y; \xi, y)|_{\xi=x} = 0, \\ w_{\xi\xi}(x, y; \xi, y)|_{\xi=x} = 1. \quad (23)$$

Доказательство теоремы 2 аналогично доказательству теоремы 1. Задача (20), (21) однозначно определяет функцию Римана  $w(x, y; \xi, \eta)$  в области  $D_2$ .

**Лемма 1.** Если

$$\forall y \in [0, \ell] \wedge x \in [y, \ell]: \beta(x, y) - \frac{1}{2}(x - y)^2 \gamma_2(x, y) \leq 0, \quad (24)$$

то

$$w_{xx}(\ell, y; y, y) \geq 1. \quad (25)$$

**Доказательство.** Интегрируя уравнение (22) и с учетом условий (23), получим интегральное уравнение Вольтерра второго рода

$$w(x, y; \xi, y) = \frac{1}{2}(x - \xi)^2 + \int_{\xi}^x H(y, \xi; s)w(x, y; s, y)ds, \quad y \leq \xi \leq x, \quad (26)$$

где

$$H(y, \xi; s) = -(s - \xi)[\beta(s, y) - \frac{1}{2}(s - \xi)^2 \gamma_2(s, y)].$$

Дифференцируя дважды уравнение (26), имеем

$$w_{xx}(x, y; \xi, y) = 1 + \int_{\xi}^x H(y, \xi; s)w_{xx}(x, y; s, y)ds. \quad (27)$$

Полагая  $x = \ell$ ,  $\xi = y$  из (27) имеем

$$w_{xx}(\ell, y; y, y) = 1 + \int_y^{\ell} H(y, y; s)w_{xx}(\ell, y; s, y)ds. \quad (28)$$

При соблюдении условия (24) выполняется неравенство  $(y, y; s) \geq 0$ . Тогда из (28) заключаем, что неравенство (25) имеет место. Лемма 1 доказано.

**Сведение задачи к решению системы интегральных уравнений**

Используя первое условие (3) из (12), будем иметь

$$\tau(y) = \tau_0(y) + \int_0^y [H_{11}(y, \xi)\tau(\xi) + H_{12}(y, \xi)v(\xi) + H_{13}(y, \xi)\mu(\xi) + H_{14}(y, \xi)\chi(\xi)]d\xi, \quad (29)$$

где

$$H_{11}(y, \xi) = A_1(0, y; \xi), \quad H_{12}(y, \xi) = B_1(0, y; \xi), \\ H_{13}(y, \xi) = C_1(0, y; \xi), \quad H_{14}(y, \xi) = \mathcal{G}(0, y; \xi, \xi),$$

где  $\tau_0(y) = \varphi_1(y)$ . Из (15) с учетом второго условия (3) имеем

$$v(0) - \int_0^y [A_{1x}(0, y; \xi)\tau(\xi) + B_{1x}(0, y; \xi)v(\xi) + C_{1x}(0, y; \xi)\mu(\xi) + \mathcal{G}_x(0, y; \xi, \xi)\chi(\xi)]d\xi = \varphi_2(y).$$

Дифференцируя полученное соотношение по  $y$ , получим

$$\mu(y) = A_{1x}(0, y; y)\tau(y) + \int_0^y [A_{1xy}(0, y; \xi)\tau(\xi) + B_{1xy}(0, y; \xi)v(\xi) + C_{1xy}(0, y; \xi)\mu(\xi) + \mathcal{G}_{xy}(0, y; \xi, \xi)\chi(\xi)]d\xi + \varphi_2'(y),$$

Отсюда с учетом (29) имеем

$$\mu(y) = \mu_0(y) + \int_0^y [H_{31}(y, \xi)\tau(\xi) + H_{32}(y, \xi)v(\xi) + H_{33}(y, \xi)\mu(\xi) + H_{34}(y, \xi)\chi(\xi)]d\xi, \quad (30)$$

где

$$H_{31}(y, \xi) = A_{1x}(0, y; y)H_{11}(y, \xi) + A_{1xy}(0, y; \xi), \\ H_{32}(y, \xi) = A_{1x}(0, y; y)H_{12}(y, \xi) + B_{1xy}(0, y; \xi), \\ H_{33}(y, \xi) = A_{1x}(0, y; y)H_{13}(y, \xi) + C_{1xy}(0, y; \xi), \\ H_{34}(y, \xi) = A_{1x}(0, y; y)H_{14}(y, \xi) + \mathcal{G}_{xy}(0, y; \xi, \xi), \\ \mu_0(y) = A_{1x}(0, y; y)\tau_0(y) + \varphi_2'(y).$$

Используя условие (5) в (18), и дифференцируя полученное соотношение, имеем

$$v(y) = v_0(y) + \int_0^y [H_{21}(y, \xi)\tau(\xi) + H_{22}(y, \xi)v(\xi) + H_{23}(y, \xi)\mu(\xi) + H_{24}(y, \xi)\chi(\xi)]d\xi, \quad (31)$$

$$H_{21}(y, \xi) = -B_{2x}(y, 0; \xi), \quad H_{22}(y, \xi) = -C_{2x}(y, 0; \xi), \\ H_{23}(y, \xi) = -w_{\xi x}(y, 0; \xi, \xi), \quad H_{24}(y, \xi) = w_x(y, 0; \xi, \xi), \\ v_0(y) = \psi'(y) - A_{2x}(y, 0)\psi(0).$$

Дифференцируя (29), получим

$$\tau'(y) = \tau_0'(y) + H_{11}(y, y)\tau(y) + v(y) + y\mu(y) + \int_0^y [H_{11y}(y, \xi)\tau(\xi) + H_{12y}(y, \xi)v(\xi) + H_{13y}(y, \xi)\mu(\xi) + H_{14y}(y, \xi)\chi(\xi)]d\xi, \quad (32)$$

Из (32) с учетом (29)–(31), имеем (33)

$$\tau'(y) = z_0(y) + \int_0^y [H_{01}(y, \xi)\tau(\xi) + H_{02}(y, \xi)v(\xi) + H_{03}(y, \xi)\mu(\xi) + H_{04}(y, \xi)\chi(\xi)]d\xi, \quad (33)$$

$$H_{0j}(y, \xi) = H_{11}(y, y)H_{1j}(y, \xi) + H_{2j}(y, \xi) + yH_{3j}(y, \xi) + H_{1jy}(y, \xi), \quad j = \overline{1, 4}, \\ z_0(y) = \tau_0'(y) + H_{11}(y, y)\tau_0(y) + v_0(y) + y\mu_0(y).$$

Дважды дифференцируя (18) по  $x$ , получим

$$u_{xx}(x, y) = A_{2xx}(x, y)\tau(y) + v'(x) - \mu(x) + \int_y^x [B_{2xx}(x, y; \xi)\tau(\xi) + C_{2xx}(x, y; \xi)v(\xi) + w_{\xi xx}(x, y; \xi, \xi)\mu(\xi) + w_{xx}(x, y; \xi, \xi)\chi(\xi)]d\xi, \quad (34)$$

$(x, y) \in D_2.$

Используя условие (4) в (34) и дифференцируя полученное соотношение, будем иметь

$$\chi(y) = W(y) \left\{ \begin{aligned} & [A_{2_{xy}}(\ell, y) - B_{2_{xx}}(\ell, y; y)]\tau(y) + \\ & + A_{2_{xx}}(\ell, y)\tau'(y) - C_{2_{xx}}(\ell, y; y)v(y) - \\ & - w_{\xi xx}(\ell, y; y, y)\mu(y) \end{aligned} \right\} + W(y) \int_y^\ell \left\{ \begin{aligned} & B_{2_{xy}}(\ell, y; \xi)\tau(\xi) + \\ & + C_{2_{xy}}(\ell, y; \xi)v(\xi) + \\ & + w_{\xi xy}(\ell, y; \xi, \xi)\mu(\xi) - \\ & - w_{xy}(\ell, y; \xi, \xi)\chi(\xi) \end{aligned} \right\} d\xi - W(y)\varphi_3'(y), \quad (35)$$

где  $W(y) = 1/w(\lambda, y; y, y)$ .

С учетом соотношений (29)–(31), (33) из (35) получим

$$\chi(y) = \chi_0(y) + \int_0^\ell \left[ \begin{aligned} & K_{41}(y, \xi)\tau(\xi) + K_{42}(y, \xi)v(\xi) + \\ & + K_{43}(y, \xi)\mu(\xi) + K_{44}(y, \xi)\chi(\xi) \end{aligned} \right] d\xi, \quad (36)$$

$$K_{41}(y, \xi) = \begin{cases} E_1(y, \xi), & 0 \leq \xi < y, \\ W(y)B_{2_{xy}}(\ell, y; \xi), & y < \xi \leq \ell, \end{cases}$$

$$K_{42}(y, \xi) = \begin{cases} E_2(y, \xi), & 0 \leq \xi < y, \\ W(y)C_{2_{xy}}(\ell, y; y), & y < \xi \leq \ell, \end{cases}$$

$$K_{43}(y, \xi) = \begin{cases} E_3(y, \xi), & 0 \leq \xi < y, \\ W(y)w_{\xi xy}(\ell, y; \xi, \xi), & y < \xi \leq \ell, \end{cases}$$

$$K_{44}(y, \xi) = \begin{cases} E_4(y, \xi), & 0 \leq \xi < y, \\ -W(y)w_{xy}(\ell, y; \xi, \xi), & y < \xi \leq \ell, \end{cases}$$

$$E_j(y, \xi) =$$

$$= W(y) \left\{ \begin{aligned} & [A_{2_{xy}}(\ell, y) - B_{2_{xx}}(\ell, y; y)]H_{1j}(y, \xi) + \\ & + A_{2_{xx}}(\ell, y)H_{0j}(y, \xi) - \\ & - C_{2_{xx}}(\ell, y; \xi)H_{2j}(y, \xi) - \\ & - w_{\xi xx}(\ell, y; y, y)H_{3j}(y, \xi) \end{aligned} \right\},$$

$$j = \overline{1, 4}.$$

$$\chi_0(y) =$$

$$= W(y) \left\{ \begin{aligned} & [A_{2_{xy}}(\ell, y) - B_{2_{xx}}(\ell, y; y)]\tau_0(y) + \\ & + A_{2_{xx}}(\ell, y)z_0(y) - C_{2_{xx}}(\ell, y; y)v_0(y) - \\ & - w_{\xi xx}(\ell, y; y, y)\mu_0(y) - \varphi_3'(y) \end{aligned} \right\}.$$

Таким образом, задача 1 сведена к решению системы интегральных уравнений Фредгольма второго рода вида (29)–(31), (36) относительно функций  $\tau(y)$ ,  $v(y)$ ,  $\mu(y)$ ,  $\chi(y)$ . После определения этих функций решение задачи 1 в области  $D_2$  представляется в виде (19).

#### Решение системы интегральных уравнений

Систему уравнений (29)–(31), (36) запишем в виде

$$g_i(y) = \rho_i(y) + \sum_{j=1}^4 \int_0^\ell K_{ij}(y, \xi)g_j(\xi)d\xi, \quad i = \overline{1, 4}, \quad (37)$$

где

$$g_1(y) = \tau(y), \quad g_2(y) = v(y),$$

$$g_3(y) = \mu(y), \quad g_4(y) = \chi(y),$$

$$\rho_1(y) = \tau_0(y), \quad \rho_2(y) = v_0(y),$$

$$\rho_3(y) = \mu_0(y), \quad \rho_4(y) = \chi_0(y),$$

$$K_{i1}(y, \xi) = \begin{cases} H_{i1}(y, \xi), & 0 \leq \xi \leq y, \\ 0, & y < \xi \leq \ell, \end{cases}$$

$$K_{i2}(y, \xi) = \begin{cases} H_{i2}(y, \xi), & 0 \leq \xi \leq y, \\ 0, & y < \xi \leq \ell, \end{cases}$$

$$K_{i3}(y, \xi) = \begin{cases} H_{i3}(y, \xi), & 0 \leq \xi \leq y, \\ 0, & y < \xi \leq \ell, \end{cases}$$

$$K_{i4}(y, \xi) = \begin{cases} H_{i4}(y, \xi), & 0 \leq \xi \leq y, \\ 0, & y < \xi \leq \ell, \end{cases}$$

$$i = \overline{1, 3}.$$

Пусть  $M = \max_{0 \leq i \leq 4} \left\{ \sum_{j=1}^4 \max_{0 \leq y, \xi \leq \ell} |K_{ij}(y, \xi)| \right\}$ . Если вы-

полняется условие

$$M\ell < 1, \quad (38)$$

тогда система уравнений (37) имеет единственное решение, представимое в виде

$$g_i(y) = \rho_i(y) + \sum_{j=1}^4 \int_0^\ell R_{ij}(y, \xi)g_j(\xi)d\xi, \quad i = \overline{1, 4},$$

где

$$R_{ij}(y, \xi) = \sum_{n=1}^{+\infty} \lambda^{n-1} K_{ij}^{(n)}(y, \xi),$$

$$K_{ij}^{(1)}(y, \xi) \equiv K_{ij}(y, \xi), \quad i, j = \overline{1, 4},$$

$$K_{ij}^{(n)}(y, \xi) =$$

$$= \int_0^\ell \left[ \begin{aligned} & K_{i1}^{(1)}(y, s)K_{1j}^{(n-1)}(s, \xi) + K_{i2}^{(1)}(y, s)K_{2j}^{(n-1)}(s, \xi) + \\ & + K_{i3}^{(1)}(y, s)K_{3j}^{(n-1)}(s, \xi) + K_{i4}^{(1)}(y, s)K_{4j}^{(n-1)}(s, \xi) \end{aligned} \right] ds,$$

$$i, j = \overline{1, 4}, \quad n = 2, 3, \dots$$

Таким образом, доказано

**Теорема 3.** Если выполняются условия (7)–(10), (24) и (38), то решение задачи 1 существует и единственно.

#### Заключение

Из теорем 1, 2 следует, что построением функции Римана для сопряженных задач (задачи Гурса) удастся получить представления решения вспомогательных задач, которые существенно используются при решении задачи сопряжения. Условие (24) обеспечивает достаточное условие Фредгольмовости системы (37). Из теоремы 3 вытекает корректность задачи сопряжения. Через функции Римана получены представления решения задачи в явном виде в областях  $D_1$  и  $D_2$  соответственно.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разностные схемы для задачи о сопряжении уравнений гиперболического и параболического типов / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич, С.В. Лемешевский, П.П. Матус // Сибирский математический журнал. – 1998. – Т. 39. – № 4. – С. 954–962.
2. Нахушева В.А. Об одной математической модели теплообмена в смешанной среде с идеальным контактом // Вестник СамГТУ. Сер. ФМН. – 2006. – Вып. 42. – С. 11–34.
3. Нахушев А.М. Уравнения математической биологии. – М.: Высш. шк., 1995. – 301 с.
4. Джураев Т.Д., Сопуев А. К теории дифференциальных уравнений в частных производных четвертого порядка. – Ташкент: Фан., 2000. – 144 с.
5. Кожобеков К.Г. О разрешимости задач сопряжений для нелинейных уравнений в частных производных третьего порядка // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 2. – С. 9–12.
6. Сопуев А., Аркабаев Н.К. Нелокальная задача с интегральным условием для линейного уравнения в частных производных третьего порядка // Вестник КРСУ. – 2010. – Т. 10. – С. 150–153.
7. Сопуев А., Аркабаев Н.К. Краевые задачи для смешанного парабола-гиперболического уравнения третьего порядка с двумя линиями изменения типа // Вестник КНУ. Спец. выпуск. – 2011. – С. 136–138.
8. Sopuev A., Arkabaev N.K. Problems of interface for linear pseudoparabolic equations of the third order // Book of Abstracts. The 4<sup>th</sup> congress of the TWMS. – Baku, Azerbaijan, 1–3 July, 2011. – P. 276.
9. Молдоярлов У.Д. Нелокальная задача с интегральными условиями для нелинейного уравнения в частных производных третьего порядка // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 2. – С. 14–17.
10. Саадалов Т.Ы. Краевые задачи для смешанного псевдопарабола-гиперболического уравнения четвертого порядка с нелокальным условием сопряжения в криволинейном треугольнике // Вестник Ошского государственного университета. Серия естественных наук. – 2012. – № 3. – С. 114–121.
11. Сопуев А., Сатаров А.Э. Задачи сопряжений для уравнений в частных производных четвертого порядка с различными действительными характеристиками // Исследования по интегродифференциальным уравнениям. – Бишкек: Илим, 2012. – Вып. 44. – С. 124–133.
12. Сопуев А., Саадалов Т.Ы. Краевые задачи для смешанного псевдопарабола-гиперболического уравнения четвертого порядка с нелокальным условием сопряжения в криволинейной области // Вестник ОшГУ. Серия естественных наук. – 2012. – № 3. – Вып. III. – С. 122–128.
13. Сопуев А., Сатаров А.Э. Задача сопряжения для нелинейных уравнений в частных производных четвертого порядка // Вестник ОшГУ. Серия естественных наук. – 2012. – № 3. – Вып. III. – С. 128–138.
14. Сопуев А., Аркабаев Н.К. Задачи сопряжения для линейных псевдопараболических уравнений третьего порядка // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2013. – № 1 (21). – С. 16–23.
15. Сопуев А., Сатаров А.Э. Об одной задаче сопряжения для нелинейных уравнений гиперболического типа четвертого порядка // Вестник Ошского государственного университета. Серия естественных наук. – 2013. – № 1. – С. 252–259.
16. Сопуев А., Саадалов Т.Ы. О задаче сопряжения для гиперболических уравнений четвертого порядка // Современные проблемы дифференциальных уравнений и их проблемы: Тезисы докл. Респ. науч. конф. с участием ученых из стран СНГ. – Ташкент, 21–23 ноября 2013 г. – Ташкент: НУУ им. М. Улукбека, 2013. – С. 105–106.
17. Смирнов М.М. Уравнения смешанного типа. – М: Наука, 1970. – 296 с.
18. Сопуев А., Саадалов Т.Ы. Об одной задаче сопряжения для псевдопарабола-гиперболического уравнения четвертого порядка // актуальные проблемы теории управления, топологии и операторных уравнений: Междунар. юбил. науч. конф., посвящ. 20-летию КРСУ и 100-летию проф. Я.В. Быкова: Тезисы докл. – Бишкек, 5–7 сентября 2013 г. – Бишкек: КРСУ, 2013. – С. 114–115.
19. Сопуев А., Саадалов Т.Ы. Краевые задачи для смешанного псевдопарабола-гиперболического уравнения четвертого порядка с нелокальным условием сопряжения // Известия Ошского технологического университета. – 2012. – № 1. – С. 55–59.
20. Джураев Т.Д., Сопуев А., Мамажанов М. Краевые задачи для уравнений парабола-гиперболического типа. – Ташкент: Фан, 1986. – 220 с.

*Поступила 24.06.2014 г.*

UDC 517.956.6

## THE CONJUGATE PROBLEM FOR HYPERBOLIC AND PSEUDOPARABOLIC FOURTH-ORDER EQUATIONS

Tolonbai Y. Saadalov,

Osh Technological University named after M. Adyshev, 81, Isanova street,  
Osh, 714081, the Kyrgyz Republic. E-mail: saadtol\_68@mail.ru

Relevance of the research is considered by the proof of correctness of the conjugation problem for linear hyperbolic and pseudoparabolic fourth-order equations with low figures.

**The main aim of the research** is to prove the existence and uniqueness of solution for conjugation problem for hyperbolic and pseudoparabolic fourth-order equations when matching conditions are specified not on a characteristic line.

**The methods used in the study:** Using Riman's function and integral equations methods and equivalent model the solution of the problem is reduced to the solution of the Fredholm integral equations system of the second order where the solution is attained by the consequent approximation method.

**The results:** The author has studied the solvability of the conjugation problem for hyperbolic and pseudoparabolic fourth-order equations with low variable coefficients. It was ascertained that when the equation order equals four, and matching conditions are specified not on the characteristic line, four gluing conditions should be specified for the problem correctness instead of usual two gluing conditions. The peculiarity of the problem is that the matching conditions are set not on the coordinate axis but on the bisector of the plane first quarter. In order to determine the unknown function trace and its derivatives of the second, third and fourth orders of changes in the line-type equations, as well as to obtain an explicit solution representation, Riemann functions were constructed for linear hyperbolic and pseudoparabolic fourth-order equations that are defined as solutions of the corresponding Goursat conjugate problems. The author studied some properties of the Riemann function and obtained the solution representations for the Cauchy problem for linear hyperbolic and pseudoparabolic fourth-order equations with variable coefficients. Solvability of the conjugation problem was obtained by its equivalent reduction to the solvability of the system of four linear Fredholm integral equations of the second kind. The theorems of existence and uniqueness of solutions of the conjugation problem for hyperbolic and pseudoparabolic fourth-order equations were proved.

### Key words:

Conjugate problem, hyperbolic and pseudoparabolic equations, boundary and initial conditions, the Riemann functions, the Volterra and Fredholm equations.

### REFERENCES

1. Samarsky A.A., Vabishchevich P.N., Lemeshevsky S.V., Matus P.P. Raznostnye skhemy dlya zadachi o sopryazhenii uravneny giperbolicheskogo i parabolicheskogo tipov [Difference schemes for the problem of conjugating hyperbolic and parabolic type equations]. *Sibirskiy matematicheskiy zhurnal*, 1998, vol. 39, no. 4, pp. 954–962.
2. Nakhushcheva V.A. Ob odnoy matematicheskoy modeli teploobmena v smeshannoy srede s idealnym kontaktom [On a mathematical heat transfer model in a mixed environment with perfect contact]. *Vestnik SamGTU. Ser. FMN*, 2006, Iss. 42, pp. 11–34.
3. Nakhushchev A.M. *Uravneniya matematicheskoy biologii* [Equations of mathematical biology]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1995. 301 p.
4. Dzhuraev T.D., Sopuev A. *K teorii differentsialnykh uravneniy v chastnykh proizvodnykh chetvertogo poryadka* [To the theory of the differential equations in private derivatives of the fourth order]. Tashkent, Fan Publ., 2000. 144 p.
5. Kozhobekov K.G. O razreshimosti zadach sopryazheniy dlya nelineynykh uravneniy v chastnykh proizvodnykh tretogo poryadka [On conjugation problem solvability for nonlinear partial differential equations of the third order]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 2, pp. 9–12.
6. Sopuev A., Arkabaev N.K. Nelokalnaya zadacha s integralnym usloviyem dlya nelineynogo uravneniya v chastnykh proizvodnykh tretogo poryadka [Nonlocal problem with integral condition for linear partial differential equation of the third order]. *Vestnik KRSU*, 2010, vol. 10, pp. 150–153.
7. Sopuev A., Arkabaev N.K. Kraevye zadachi dlya smeshannogo giperbolicheskogo uravneniya tretogo poryadka s dvumiy lineiyimi izmeneniy tipa [Boundary value problems for a mixed parabolic-hyperbolic equation of the third order with two lines of type changing]. *Vestnik KNU*, 2011, Spec. Iss., pp. 136–138.
8. Sopuev A., Arkabaev N.K. Problems of interface for linear pseudoparabolic equations of the third order. *Book of Abstracts. The 4<sup>th</sup> congress of the TWMS*. Baku, Azerbaijan, 1–3 July, 2011. pp. 276.
9. Moldoyarov U.D. Nelokalnaya zadacha s integralnymi usloviyami dlya nelineynogo uravneniya v chastnykh proizvodnykh tretogo poryadka [Nonlocal problem with integral conditions for non-linear partial differential equation of the third order]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 2, pp. 14–17.
10. Saadalov T.Y. Kraevye zadachi dlya smeshannogo pseudoparabol-giperbolicheskogo uravneniya chetvertogo poryadka s nelokalnym usloviem sopryazheniya v krivolinyennoy treugolnike [Boundary tasks for the mixed pseudoparabol-hyperbolic equation of the fourth order with non local condition of interface in a curvilinear triangle]. *Vestnik Oshskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya estestvennykh nauk*, 2012, no. 3, pp. 114–121.
11. Sopuev A., Satarov A.E. Zadachi sopryazheniy dlya uravneniy v chastnykh proizvodnykh chetvertogo poryadka s razlichnymi deystvitelnymi kharakteristikami [Conjugation problem for partial differential equations of the fourth order with different valid characteristics]. *Issledovaniya po integro-differentsialnym uravneniyam* [Studying in integro-differential equations]. Biskkek, Ilim, 2012. Iss. 44, pp. 124–133.
12. Sopuev A., Saadalov T.Y. Kraevye zadachi dlya smeshannogo pseudoparabol-giperbolicheskogo uravneniya chetvertogo poryadka s nelokalnym usloviem sopryazheniya v krivolinyennoy oblasti [Boundary tasks for the mixed pseudoparabol-hyperbolic equation of the fourth order with non local condition of interface in curvilinear area]. *Vestnik Oshskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya estestvennykh nauk*, 2012, no. 3, pp. 122–128.
13. Sopuev A., Satarov A.E. Zadacha sopryazheniya dlya nelineynykh uravneniy v chastnykh proizvodnykh chetvertogo poryadka

- [Conjugation problem for nonlinear partial differential equations of the fourth order]. *Vestnik OshGU. Seriya estestvennykh nauk*, 2012, no. 3, pp. 128–138.
14. Sopuev A., Arkabaev N.K. Zadachi sopryazheniya dlya lineynykh psevdoparabolicheskikh uravneniy tretogo poryadka [Conjugation problems for pseudo-parabolic linear equations of the third order]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*, 2013, no. 1 (21), pp. 16–23.
  15. Sopuev A., Satarov A.E. Ob odnoy zadache sopryazheniya dlya nelineynykh uravneniy giperbolicheskogo tipa chetvertogo poryadka [On a conjugate problem for nonlinear hyperbolic type equations of the fourth order]. *Vestnik Oshskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya estestvennykh nauk*, 2013, no. 1, pp. 252–259.
  16. Sopuev A., Saadalov T.Y. O zadache sopryazheniya dlya giperbolicheskikh uravneniy chetvertogo poryadka [On conjugation problem for hyperbolic equations of the fourth order]. *Sovremennye problemy differentsialnykh uravneniy i ikh problemy. Tezisy dokladov Respublikanskoy nauchnoy konferentsii s uchastiem uchenykh iz stran SNG* [Modern problems of differential equations and their problems. Proc. of the Republic conference with participation of the scientists from CIS countries]. Tashkent, 21–23 November 2013, NUU im. M. Ulukbeka 2013. pp. 105–106.
  17. Smirnov M.M. *Uravneniya smeshannogo tipa* [The mixed type equations]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 296 p.
  18. Sopuev A., Saadalov T.Y. Ob odnoy zadache sopryazheniya dlya psevdoparabolo-giperbolicheskogo uravneniya chetvertogo poryadka [On a conjugate problem for psevdoparabolo-hyperbolic equation of the fourth order]. *Aktualnye problemy teorii upravleniya, topologii i operatornykh uravneniy. Tezisy dokladov vtoroi mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 20-letiyu KRSU i 100-letiyu professora Ya.V. Bykova* [Urgent problems of control theory, topology and operator equations. Proc. of the 2<sup>d</sup> International conference devoted to twentieth anniversary of KRSU and 100 anniversary of professor Ya.V. Bykov]. Bishkek, 5–7 September 2013, KRSU. pp. 114–115.
  19. Sopuev A., Saadalov T.Y. Kraevye zadachi dlya smeshannogo psevdoparabolo-giperbolicheskogo uravneniya chetvertogo poryadka s nelokalnym uslovie sopryazheniya [Boundary tasks for the mixed psevdoparabolo-hyperbolic equation of the fourth order with non local condition]. *Bulletin of the Osh technological university*, 2012, no. 1, pp. 55–59.
  20. Dzhuraev T.D., Sopuev A., Mamazhanov M. Kraevye zadachi dlya uravneniy parabola-giperbolicheskogo tipa [Boundary tasks for equations of parabolic-hyperbolic type]. Tashkent, Fan Publ., 1986. 220 p.

Received: 24 June 2014.



УДК 621.52+511.52

## Д-АНАЛОГ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОБОБЩЕННОЙ ОБРАТНОЙ МАТРИЦЫ ДРАЗИНА, ОСНОВАННЫЙ НА СКЕЛЕТНОМ РАЗЛОЖЕНИИ МАТРИЦЫ

**Асланян Гамлет Арменович,**

аспирант кафедры информационных технологий и автоматизации Государственного инженерного университета Армении (Политехник), Армения, 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105. E-mail: hamoaslanyan@gmail.com

**Симонян Саргис Оганесович,**

д-р техн. наук, заведующий кафедрой информационных технологий и автоматизации Государственного инженерного университета Армении (Политехник), Армения, 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105. E-mail: ssimonyan@seua.am

Актуальность работы обусловлена широким применением обобщенной обратной матрицы Дразина в теории конечных цепей Маркова, в решении нестационарных линейных систем дифференциальных уравнений, при решении рекуррентных уравнений и задач оптимального управления динамическими системами, при различных вопросах систем автоматического управления и др. **Цель исследования:** разработка алгоритма нахождения матричных дискрет однопараметрической обобщенной обратной матрицы Дразина в области дифференциальных преобразований и восстановления оригинала с помощью обратных Д-преобразований.

**Методы исследования:** теория псевдообратных численных матриц Дразина, теория обобщенных обратных параметрических матриц, скелетное разложение матрицы, прямые и обратные дифференциальные преобразования, линейные преобразования линейного пространства, линейная алгебра, численные расчеты матричных дискрет с использованием программного пакета MATLAB ver. R2011b.

**Результаты:** Представлен достаточно простой численно-аналитический метод определения однопараметрической обобщенной обратной матрицы Дразина, основанный на прямых и обратных дифференциальных преобразованиях, который легко реализуем средствами современных информационных технологий. Иллюстрация этого метода на одном модельном примере вычисления частного случая обобщенной обратной матрицы Дразина – групповой обратной матрицы, показала его высокую вычислительную эффективность и малую погрешность вычислений.

### Ключевые слова:

Однопараметрическая обобщенная обратная матрица Дразина, скелетное разложение матрицы, индекс матрицы, дифференциальные преобразования, информационные технологии.

### Введение

Допустим, имеем однопараметрическую квадратную матрицу  $A(t)$  с размерами  $n \times n$ , рангом  $r$  (заметим, что параметр  $t$  может быть временем, оператором Лапласа  $\left( S \sim \frac{d}{dt} \right)$  или другим параметром), и индекс матрицы равен  $k = \text{index}(A(t))$ , где  $k$  – наименьшее неотрицательное целое число, при котором  $\text{rank}(A^{k+1}(t)) = \text{rank}(A^k(t))$ . Псевдообратной Дразина  $A^D(t)$  к матрице  $A(t)$  называется матрица, удовлетворяющая всем нижеприведенным условиям [1] (по аналогии с числовыми матрицами):

$$A^D(t)A(t)A^D(t) = A^D(t),$$

$$A(t)A^D(t) = A^D(t)A(t),$$

$$A^{k+1}(t)A^D(t) = A^k(t).$$

В частном случае, когда  $\text{index}(A(t))=1$ , обобщенную обратную Дразина назовем групповой обратной  $A^*(t)$  [1] (также по аналогии с числовыми матрицами).

Обобщенные обратные матрицы Мура-Пенроуза [1–3] достаточно хорошо изучены [4–7] и нашли широкое применение при решении задач оптимального управления [8, 9], некорректных задач

[10], матричных уравнений [11], при сингулярном разложении [12] и др. Обобщенная обратная матрица Дразина и групповая обратная, с другой стороны, нашли применение в теории типа конечных цепей Маркова [13], в решении нестационарных линейных систем дифференциальных уравнений [14], в модели населения Лесли и ее обратной проекции [1, 15], а также при решении рекуррентных уравнений [1, 16] и др.

В работе [1] доказана теорема об определении псевдообратной матрицы Дразина с помощью серий скелетных разложений исходной матрицы. Распространив эту теорему на однопараметрические матрицы, получим:

$$A(t) = B_1(t)C_1(t), C_1(t)B_1(t) = B_2(t)C_2(t), \dots,$$

где  $B_i(t)C_i(t)$  – скелетное разложение матрицы  $C_{i-1}(t)B_{i-1}(t)$ ,  $i=1,2,\dots$ . В этой серии при некоторой  $i=k$  либо  $[C_k(t)B_k(t)]^{-1}$  будет определена, либо  $B_k(t)C_k(t)=0$ , при которой  $\nexists [C_k(t)B_k(t)]^{-1}$  [1]. В этом случае об индексе матрицы можно утверждать, что

$$\text{index}(A(t)) = \begin{cases} k, & \text{если } \exists [C_k(t)B_k(t)]^{-1}, \\ k+1, & \text{если } C_k(t)B_k(t) = 0 \Leftrightarrow \nexists [C_k(t)B_k(t)]^{-1}. \end{cases}$$

При этом обобщенная обратная Дразина представляется в следующем виде:

$$A^D(t) = \begin{cases} B_1(t)B_2(t) \cdots B_k(t)[C_k(t)B_k(t)]^{-(k+1)} \times \\ \times C_k(t)C_{k-1}(t) \cdots C_1(t), & \text{если } \exists [C_k(t)B_k(t)]^{-1}, \\ 0, & \text{если } C_k(t)B_k(t) = 0 \Leftrightarrow \nexists [C_k(t)B_k(t)]^{-1}. \end{cases}$$

Отсюда следует, что [1]

$$A^D(t) = A^{n-1}(t)B(t)[C(t)B(t)]^{-2}C(t) = B(t)[C(t)B(t)]^{-2}C(t)A^{n-1}(t),$$

где  $A(t) \neq 0$ , а  $A^n(t) = B(t)C(t)$  – скелетное разложение матрицы  $A^n(t)$ .

В частном случае, когда  $\text{index}(A(t)) = 1$  и  $A(t) = B(t)C(t)$  является скелетным разложением  $A(t)$ , групповая обратная  $A^\#(t)$  равна [1]

$$A^\#(t) = A^D(t) = B(t)[C(t)B(t)]^{-2}C(t). \quad (1)$$

### Математический аппарат

Допустим, что  $A(t)$  – матрица с аналитическими элементами. Представим алгоритм вычисления скелетного разложения  $A^n(t)$ :

$$A^n(t) = B(t)C(t),$$

где  $B(t)$  – нижнетреугольная матрица с размерами  $n \times r$ , а  $C(t)$  – верхнетреугольная матрица с размерами  $r \times n$ .

Выберем линейно независимых столбцов матрицы  $A(t)$  и составим матрицу  $B(t)$ . В этом случае столбцы матрицы  $C(t)$  вычисляются следующим образом:

$$\downarrow c_j(t) = \overline{B(t)} \downarrow a^n_j(t), \quad j = \overline{1, n},$$

где  $\downarrow c_j(t)$  и  $\downarrow a^n_j(t)$  –  $j$ -е столбцы матриц  $C(t)$  и  $A^n(t)$  соответственно, а  $\overline{B(t)}$  – обобщенная обратная матрица к  $B(t)$  (при классификации обобщенных обратных матриц, представленной в работе [17], такая матрица называется  $(Q)$ -обратной).

Тогда алгоритм вычисления обобщенной обратной матрицы Дразина можно представить последовательностью следующих операций:

Шаг 1. Вычисляется  $n$ -ая степень матрицы  $A(t)$ , т. е.  $A^n(t)$ .

Шаг 2. Вычисляется  $(Q)$ -обратная матрица  $\overline{B(t)}$  к матрице  $B(t)$  с помощью алгоритма, представленного в работе [17].

Шаг 3. Вычисляется матрица  $C(t)$  с помощью соотношений

$$\downarrow c_j(t) = \overline{B(t)} \downarrow a^n_j(t), \quad \forall j = \overline{1, n},$$

где  $\downarrow c_j(t)$  и  $\downarrow a^n_j(t)$  –  $j$ -е столбцы матриц  $C(t)$  и  $A^n(t)$  соответственно.

Шаг 4. Обозначив  $X(t) = C(t)B(t)$ , вычисляется обратная матрица  $X^{-1}(t)$ .

Шаг 5. Вычисляется обобщенная обратная матрица Дразина  $A^D(t)$  в виде разложения

$$A^D(t) = A^{n-1}(t)B(t)X^{-2}(t)C(t).$$

Теперь рассмотрим Д-аналог метода определения обобщенной обратной матрицы Дразина. С учетом приведенных соотношений алгоритм определения обобщенной обратной матрицы Дразина в области дифференциальных преобразований [18] будет выглядеть следующим образом:

Шаг 1. Вычисляются матричные дискреты

$$A(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{\partial^K A(t)}{\partial t^K} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad \overline{\square}$$

$$\overline{\square} A(t) = \mathfrak{N}_1(t, t_v, H, A(K)),$$

$$B(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{\partial^K B(t)}{\partial t^K} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad \overline{\square}$$

$$\overline{\square} B(t) = \mathfrak{N}_1(t, t_v, H, B(K)),$$

$$A^n(K) = A^{n-1}(K) * A(K) = \sum_{l=0}^K A^{n-1}(l) A(K-l),$$

где  $K = \overline{0, \infty}$  – целочисленный аргумент;  $A(K)$ ,  $B(K)$  и  $A^n(K)$ ,  $K = \overline{0, \infty}$  – матричные дискретные матричных оригиналов  $A(t)$ ,  $B(t)$  и  $A^n(t)$  (прямые дифференциальные преобразования),  $H$  – масштабный коэффициент;  $t_v$  – центр аппроксимации,  $\mathfrak{N}_1(t, t_v, H, A(K))$ ,  $\mathfrak{N}_2(t, t_v, H, B(K))$  – обратные дифференциальные преобразования, восстанавливающие оригиналы – матрицы  $A(t)$  и  $B(t)$  соответственно, символ  $*$  – знак Т-умножения (свертки), а символ  $\overline{\square}$  – знак перехода из области оригиналов в область Д-изображений и наоборот [18].

Шаг 2. Вычисляются матричные дискретные  $\overline{B(K)}$ ,  $K = \overline{0, \infty}$  с помощью алгоритма, представленного в работе [17].

Шаг 3. Вычисляются матричные дискретные  $C(K)$ , для которых

$$\downarrow c_j(K) = \overline{B(K)} * \downarrow a^n_j(K) = \sum_{l=0}^K \overline{B(l)} \downarrow a^n_j(K-l),$$

$$K = \overline{0, \infty}, \quad \forall j = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где  $\downarrow c_j(K)$  и  $\downarrow a^n_j(K)$  –  $j$ -е столбцы матричных дискрет  $C(K)$  и  $A^n(K)$  соответственно.

Шаг 4. Обозначив  $X(t) = C(t)B(t)$ , вычисляются матричные дискретные  $X^{(-1)}(K)$  с помощью алгоритма, предложенного в работе [19] (заметим, что  $X^{(-1)}(K)$  –  $K$ -я матричная дискрета обратной матрицы  $X^{-1}(t)$ , а не обратная матрица  $K$ -й матричной дискреты  $X(K)$ ).

Шаг 5. Вычисляются матричные дискретные  $A^D(K)$  обобщенной обратной матрицы Дразина  $A^D(t)$ :

$$A^D(K) = A^{n-1}(K) * B(K) * X^{(-2)}(K) * C(K). \quad (3)$$

Далее, имея матричные дискретные (3), в соответствии с некоторым обратным дифференциальным преобразованием  $\mathfrak{N}(\bullet)$  восстанавливается оригинал – обобщенная обратная матрица Дразина  $A^D(t)$ .

**Пример.** Допустим, имеем однопараметрическую матрицу

$$A(t) = \begin{bmatrix} t & (t^2 - 2) & (3t - t^2) \\ -t & 2t & -3t \\ 0 & (t^2 + 2t - 2) & -t^2 \end{bmatrix}_{3 \times 3}.$$

Можно легко убедиться, что ранг матрицы  $A(t)$  равен 2, ибо каждый элемент ее третьей строки равен сумме соответствующих элементов первых двух строк, а также, что индекс матрицы  $k = \text{index}(A(t)) = 1$ , так как  $\text{rank}(A^2(t)) = \text{rank}(A(t)) = 2$ . Следовательно, вычисляется групповая матрица  $A^D(t) = A^*(t)$  с помощью упрощенного соотношения (1). Выбирается матрица  $B(t)$ :

$$B(t) = \begin{bmatrix} t & (t^2 - 2) \\ -t & 2t \\ 0 & (t^2 + 2t - 2) \end{bmatrix}.$$

Вычисляются следующие матричные дискреты при  $t_v = -1, H=1, K=10$ :

$$A(0) = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -4 \\ 1 & -2 & 3 \\ 0 & -3 & -1 \end{bmatrix}, A(1) = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 5 \\ -1 & 2 & -3 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix},$$

$$A(2) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}, A(K) = [0], K = \overline{3, \infty};$$

$$B(0) = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & -2 \\ 0 & -3 \end{bmatrix}, B(1) = \begin{bmatrix} 1 & -2 \\ -1 & 2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B(2) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B(K) = [0], K = \overline{3, \infty}.$$

С помощью алгоритма, представленного в работе [17], вычисляются матричные дискреты  $\bar{B}(K)$  ( $Q$ )-обратной матрицы  $\bar{B}(t)$ :

$$\bar{B}(0) = \begin{bmatrix} -0,667 & 0,333 & 0 \\ -0,333 & -0,333 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{B}(2) = \begin{bmatrix} -0,222 & 0,778 & 0 \\ -0,111 & -0,111 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{B}(4) = \begin{bmatrix} -0,074 & 0,926 & 0 \\ -0,037 & -0,037 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{B}(6) = \begin{bmatrix} -0,025 & 0,975 & 0 \\ -0,012 & -0,012 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{B}(8) = \begin{bmatrix} -0,008 & 0,992 & 0 \\ -0,004 & -0,004 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{B}(10) = \begin{bmatrix} -0,027 & 0,997 & 0 \\ -0,001 & -0,001 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{B}(K) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \text{ при } K = 1, 3, 5, 7, 9.$$

Далее вычисляются матричные дискреты  $C(K)$  с помощью (2) (представлены только первые 4 матричные дискреты):

$$C(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 3,667 \\ 0 & 1 & 0,333 \end{bmatrix}, C(1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1,333 \\ 0 & 0 & -0,667 \end{bmatrix},$$

$$C(2) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0,889 \\ 0 & 0 & 0,444 \end{bmatrix}, C(3) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -0,444 \\ 0 & 0 & -0,222 \end{bmatrix}.$$

Согласно шагу 4, вычисляются матричные дискреты  $X^{(-1)}(K)$  (представлены только первые 4 матричные дискреты):

$$X^{(-1)}(0) = \begin{bmatrix} -0,2 & 0,8 \\ -0,067 & -0,067 \end{bmatrix},$$

$$X^{(-1)}(1) = \begin{bmatrix} -0,013 & 0,987 \\ -0,027 & -0,027 \end{bmatrix},$$

$$X^{(-1)}(2) = \begin{bmatrix} -0,019 & 0,981 \\ -0,015 & -0,015 \end{bmatrix},$$

$$X^{(-1)}(3) = \begin{bmatrix} -0,008 & 0,992 \\ -0,008 & -0,008 \end{bmatrix}.$$

Вычисляются матричные дискреты  $A^D(K)$  обобщенной обратной матрицы Дразина  $A^D(t)$  с помощью свертки (3) (представлены только первые 4 матричные дискреты):

$$A^D(0) = \begin{bmatrix} -0,0044 & 0,2622 & 0,0711 \\ -0,04889 & -0,1156 & -0,2178 \\ -0,05333 & 0,1467 & -0,1467 \end{bmatrix},$$

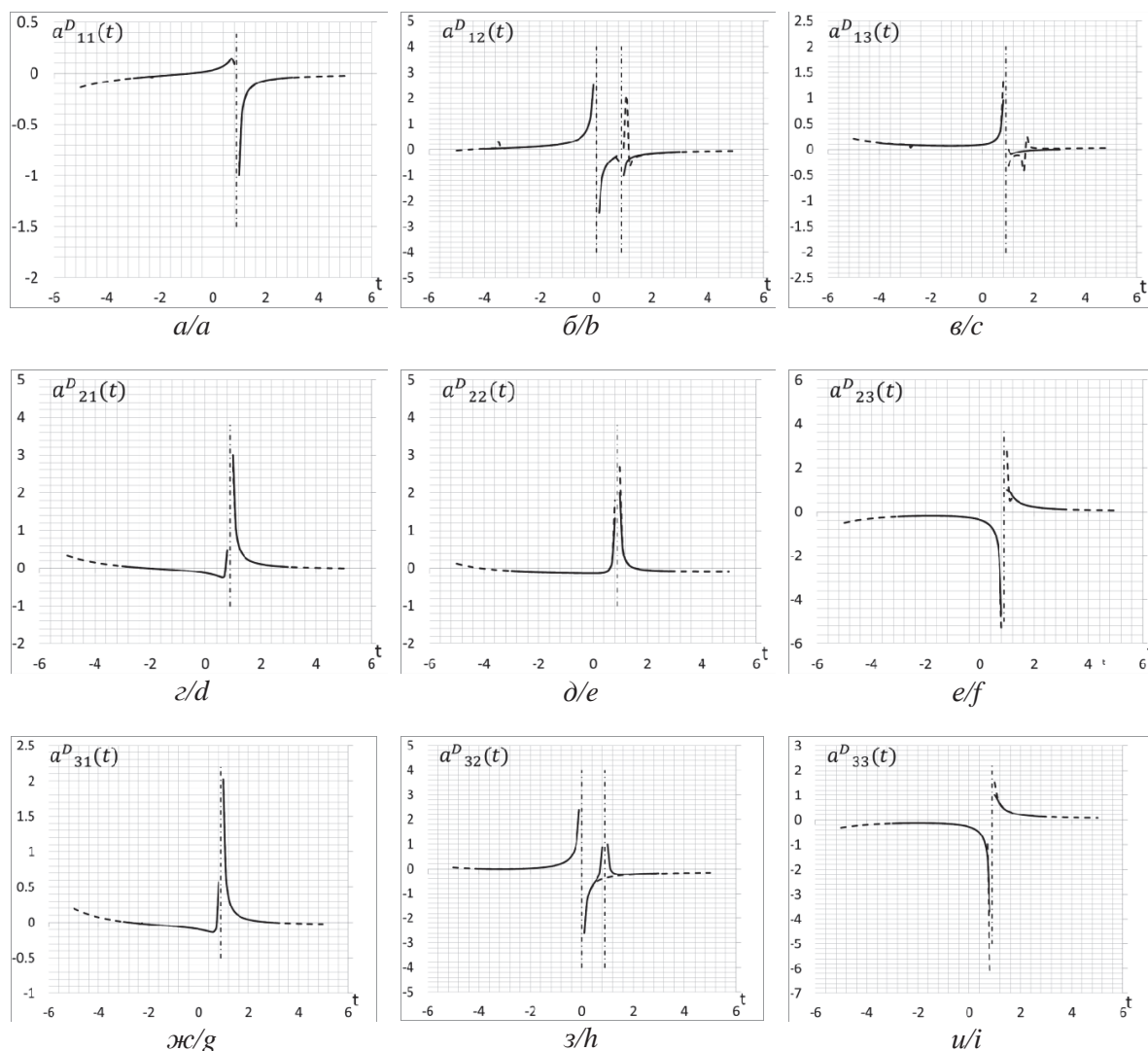
$$A^D(1) = \begin{bmatrix} 0,0231 & 0,2631 & 0,0035 \\ -0,0524 & -0,0124 & -0,0542 \\ -0,0293 & 0,2507 & -0,0506 \end{bmatrix},$$

$$A^D(2) = \begin{bmatrix} 0,0527 & 0,2524 & 0,0098 \\ -0,0095 & 0,002 & -0,0509 \\ -0,0043 & 0,2544 & -0,041 \end{bmatrix},$$

$$A^D(3) = \begin{bmatrix} 0,0384 & 0,252 & 0,004 \\ -0,008 & -0,0008 & -0,0232 \\ -0,0042 & 0,2512 & -0,0192 \end{bmatrix}.$$

Не вдаваясь в подробности, приведем окончательные результаты: на рисунке (а-и) представлены графики элементов обобщенной обратной матрицы Дразина  $A^D(t)$  и оригинала, полученного с учетом вышеприведенных матричных дискрет с помощью дифференциально-падеевских преобразований [18] при  $t_v = -1, H=1, K=0,10$ . На всех рисунках сплошные линии соответствуют аналитическому решению, а пунктирные – ДП-аналогу.

**Замечание.** Как видно из рисунка (а-и), все элементы матрицы Дразина обладают горизонтальными и вертикальными асимптотами. Картина вертикальных асимптот обычно наблюдается при определении различных однопараметрических обобщенных обратных матриц из за вырожденно-



**Рисунок.** а-и) Временные зависимости элементов  $a_{ij}^D(t)$  при  $t_v=-1, H=1, K=\overline{0,10}$

**Figure.** а-и) Time dependency of elements  $a_{ij}^D(t)$  at  $t_v=-1, H=1, K=\overline{0,10}$

сти некоторых матриц, входящих в их аналитические выражения. В конкретном случае  $\det(X(t))=0$ ,  $X(t)=C(t)B(t)$ , точки  $t=-4+2\sqrt{6}$  и  $t=-4-2\sqrt{6}$  являются точками вертикальных асимптот для всех элементов матрицы  $A^D(t)$ , а точка  $t=0$  – точкой дополнительных вертикальных асимптот для элементов  $a_{12}^D(t)$  и  $a_{32}^D(t)$  матрицы  $A^D(t)$ . Поэтому для обеспечения большей точности вычислений при восстановлении соответствующих оригиналов-элементов матрицы  $A^D(t)$  были использованы обратные дифференциально-падеевские преобразования [18], положительные качества которых в рассматриваемом контексте достаточно хорошо известны [7]. Что же касается окончательного аналитического

представления  $A^D(t)$ , здесь оно не приведено из-за его достаточно высокой сложности (громоздкости).

### Заключение

Предложен численно-аналитический метод определения однопараметрических обобщенных обратных матриц Дразина, который легко реализуем средствами современных информационных технологий [20, 21]. Представленные сравнительные характеристики решения одного модельного примера показывают, что метод обладает высокой вычислительной эффективностью и малой погрешностью вычислений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Campbell S.L., Meyer C.D. Generalized Inverses of Linear Transformations. – Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 2008. – 292 p.
- Ben-Israel A., Greville T.N.E. Generalized Inverses: Theory and Applications. – NYC: Springer, 2003. – 435 p.
- Светлаков А.А. Обобщенные обратные матрицы: некоторые вопросы теории и применения в задачах автоматизации управления процессами. – Томск: Изд-во НТЛ, 2003. – 388 с.
- Универсальный метод определения параметрических обобщенных обратных матриц / С.О. Симонян, А.Г. Аветисян, А.С. Симонян, В.Р. Авиный // Вестник ГИУА. Сер. Информационные технологии, электроника, радиотехника. – 2012. – Вып. 15. – № 2. – С. 9–19.
- Бадалян Л.А. Разработка методов определения псевдообратных нестационарных матриц и автоматизация вычислительных процедур: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Ереван, 2007. – 24 с.
- Симонян С.О. Параллельные вычислительные методы определения параметрических обобщенных обратных матриц // Известия Томского политехнического университета. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2013. – Т. 323. – № 5. – С. 10–15.
- Симонян С.О., Аветисян А.Г. Прикладная теория дифференциальных преобразований. – Ереван: Чартарагет, 2010. – 361 с.
- Lewis F.L., Vrabie D., Syrmos V.L. Optimal Control. 3<sup>rd</sup> edition. – Hoboken: Wiley, 2012. – 552 p.
- Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. – М.: Наука, 1983. – 392 с.
- Беклемишев Д.В. Дополнительные главы линейной алгебры. – М.: Наука, 1983. – 335 с.
- Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – М.: Физматлит, 2010. – 560 с.
- Yanai H., Takeuchi K., Takane Y. Projection Matrices, Generalized Inverse Matrices, and Singular Value Decomposition. – NYC: Springer, 2011. – 236 p.
- Markov Chains: Models, Algorithms and Applications. 2<sup>nd</sup> edition / W.K. Ching, X. Huang, M.K. Ng, T.K. Siu. – NYC: Springer, 2013. – 243 p.
- Schroers B.J. Ordinary Differential Equations: A Practical Guide. – Cambridge: Cambridge University Press, 2011. – 128 p.
- Williams G. Linear Algebra with Applications. 7<sup>th</sup> edition. – Burlington: Jones & Bartlett Learning, 2009. – 532 p.
- Haghighi A.M., Mishev D.P. Difference and Differential Equations with Applications in Queuing Theory. – Hoboken: Wiley, 2013. – 424 p.
- Симонян С.О., Аслаян Г.А. Метод определения параметрических (В)- и (Q)-обобщенно-обратных матриц // Вестник ГИУА. Серия Информационные технологии, электроника, радиотехника. – 2013. – Вып. 16. – № 2. – С. 33–42.
- Пухов Г.Е. Дифференциальные преобразования функций и уравнений. – Киев: Наукова думка, 1984. – 420 с.
- Симонян С.О., Тамазян М.Д. Д-аналог  $L(t)U(t)$  разложения для обращения неавтономных матриц // Вестник ГИУА. Серия Информационные технологии, электроника, радиотехника. – 2012. – Вып. 15. – № 1. – С. 35–41.
- Stroustrup B. The C++ Programming Language. 4<sup>th</sup> edition. – Boston: Addison-Wesley Professional, 2013. – 1368 p.
- The MathWorks, Inc., MATLAB The language of technical programming. Using MATLAB Graphics, Version 7.

Поступила 21.06.2014 г.

UDC 621.52+511.52

## D-ANALOGUE OF AN ALGORITHM FOR DETERMINING SINGLE-PARAMETRIC DRAZIN GENERALIZED INVERSE MATRIX BASED ON MATRIX FULL RANK FACTORIZATION

Hamlet A. Aslanyan,

State Engineering University of Armenia (Polytechnic), 105, Teryan street, Yerevan, 0009, Armenia. E-mail: hamoaslanyan@gmail.com

Sargis H. Simonyan,

Dr. Sc., State Engineering University of Armenia (Polytechnic), 105, Teryan street, Yerevan, 0009, Armenia. E-mail: ssimonyan@seua.am

*The urgency of the research is caused by the wide application of Drazin generalized inverse matrix in the theory of finite Markov chains, in solving linear shifting system of differential equations, difference equations, problems of optimal control of dynamic systems; in several aspects of automated control systems, etc.*

**The main aim of the study** is to develop an algorithm for finding matrix discretizes of single-parametric Drazin generalized inverse matrix in the field of differential transformations and restoring the original using reverse D-transformations.

**The methods used in the study:** theory of numerical Drazin pseudoinverse matrices, theory of generalized parametric inverse matrices, matrix full rank factorization, direct and reverse differential transformations, linear transformations of vector space, linear algebra, numerical calculations of matrix discretizes using MATLAB ver. R2011b software package.

**The results:** The paper introduces rather simple numerical-analytical method for determining Drazin single-parametric generalized inverse matrix which can be easily implemented by means of contemporary information technologies. The illustration of the method by a single sample example for determining a special case of Drazin generalized inverse matrix – group inverse matrix, proved its computational efficiency and low computational error ratio.

### Key words:

Single-parametric Drazin generalized inverse matrix, full rank factorization of the matrix, differential transformations, information technologies.



## REFERENCES

1. Campbell S.L., Meyer C.D. *Generalized Inverses of Linear Transformations*. Philadelphia, Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 2008. 292 p.
2. Ben-Israel A., Greville T.N.E. *Generalized Inverses: Theory and Applications*. NYC, Springer, 2003. 435 p.
3. Svetlakov A.A. *Obobshchennye obratnye matritsy: nekotorye vo-prosy teorii i primeneniya v zadachakh avtomatizatsii upravleniya protsessami* [Generalized inverse matrices: several aspects of the theory and its application in problems of process control automation]. Tomsk, NTL Publ., 2003. 388 p.
4. Simonyan S.H., Avetisyan A.G., Simonyan A.S., Avinyan V.R. Universalny metod opredeleniya parametricheskikh obobshchennykh obratnykh matrits [Universal Method for Determining Moore-Penrouse's Parametric Generalized Inverse Matrices]. *Vestnik GIUA. Seriya informatsionnye tekhnologii, elektronika, radiotekhnika – Proceedings of State Engineering University of Armenia. Series Information Technologies, Electronics, Radio Engineering*, 2012, Iss. 15, no. 2, pp. 9–19.
5. Badalyan L.A. *Razrabotka metodov opredeleniya pseudoobratnykh nestatsionarnykh matrits i avtomatizatsiya vychislitelnykh protsedur. Avtoreferat diss. kand. tekhn. nauk* [Development of methods to determine pseudoinverse nonsteady matrices and computer procedure automation. Cand. Diss. Abstract]. Yerevan, 2007. 24 p.
6. Simonyan S.H. Parallelnye vychislitelnye metody opredeleniya parametricheskikh obobshchennykh obratnykh matrits [Parallel Computing Methods to Determine Parametric Generalized Inverse Matrices]. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 5, pp. 10–15
7. Simonyan S.H., Avetisyan A.G. *Prikladnaya teoriya differentsialnykh preobrazovaniy* [Applied Theory of Differential Transforms]. Yerevan, Chartaraget Publ., 2010. 361 p.
8. Lewis F.L., Vrabie D., Syrmos V.L. *Optimal Control*. Hoboken, Wiley, 2012. 3<sup>rd</sup> ed., 552 p.
9. Pontryagin L.S., Boltyanskiy V.G., Gamkrelidze R.V., Mishchenko E.F. *Matematicheskaya teoriya optimalnykh protsessov* [Mathematical Theory of Optimal Processes]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 392 p.
10. Beklemishev D.V. *Dopolnitelnye glavy lineynoy algebry* [Additional Chapters of Linear Algebra]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 335 p.
11. Gantmakher F.R. *Teoriya Matrits* [Matrix Theory]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 560 p.
12. Yanai H., Takeuchi K., Takane Y. *Projection Matrices, Generalized Inverse Matrices, and Singular Value Decomposition*. NYC, Springer, 2011. 236 p.
13. Ching W.K., Huang X., Ng M.K., Siu T.K. *Markov Chains: Models, Algorithms and Applications*. NYC, Springer, 2013. 2<sup>nd</sup> ed., 243 p.
14. Schroers B.J. *Ordinary Differential Equations: A Practical Guide*. Cambridge, Cambridge University Press, 2011. 128 p.
15. Williams G. *Linear Algebra with Applications*. Burlington, Jones & Bartlett Learning, 2009. 7<sup>th</sup> ed., 532 p.
16. Haghighi A.M., Mishev D.P. *Difference and Differential Equations with Applications in Queueing Theory*. Hoboken, Wiley, 2013. 424 p.
17. Simonyan S.H., Aslanyan H.A. Metod opredeleniya parametricheskikh (B)- i (Q)-obobshchennno-obratnykh matrits [Method For Determining (B)- and (Q)- Types of Parametric Generalized Inverses]. *Vestnik GIUA. Seriya informatsionnye tekhnologii, elektronika, radiotekhnika – Proceedings of State Engineering University of Armenia. Series Information Technologies, Electronics, Radio Engineering*, 2013, Iss. 16, no. 2, pp. 33–42.
18. Pukhov G.E. *Differentsialnye preobrazovaniya funktsiy i uravneniy* [Differential transformations of functions and equations]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1984. 420 p.
19. Simonyan S.H., Tamazyan M.J. D-analog  $L(t)U(t)$  razlozheniya dlya obrashcheniya neavtonomnykh matrits [D-Analogue of  $L(t)U(t)$  for Inversion of Nonautonomous Matrices]. *Vestnik GIUA. Seriya informatsionnye tekhnologii, elektronika, radiotekhnika – Proceedings of State Engineering University of Armenia. Series Information Technologies, Electronics, Radio Engineering*, 2012, Iss. 15, no. 1, pp. 35–41.
20. Stroustrup B. *The C++ Programming Language*. Boston, Addison-Wesley Professional, 2013. 4<sup>th</sup> ed., 1368 p.
21. *The MathWorks, Inc., MATLAB The language of technical programming. Using MATLAB Graphics, Version 7*.

Received: 21 June 2014.

УДК 519.2

## ОЦЕНКА СПЕКТРА МОЩНОСТИ СТАЦИОНАРНОГО СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА СПЛАЙНОМ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

**Устинова Ирина Георгиевна,**

канд. техн. наук, доцент каф. высшей математики физико-технического института ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: igu@sibmail.com

**Лазарева Елена Геннадьевна,**

канд. физ.-мат. наук, доцент каф. общей математики ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36. E-mail: lazareva-e-g73@mail.ru

**Подберезина Елена Ивановна,**

канд. физ.-мат. наук, доцент каф. высшей математики физико-технического института ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: pei@tpu.ru

Актуальность работы обусловлена тем, что спектр мощности, так же как и функция корреляции, является одной из важнейших характеристик второго порядка случайного процесса, так как он показывает, какого рода гармоники преобладают в данном процессе, какова структура процесса; позволяет получить оценки спектрального состава изучаемых полезных сигналов и помех. По спектрам возможен синтез (восстановление) сигнала, а также построение линейных, в том числе оптимальных фильтров, а также получение оценки погрешности линейной фильтрации.

**Цель работы:** Оценка спектра мощности стационарного случайного процесса в виде сплайна первого порядка при следующих схемах измерений: когда в каждый момент времени производится ровно одно измерение и когда в каждый момент времени производится случайное число измерений. Исследование статистических характеристик полученных оценок.

**Методы исследования:** Для расчетов использованы методы теории вероятностей и математической статистики.

**Результаты:** Получена несмещенная оценка спектра мощности в виде сплайна первого порядка в двух схемах измерения: в каждый момент времени производится ровно одно измерение; в каждый момент времени производится случайное число измерений.

Показано, что дисперсия оценок асимптотически ведет себя как  $\frac{1}{T}$ , где  $T$  – время наблюдения.

### Ключевые слова:

Спектр мощности, корреляционная функция, сплайн первого порядка, оценки параметров, статистические свойства оценок.

### Введение

Цифровой спектральный анализ является мощным современным методом обработки сигналов [1]. В его основании лежит оценка и изучение спектра мощности сигнала, принимаемого за некоторый случайный процесс [2]. Функция плотности спектра мощности определяет распределение дисперсии случайного процесса по частотам [3].

Для нахождения оценки функции плотности спектра существуют следующие основные способы:

1. Определение спектральной плотности  $S(\omega)$  по заданной корреляционной функции  $R[\tau]$ . Вы-

числение  $S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} R[\tau] \cos(\omega\tau) d\tau$  затруд-

нительно, ибо этот интеграл не всегда вычисляется в элементарных функциях, и корреляционная функция известна, как правило, на дискретном множестве переменной  $\tau$  [4–8].

2. Оценивание спектральной плотности с помощью процедур, использующих быстрое преобразование Фурье. Такой подход к спектральному анализу эффективен и, как правило, обеспечивает получение приемлемых результатов. Однако у этого подхода есть существенное ограничение, а именно ограничение частотного разрешения, т. е. способности различать частотные линии двух и более сигналов [5].
3. К классическим методам оценки спектра мощности относится периодограммный метод, в котором дискретное преобразование Фурье применяется непосредственно к последовательности, полученной дискретизацией реализации случайного процесса. Однако, как показано в [9], периодограмма не является состоятельной оценкой спектра мощности.
4. В работах [10–12] установлено, что существует связь спектра мощности с фрактальными свой-

ствами случайного процесса. Вышеупомянутая связь выражается следующим образом:  

$$S(\omega) = \frac{c}{\omega^{5-2D}},$$
 где  $c$  – скейлинговая константа,

зависящая от амплитуды сигнала;  $D$  – фрактальная размерность, причем эта взаимосвязь носит оценочный характер, ибо она является асимптотическим решением интегрального уравнения [13–16].

5. Если об исследуемом процессе известна некоторая совокупность сведений, позволяющая выбрать приемлемую аппроксимацию процесса, то в этом случае можно получить более точную спектральную оценку, определив предварительно параметры выбранной модели по результатам измерений [6].

Целью данной работы является нахождение оценки спектра мощности стационарного случайного процесса в виде сплайна первого порядка. Обычно сплайн определяют следующим образом [17–19]. Функцию  $S(t)$ , определенную и непрерывную на отрезке  $[a, b]$ , называют полиномиальным сплайном порядка  $m$  с узлами  $x_i \in \{a = x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_n = b\}$ , если на каждом из отрезков  $[x_{j-1}, x_j]$ ,  $j = \overline{1, n}$   $S(y)$  есть алгебраический полином степени  $m$ .

**Постановка задачи**

Пусть значения процесса  $y(t)$  измеряются на отрезке времени  $[0; T]$ . Моменты измерений  $t_i$ ,  $i = \overline{1, N}$  известны точно. Будем полагать, что  $y_i = y(t_i) + \xi_i$ , где  $\xi_i$  – независимые случайные величины, причем,  $M[\xi_i] = 0$ ,  $D[x_i] = \sigma^2$ ,  $M[y(t_i)] = 0$ ,  $M[y(t_i)y(t_j)] = R[t_j - t_i]$ .

По результатам наблюдений требуется построить оценку  $S(\omega)$  спектра мощности  $S(\omega)$  в виде сплайна первого порядка.

**Построение оценки спектра мощности в виде сплайна первого порядка**

Разобьем всю ось частот  $\omega$  на отрезки  $[0; \Omega]$ ,  $[\Omega; 2\Omega]$ ,  $[2\Omega; 3\Omega]$ , .... Рассмотрим статистику

$$Q = \frac{1}{\pi T} \sum_{i,j; i \neq j} y_i y_j \varphi(t_j - t_i), \quad (1)$$

где для функции  $\varphi(\tau)$  справедливо условие:

$$\varphi(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(\omega) \cos \omega \tau d\omega. \quad (2)$$

Заметим, что

$$M[Q] = \frac{1}{\pi T} \sum_{i,j; i \neq j} R[t_j - t_i] \varphi[t_j - t_i].$$

Можно считать, что имеет место следующее приближение:

$$M[Q] \approx \frac{1}{\pi T} \int_0^T \int_0^T R[u - v] \varphi(u - v) du dv.$$

Сделав замену переменных, получим

$$\begin{aligned} \int_0^T \int_0^T R[u - v] \varphi(u - v) du dv &= \left| \begin{matrix} u - v = z \\ du = dz \end{matrix} \right| = \\ &= \int_0^T dv \int_{-v}^{T-v} R(z) \varphi(z) dz. \end{aligned}$$

Поменяем порядок интегрирования, используя область интегрирования, изображенную на рис. 1.

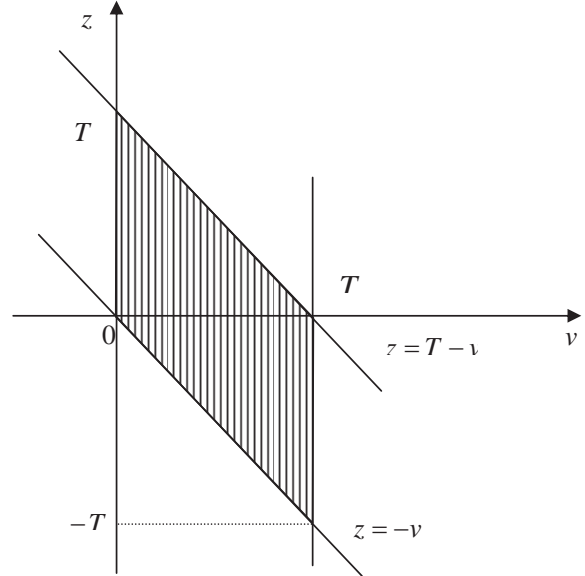


Рис. 1. Область интегрирования

Fig. 1. Integration domain

Это позволит от исходного двойного интеграла перейти к однократному интегралу

$$\begin{aligned} \int_{-T}^0 R[z] \varphi(z) dz \int_{-z}^T dv + \int_0^T R[z] \varphi(z) dz \int_0^{T-z} dv &= \\ = \int_{-T}^0 (T + z) R[z] \varphi(z) dz + \int_0^T (T - z) R[z] \varphi(z) dz &= \\ = T \int_{-T}^T \left( 1 - \frac{|z|}{T} \right) R[z] \varphi(z) dz. \end{aligned}$$

В асимптотическом случае, когда  $T \rightarrow \infty$ , выражение  $\frac{|z|}{T} \rightarrow 0$  и, соответственно,

$$\int_{-T}^T \left( 1 - \frac{|z|}{T} \right) R[z] \varphi(z) dz \approx \int_{-\infty}^{\infty} R[z] \varphi(z) dz.$$

Таким образом

$$M[Q] \approx \frac{T}{\pi T} \int_{-\infty}^{+\infty} R[z] \varphi(z) dz = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R[z] \varphi(z) dz.$$

Воспользовавшись выражением (2), получим

$$\begin{aligned} M[Q] &\approx \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R[\tau] \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(\omega) \cos \omega \tau d\omega d\tau = \\ &= \frac{2}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(\omega) d\omega \int_0^{\infty} R[\tau] \cos \omega \tau d\tau. \end{aligned}$$



Используя известное соотношение Винера-Хинчина [2], окончательно получим

$$M[Q] \approx \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(\omega) S(\omega) d\omega. \quad (3)$$

Для построения оценки  $\hat{S}(\omega)$  спектра мощности  $S(\omega)$  в виде сплайна первого порядка будем полагать, что на отрезке  $[(k-1)\Omega; k\Omega]$  функция  $S(\omega)$  представима в виде

$$S(\omega) = S_{k-1} \frac{k\Omega - \omega}{\Omega} + S_k \frac{\omega - (k-1)\Omega}{\Omega}.$$

Рассмотрим интеграл

$$I = \int_{(k-1)\Omega}^{k\Omega} S(\omega) \left( A \frac{k\Omega - \omega}{\Omega} + B \frac{\omega - (k-1)\Omega}{\Omega} \right) d\omega,$$

вычисление которого приводит к выражению

$$\frac{\Omega}{6} \{ S_{k-1} (2A + B) + S_k (A + 2B) \}.$$

Заметим, что при  $A=2$  и  $B=-1$   $I = \frac{\Omega}{2} S_{k-1}$ . Тогда

$\Phi(\omega)$  выражения (3) будет иметь вид:

$$\Phi(\omega) = \begin{cases} \frac{2}{\Omega} \left( \frac{2 \frac{k\Omega - \omega}{\Omega}}{\Omega} - \frac{\omega - (k-1)\Omega}{\Omega} \right), & \omega \in [(k-1)\Omega; k\Omega], \\ 0, & \omega \notin [(k-1)\Omega; k\Omega]. \end{cases}$$

Используя выражение (2), находим

$$\begin{aligned} \varphi(\tau) &= \int_{(k-1)\Omega}^{k\Omega} \frac{2}{\Omega} \left( 3k - 1 - 3 \frac{\omega}{\Omega} \right) \cos \omega \tau d\omega = \\ &= \begin{cases} \frac{2}{\Omega} \left\{ \frac{3}{\Omega \tau^2} \begin{pmatrix} \cos(k-1)\Omega \tau - \\ -\cos k\Omega \tau \end{pmatrix} - \frac{\sin k\Omega \tau}{\tau} - \frac{2 \sin(k-1)\Omega \tau}{\tau} \right\}, & \omega \in [(k-1)\Omega, k\Omega], \\ 0, & \omega \notin [(k-1)\Omega, k\Omega]. \end{cases} \end{aligned}$$

Полагаем, что при  $k=1$   $\varphi(\tau) = \varphi_0(\tau)$ , при  $k=2$   $\varphi(\tau) = \varphi_1(\tau), \dots$ . Подставляя в выражение (1) найденные значения  $\varphi(\tau)$ , находим последовательно  $S_0, S_1, \dots$ , которые соединяем отрезками прямых, что и дает оценку  $S(\omega)$  в виде сплайна первого порядка. Из построения оценок коэффициентов сплайна следует, что полученные оценки узлов сплайна являются несмещенными.

#### Оценка дисперсии полученных оценок спектра мощности

Найдем теперь асимптотическую оценку дисперсии  $D[Q]$  статистики  $Q$  при  $T \rightarrow \infty$ . Для этого рассмотрим

$$Q^2 = \frac{1}{\pi^2 T^2} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^N y_j y_i y_l y_k \varphi(t_j - t_i) \varphi(t_l - t_k).$$

Усредняя по реализациям процесса  $y(t)$  при фиксированных моментах измерений, получим

$$\begin{aligned} M[y_j y_i y_l y_k] &= M[y(t_j) y(t_i) y(t_l) y(t_k)] = \\ &= R[t_j - t_i] R[t_l - t_k] + R[t_j - t_l] R[t_i - t_k] + \\ &\quad + R[t_j - t_k] R[t_i - t_l]. \end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned} M[Q^2] &= \frac{1}{\pi^2 T^2} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^N \varphi(t_j - t_i) \varphi(t_l - t_k) \times \\ &\quad \times \left( R[t_j - t_i] R[t_l - t_k] + R[t_j - t_l] R[t_i - t_k] + \right. \\ &\quad \left. + R[t_j - t_k] R[t_i - t_l] \right). \quad (4) \end{aligned}$$

Далее следует рассмотреть усреднение по моментам измерений каждого слагаемого, содержащего сомножитель вида  $R[t_j - t_i] R[t_l - t_k]$  выражения (4). Здесь возможны следующие варианты:

1) Все индексы  $j, i, l, k$  различные. Заменяя  $t_j$  на  $u, t_i$  на  $u', t_l$  на  $v, t_k$  на  $v'$ , получаем

$$\frac{1}{\pi^2 T^2} \int_0^T \int_0^T \int_0^T \int_0^T \left( R[u - u'] R[v - v'] \times \right. \\ \left. \times \varphi(u - u') \varphi(v - v') dudvdu'dv' \right),$$

вычисление которого дает при  $T \rightarrow \infty$  квадрат математического ожидания статистики  $Q$ , а именно

$\frac{1}{\pi^2} \left( \int_{-\infty}^{+\infty} R[z] \varphi(z) dz \right)^2$ , которое вычитается при нахождении дисперсии.

2) Два индекса равны между собой, а именно  $i=k$ , то есть  $t_i = t_k$ , тогда рассматриваемое слагаемое выражения (4) будет иметь вид

$$\frac{1}{\pi^2 T^2} \int_0^T \int_0^T \int_0^T R[u - u'] R[v - u'] \varphi(u - u') \varphi(v - u') dudvdu'.$$

После замены переменных и изменения порядка интегрирования последнее выражение может быть приведено к виду

$$\frac{2}{\pi^2 T^2} \left\{ \begin{aligned} & T \int_0^T R[z] \varphi(z) dz \int_{z-T}^T R[t] \varphi(t) dt + \\ & + \int_0^T R[z] \varphi(z) dz \int_{z-T}^T t R[t] \varphi(t) dt \end{aligned} \right\},$$

откуда видно, что при  $T \rightarrow \infty$  основной вклад в дисперсию будет вносить слагаемое  $\frac{1}{\pi^2 T} \left( \int_{-\infty}^{+\infty} R[z] \varphi(z) dz \right)^2$ .

Аналогичный результат получаем при равенстве индексов  $j$  и  $k, i$  и  $l, j$  и  $l$ .

3) Две пары индексов равны между собой, а именно  $j=l, i=k$ , тогда рассматриваемое слагаемое выражения (4) будет иметь вид

$$\frac{1}{\pi^2 T^2} \int_0^T \int_0^T R[u - u'] R[u - u'] \varphi(u - u') \varphi(u - u') dudvdu'.$$

Делая замену переменных и меняя порядок интегрирования, этот интеграл приводим к виду  $\frac{1}{\pi^2 T^2} T \int_{-T}^T \left(1 - \frac{|z|}{T}\right) R^2[z] \varphi^2(z) dz$ , который при  $T \rightarrow \infty$  стремится к  $\frac{1}{\pi^2 T} \int_{-\infty}^{+\infty} R^2[z] \varphi^2(z) dz$ .

Рассмотрев точно так же два других слагаемых выражения (4), после проведенного исследования можно утверждать, что дисперсия статистики  $Q$  при  $T \rightarrow \infty$  убывает как  $\frac{1}{T}$ .

**Оценка спектра мощности в виде сплайна первого порядка при случайном числе данных в моментах измерений**

К условиям предыдущей задачи добавим еще одно, а именно: в каждый момент времени производится случайное число измерений  $n_i$ , где  $n_i$  – случайные величины, распределенные по закону Пуассона с параметром  $\lambda$ . Аналогичная задача рассматривается в работе [20], однако в ней используется другой подход к получению сплайна, а именно подход, в котором сначала ищется оценка функции корреляции, а затем уже находится оценка спектра мощности, причем коэффициенты сплайна оцениваются все сразу.

Выясним, как в нашем случае наличие условия случайного числа измерений в каждый момент времени повлияет на оценки коэффициентов сплайна.

Для решения задачи разбиваем всю ось частот аналогично тому, как мы делали это ранее и рассмотрим статистику вида

$$Q = \frac{1}{\lambda^2 \pi T} \sum_{i,j; i \neq j} n_i n_j y_i y_j \varphi(t_j - t_i), \quad (5)$$

где  $\varphi(\tau)$  задаются выражением (2). Усреднив (5) по величинам  $n_i$ , получим выражение

$$\bar{Q} = \frac{1}{\pi T} \sum_{i,j; i \neq j} y_i y_j \varphi(t_j - t_i),$$

которое в дальнейшем и будет использоваться для нахождения оценок коэффициентов сплайна. Все остальные выкладки будут аналогичны рассмо-

треним ранее в разделе «Построение оценки спектра мощности в виде сплайна первого порядка».

**Имитационное моделирование полученных оценок**

Все расчеты и построение графиков выполнены в системе Mathcad 2000.

В соответствии с [21] было проведено моделирование реализации стационарного случайного процесса, которое описывается разностным уравнением первого порядка

$$x(n) = 0,8x(n-1) + v(n), \quad (6)$$

где  $v(n)$  – случайные величины, равномерно распределенные на  $[-1; 1]$ . В качестве первого элемента генерируемой реализации  $x(0)$  было взято значение 1,5. Результат моделирования реализации стационарного случайного процесса представлен на рис. 2.

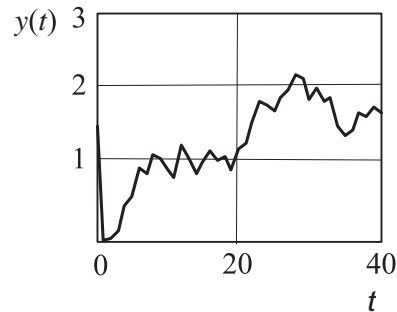


Рис. 2. Модельная реализация стационарного случайного процесса

Fig. 2. Model implementation of a stationary random process

На рис. 3 построены оценки спектра мощности коррелограммным методом и в виде сплайна первого порядка.

Оценим значимость полученных оценок спектра мощности. Для изучения качества полученной модели воспользуемся критерием Фишера–Снедекора. Для этого найдем наблюдаемое значение критерия

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{S}_{1i} - \bar{S})^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \hat{S}_{1i})^2}, \quad \text{здесь } m - \text{число оцениваемых па-}$$

$$n - m$$

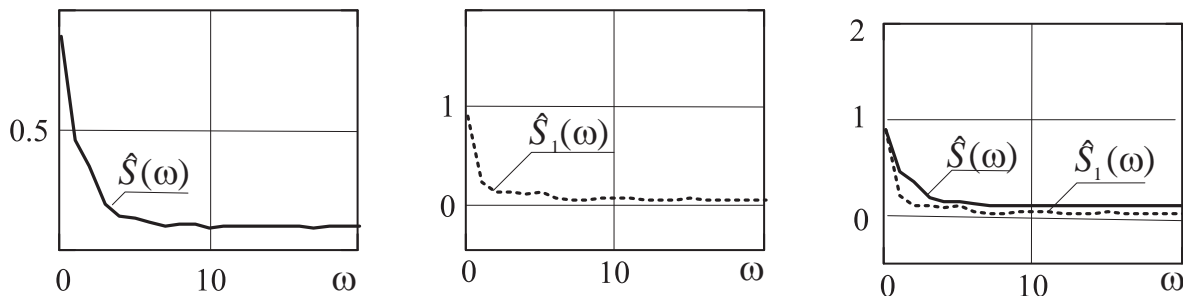


Рис. 3. Оценки:  $S(\omega)$  спектра мощности  $S(\omega)$  коррелограммным методом,  $S_1(\omega)$  – в виде сплайна первого порядка для реализации случайного процесса рис. 2

Fig. 3. Estimations:  $\hat{S}(\omega)$  of power spectrum  $S(\omega)$ ,  $\hat{S}_1(\omega)$  as a first-order spline for implementing the random process of the Fig. 2

раметров,  $n$  – объем выборки,  $S$  – выборочное среднее,  $S_i, i=1, n$  – значения спектра для модельной реализации случайного процесса (6), который имеет вид:

$$S_i = \frac{0,09}{0,41 - 0,4 \cos i} \text{ и } S_{1i}, i=1, n \text{ – оцененные значения спектра мощности в виде сплайна.}$$

Наблюдаемое значение критерия оказалось равным 23,684, что значительно превосходит табличное значение  $F_{\alpha, m-1, n-m} = 3,6$  критерия Фишера–Снедекора при уровне значимости  $\alpha=0,05$  и числом степеней свободы  $k_1=m-1$  и  $k_2=n-m$ . Так как  $F > F_{\alpha, k_1, k_2}$ , то полученная оценка спектра мощности в виде сплайна первого порядка является значимой. Индекс корреляции

$$R_{S_{\omega}} = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \hat{S}_{1i})^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} = 0,997 \text{ показывает, что}$$

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации. – М.: Недра, 1986. – 342 с.
2. Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
3. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – М.: Высш. шк., 2000. – 383 с.
4. Романенко А.Ф., Сергеев Г.А. Вопросы прикладного анализа случайных процессов. – М.: Советское радио, 1968. – 256 с.
5. Кривошеев В.И. Современные методы цифровой обработки сигналов (цифровой спектральный анализ). – Нижний Новгород: ННГУ, 2006. – 117 с.
6. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2003. – 608 с.
7. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
8. Бендат Дж. Основы теории случайных шумов и ее применения. – М.: Наука, 1965. – 463 с.
9. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1978. – 848 с.
10. Person B.N.J., Albohr O. On the nature of surface roughness with application to contact mechanics, sealing, rubber friction and adhesion // J. of Physics: Condensed Matter. – 2005. – V. 17. – № 1. – P. 1–62.
11. Majumdar A., Bhushan B. Characterization and modeling of surface roughness and contact mechanics. Handbook of Micro/Nanotribology. – New York: CRC Press LLC, 1999. – 861 p.

полученная оценка спектра в виде сплайна первого порядка весьма тесно связана с аналитическим выражением спектра случайного процесса (6).

Таким образом, сплайновая оценка качественно правильно отражает вид спектра мощности.

#### Выводы

Выполнен расчет коэффициентов сплайна первого порядка в приложении к оценке спектра мощности стационарного случайного процесса в двух ситуациях, когда в каждый момент времени производится:

- 1) ровно одно измерение;
- 2) случайное число измерений.

Показано, что полученные оценки являются несмещенными. Установлено, что дисперсия оценок асимптотически ведет себя как  $\frac{1}{T}$ , где  $T$  – время наблюдения.

12. Федотов А. Спектр мощности как характеристика шероховатости поверхности // Фотоника. – 2010. – № 6. – С. 18–21.
13. Peitgen H.O., Saupe D. The Science of Fractal Images. – New York: Springer-Verlag, 1988. – 312 p.
14. Flandrin P. On the Spectrum of Fractional Brownian Motions // IEEE Transactions on Information Theory. – 1989. – V. 35. – № 1. – P. 197–199.
15. Mandelbrot B.B., van Ness J.W. Fractional Brownian motions, fractional noises and applications // SIAM Review. – 1968. – V. 10. – № 4. – P. 422–437.
16. Berry M.V. Diffraction // J. Phys. A: Math. Gen. – 1979. – V. 12. – № 6. – P. 781–797.
17. Бахвалов Н.С. Численные методы. – М.: Наука, 1975. – 632 с.
18. Корнейчук Н.П. Сплайны в теории приближения. – М.: Наука, 1984. – 352 с.
19. Шевелицкий И.В. Интерполяционные сплайны в задачах цифровой обработки сигналов // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2003. – № 4. – С. 42–53.
20. Терпугов А.Ф., Константинова И.Г. Оценка спектра мощности стационарного случайного процесса сплайнами первого порядка при случайном числе измерений // Вестник ТГУ. – 2000. – Т. 269. – С. 85–89.
21. Вадутов О.С. Математические основы обработки сигналов. Практикум. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 99 с.

Поступила 24.03.2014 г.

UDC 519.2

## EVALUATION OF THE POWER SPECTRUM OF A STATIONARY RANDOM PROCESS AS A FIRST-ORDER SPLINE

**Irina G. Ustinova,**

Cand. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: igu@sibmail.com

**Elena G. Lazareva,**

Cand. Sc., National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: lazareva-e-g73@mail.ru

**Elena I. Podberезina,**

Cand. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: pei@tpu.ru

*The urgency of the work is caused by the fact that the power spectrum as well as the correlation function, is one of the most important characteristics of the second order of stochastic process. The spectrum shows what kind of harmonics prevails in the process, its structure; allows estimating spectral composition of the studied useful signals and noises. It is possible to synthesize (recover) signal, as well as to construct linear, including optimal filters, to obtain error estimates of linear filtering by the spectra.*

**The main aim of the study** is to evaluate the power spectrum of a stationary random process as a first-order spline under the following measurement schemes: one measurement is made every moment, a random number of measurements is made every moment. Study of statistical characteristics of the estimates.

**The methods used in the study:** the methods of probability theory and mathematical statistics are used for calculation.

**The results:** The authors obtained an unbiased estimate of the power spectrum as a first-order spline in two schemes of measurement: one measurement is made every moment, a random number of measurements is made every moment. It is shown that the variance of

estimates behaves asymptotically like  $\frac{1}{T}$ , where  $T$  is the time of observation.

### Key words:

Power spectrum, correlation function, first-order spline, parameter estimations, statistical properties of estimations.

### REFERENCES

1. Nikitin A.A. *Teoreticheskie osnovy obrabotki geofizicheskoy informatsii* [Theoretical bases of processing geophysical information]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 342 p.
2. Marple S. L. *Tsifrovoy spektralnyy analiz i ego prilozheniya* [Digital spectral analysis and its application]. Moscow, Mir Publ., 1990. 584 p.
3. Ventzhel E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya sluchaynykh protsessov i ee inzhenernyye prilozheniya* [Random process theory and its engineering applications]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2000. 383 p.
4. Romanenko A.F., Sergeev G.A. *Voprosy prikladnogo analiza sluchaynykh protsessov* [Issues of random process application analysis]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1968. 256 p.
5. Krivosheev V.I. *Sovremennye metody tsifrovoy obrabotki signalov (tsifrovoy spektralnyy analiz)* [Modern techniques of signal digital processing (digital spectral analysis)]. Nizhniy Novgorod, NNGU Publ., 2006. 117 p.
6. Sergienko A.B. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Signal digital processing]. St. Petersburg, Piter Publ., 2003. 608 p.
7. Bendat J.S., Piersol A. *Prikladnoy analiz sluchaynykh dannykh* [Application analysis of random data]. Moscow, Mir Publ., 1989. 540 p.
8. Bendat J.S. *Osnovy teorii sluchaynykh shumov i ee primeneniye* [Principles and applications of random noise theory]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 463 p.
9. Rabiner L., Gould B. *Teoriya i primeneniye tsifrovoy obrabotki signalov* [Theory and application of signal digital processing]. Moscow, Mir Publ., 1978. 848 p.
10. Person B.N.J., Albohr O. On the nature of surface roughness with application to contact mechanics, sealing, rubber friction and adhesion. *J. of Physics: Condensed Matter*, 2005, vol. 17, no. 1, pp. 1–62.
11. Majumdar A., Bhushan B. *Characterization and modeling of surface roughness and contact mechanics. Handbook of Micro/Nanotribology*. New York, CRC Press LLC, 1999. 861 p.
12. Fedotov A. Spektr moshchnosti kak kharakteristika sherokhovatosti poverkhnosti [Power spectrum as a characteristic of surface roughness]. *Fotonika*, 2010, no. 6, pp. 18–21.
13. Peitgen H.O., Saupe D. *The Science of Fractal Images*. New York, Springer-Verlag, 1988. 312 p.
14. Flandrin P. On the Spectrum of Fractional Brownian Motions. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1989, vol. 35, no. 1, pp. 197–199.
15. Mandelbrot B.B., van Ness J.W. Fractional Brownian motions, fractional noises and applications. *SIAM Review*, 1968, vol. 10, no. 4, pp. 422–437.
16. Berry M.V. Diffractals. *J. Phys. A: Math. Gen.*, 1979, vol. 12, no. 6, pp. 781–797.
17. Bakhvalov N.S. *Chislennyye metody* [Numerical techniques]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 632 p.
18. Korneychuk N.P. *Splayny v teorii priblizheniy* [Splines in approximation theory]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 352 p.
19. Shevelitskiy I.V. Interpolyatsionnye splayny v zadachakh tsifrovoy obrabotki signalov [Interpolation splines in problems of signal digital processing]. *Exponenta Pro. Matematika v prilozheniyakh*, 2003, no. 4, pp. 42–53.
20. Terpugov A.F., Konstantinova I.G. Otsenka spektra moshchnosti statsionarnogo sluchaynogo protsesssa splaynami pervogo poryadka pri sluchaynom chisle izmereniy [Estimation of steady process power spectrum by the first order splines at a random number of measurements]. *Vestnik TGU*, 2000, vol. 269, pp. 85–89.
21. Vadutov O.S. *Matematicheskie osnovy obrabotki signalov. Praktikum* [Mathematical bases of signal processing. Workshop]. Tomsk, TPU Publ. House, 2007. 99 p.

Received: 24 March 2014.

УДК 62-752+62-755

## УРАВНОВЕШИВАНИЕ АВТОБАЛАНСИРОМ РОТОРА В УПРУГО-ВЯЗКО ЗАКРЕПЛЕННОМ КОРПУСЕ, СОВЕРШАЮЩЕМ ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ

**Филимонихин Геннадий Борисович,**

д-р техн. наук, профессор кафедры деталей машин и прикладной механики факультета проектирования и эксплуатации машин Кировоградского национального технического университета, Украина, 25006, г. Кировоград, пр. Университетский, 8. E-mail: filimonikhin@yandex.ua

**Гончаров Валерий Владимирович,**

канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры высшей математики факультета проектирования и эксплуатации машин Кировоградского национального технического университета, Украина, 25006, г. Кировоград, пр. Университетский, 8. E-mail: matkora@yandex.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью исследования процесса уравнивания автобалансирами ротора.

**Цель работы:** оценить переходные процессы при статическом уравнивании автобалансиrom со многими корректирующими грузами ротора, помещенного с возможностью вращения в тяжелый упруго-вязко закрепленный корпус, совершающий пространственное движение.

**Методы исследования:** теория устойчивости установившихся движений механических систем; математическая теория устойчивости движений по Ляпунову.

**Результаты:** Найдены условия наступления автобалансировки и установлено, что:

- корпус и ротор условно образуют составной, более массивный и длинный ротор, характеристики которого влияют на процесс автобалансировки;
- переходные процессы, характеризующие автобалансировку, делятся на: быстрые, при которых практически прекращаются движения корректирующих грузов относительно ротора и устанавливается движение ротора, соответствующее суммарному дисбалансу корректирующих грузов и дисбаланса ротора; медленные, при которых корректирующие грузы приходят в автобалансировочное положение, двигаясь относительно ротора;
- скорость протекания быстрых переходных процессов зависит от параметров закрепления корпуса, массо-инерционных характеристик составного ротора, скорости вращения, положения плоскости балансировки, сил вязкого сопротивления, действующих на корректирующие грузы, и не зависит от уравниваемого дисбаланса, количества и положений корректирующих грузов;
- скорость протекания медленных переходных процессов дополнительно зависит от уравниваемого дисбаланса, количества и положений корректирующих грузов, но не зависит от сил сопротивления опор.

**Ключевые слова:**

Ротор, дисбаланс, автобалансиrom, основное движение, устойчивость движения.

### Введение

Роторы многих центробежных машин – стиральных, экстракторов, сепараторов, центрифуг, осевых вентиляторов и пр. – установлены в корпус с возможностью вращения, а уже корпус закреплен упруго-вязко и совершает неплоское движение. В этих машинах дисбаланс ротора меняется в процессе выполнения технологических операций, поэтому его целесообразно уравнивать на ходу пассивными автобалансирами (АБ) [1–5].

Наиболее полный обзор литературы по пассивной автобалансировке роторов приведен в [5]. Учет этого обзора, более поздних публикаций и работ [6–18] показывает, что на сегодня практически нет работ, в которых аналитически исследуется процесс автобалансировки роторов, совершающих пространственное движение. В указанных работах определяются только условия наступления автобалансировки в виде критических скоростей, при переходе через которые наступает или исчезает автобалансировка. Эти скорости для двухшарового АБ определяются в [1–4, 6–13, 15–18] с применением

метода синхронизации динамических систем И.И. Блехмана [19], для АБ любого типа – с применением эмпирического критерия наступления автобалансировки в [5] или энергетического критерия, использующего функцию Гамильтона, в [14]. При этом переходные процессы не исследуются.

Дифференциальные уравнения движения роторных машин с АБ почти не поддаются аналитическому исследованию ввиду существенной нелинейности и большому количеству степеней свободы системы. Такие уравнения позволяют аналитически исследовать АБ только с двумя корректирующими грузами (КГ) – шарами, роликами, маятниками.

С учетом вышеописанных проблем в работе [20] была предложена методика составления упрощенных дифференциальных уравнений движения роторных машин с АБ, учитывающая особенности таких механических систем – отношения малости параметров, малость отклонений продольной оси ротора от оси вращения и т. п. В соответствии с этой методикой составляются замкнутые уравне-



ния движения роторной машины с АБ относительно обобщенных координат, описывающих движение ротора и его дисбаланс, так как именно эти координаты описывают процесс автобалансировки и позволяют исследовать АБ со многими КГ. В работе [21] с применением указанной методики были аналитически исследованы переходные процессы, протекающие при статическом уравновешивании АБ со многими КГ ротора, помещенного с возможностью вращения в упруго-вязко закрепленный корпус с неподвижной точкой. Там же была предложена методика таких исследований, которая может быть стандартной при решении подобных задач.

В настоящей работе методика исследований, предложенная в работах [20, 21], применяется для аналитического исследования переходных процессов, протекающих при статическом уравновешивании АБ со многими КГ ротора, помещенного с возможностью вращения в упруго-вязко закрепленный корпус, совершающий пространственное движение.

**Описание теоретико-механической модели роторной машины**

Осесимметричный ротор массы  $m$ , установлен в корпусе массы  $m_c$  с возможностью вращения вокруг продольной оси (рис. 1). Центры масс ротора и массивного корпуса совпадают и находятся в точке  $O$ . Ротор вращается относительно корпуса с постоянной угловой скоростью  $\omega$ . Корпус удерживают пять упруго-вязких опор.

Движение машины описывается с использованием двух систем осей:  $Oxyz$  – неподвижных;  $G\xi\eta\zeta$  – подвижных, жестко связанных с ротором. В исходном положении, когда машина неподвижна и находится в положении статического равновесия, системы  $Oxyz$  и  $G\xi\eta\zeta$  совпадают. Ось  $Oz$  на-

правлена вдоль оси вращения ротора. В плоскости  $z=d$  находится статический дисбаланс  $s_0$ , образованный точечной массой  $m_0$ , находящейся на расстоянии  $r_0$  от продольной оси ротора. Ось  $Ox$  направлена в сторону начального направления вектора статического дисбаланса  $s_0$ , а ось  $Oy$  направлена так, что тройка осей  $Oxyz$  правая. Свойства упруго-вязких опор характеризуют коэффициенты жесткости  $k, k_z$  и вязкости  $b, b_z$ .

Модель движения ротора с массивным корпусом и дисбалансом приведена на рис. 2. Вначале совершается поступательное перемещение ротора с корпусом на  $(x, y, z)$  вдоль координатных осей. В результате система осей  $Oxyz$  переходит в промежуточное положение  $Gx_c y_c z_c$  (рис. 2, а). Потом совершаются повороты ротора с корпусом вокруг точки  $G$  на углы Резаля  $\alpha$  и  $\beta$  (рис. 2, б). В результате система осей  $Gx_c y_c z_c$  переходит в  $Guvw$ . Последним совершается поворот ротора вокруг продольной оси  $w=\zeta$  на угол  $\omega t$  (рис. 2, в). При этом система осей  $Guvw$  переходит в систему  $G\xi\eta\zeta$ .

Относительно системы осей  $Ouvw$  тензоры инерции ротора и корпуса имеют вид

$$J_r = \text{Diag}(A_r, A_r, C_r), \quad J_c = \text{Diag}(A_c, A_c, C_c).$$

В плоскости  $\zeta=d$  ротор уравновешивает АБ, состоящий из  $n$  одинаковых КГ (маятников, шаров или цилиндрических роликов). В маятниковом АБ на вал ротора насажено  $n$  математических маятников массы  $m$  и физической длины  $r$ . В шаровом либо роликовом АБ  $n$  шаров или цилиндрических роликов массой  $m$  катятся без скольжения по кольцевой дорожке, при этом расстояние от продольной оси ротора до центра шара либо продольной оси ролика равно  $r$ .

Как это принято в теории пассивных АБ [1–21], действием сил тяжести пренебрегаем и полагаем, что: радиусы КГ (шаров, роликов) намного меньше

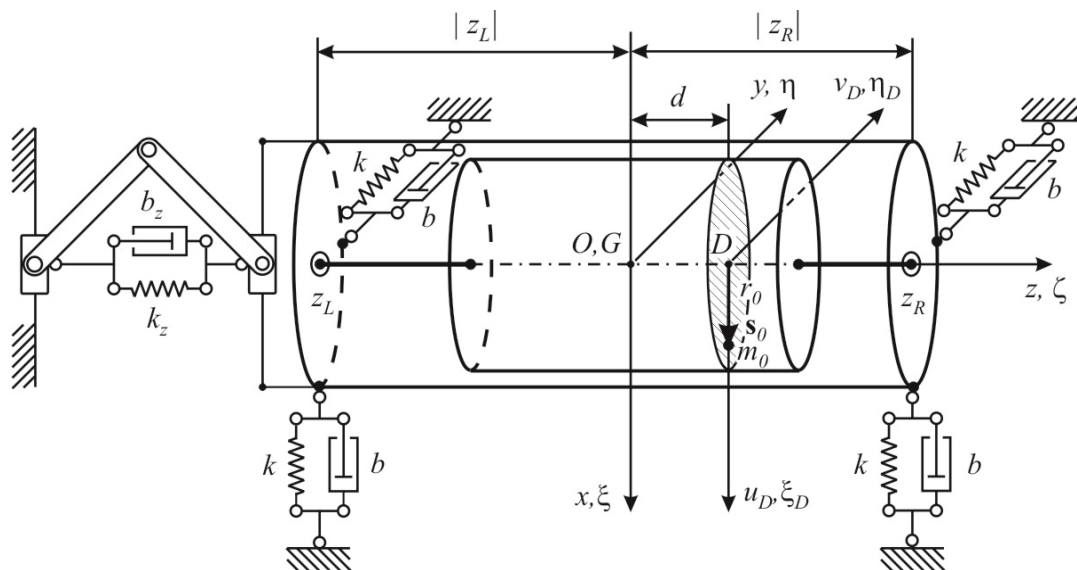


Рис. 1. Ротор в массивном корпусе, установленном на упруго-вязких опорах

Fig. 1. Rotor in massive bed fixed on visco-elastic columns

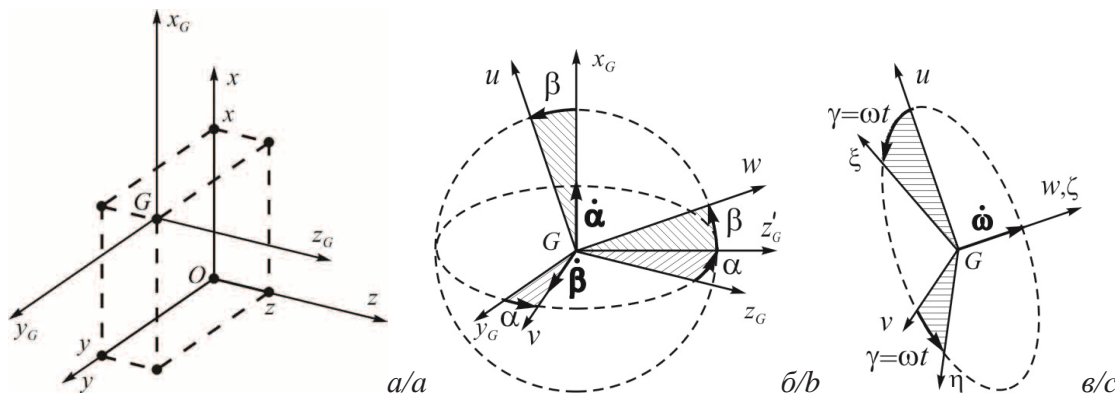


Рис. 2. Кинематика движения ротора и корпуса

Fig. 2. Kinematics of rotor and bed motion

радиусов их беговых дорожек; при нахождении на одной дорожке КГ не мешают движению друг друга.

Положение массы дисбаланса или  $i$ -го КГ ( $i=0, n$ ) в плоскости  $\zeta=d$  будем определять абсолютными углами  $\varphi_i$ , отсчитываемыми между осью  $Ou_D$  и относительными радиус-векторами  $r_i$  массы дисбаланса или центров масс КГ (рис. 3, а), или относительными углами  $\psi_i$ , отсчитываемыми между осью  $O\xi_D$  и относительными радиус-векторами  $r_i$  (рис. 3, б). Связи между абсолютными и относительными углами имеют вид  $\varphi_i = \omega t + \psi_i, i=0, n/$ .

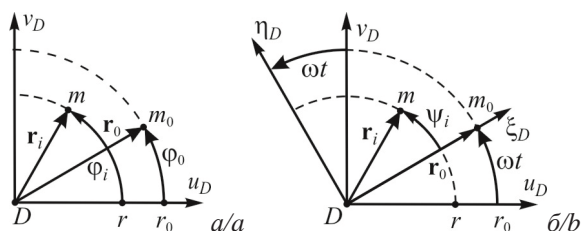


Рис. 3. Кинематика движения КГ и массы дисбаланса: а) абсолютные; б) относительные углы

Fig. 3. Kinematics of corrective weights and mass imbalance: а) absolute; б) relative angles

Относительному движению  $i$ -го шара или ролика ( $i=0, n$ ) препятствует ньютоновская сила вязкого сопротивления, модуль которой равен  $F_i^{(vis)} = b_i u_i$ , где  $b_i$  – коэффициент сил вязкого сопротивления;  $u_i = r_i |\dot{\varphi}_i - \omega| = r_i |\dot{\psi}_i|$  – модуль относительной скорости КГ (скорости центра масс КГ относительно ротора); точка над величиной обозначает производную по времени. При повороте  $i$ -го маятника ( $i=0, n$ ) вокруг оси ротора на него действует момент сил вязкого сопротивления  $M_i^{(vis)} = b_i r_i u_i$ , где  $b_i r_i$  – коэффициент момента сил вязкого сопротивления, приведенный к плечу  $r$ .

**Составление упрощенных дифференциальных уравнений движения роторной машины в неподвижной системе координат**

При составлении дифференциальных уравнений движения роторной машины используются уравнения Лагранжа II рода вида

$$d(\partial T / \partial \dot{q}) / dt - \partial T / \partial q = -\partial \Pi / \partial q - \partial \Phi / \partial \dot{q},$$

$$q = (x, y, z, \alpha, \beta, \varphi_1, \dots, \varphi_n)^T, \quad (1)$$

где  $T$  и  $\Pi$  – соответственно кинетическая и потенциальная энергии системы;  $\Phi$  – диссипативная функция Релея;  $q$  – вектор обобщенных координат, определяющих движение машины. Упрощающие предположения касаются отношений малости величин [20]:

$$|x|, |y|, |z|, |\alpha|, |\beta| \ll 1; |\dot{x}|, |\dot{y}|, |\dot{z}|, |\dot{\alpha}|, |\dot{\beta}| \ll 1;$$

$$mn \ll m_r, m_c \sim m_r.$$

С использованием уравнений (1) получаем систему  $5+n$  обыкновенных дифференциальных уравнений 2-го порядка относительно обобщенных координат:

$$M\ddot{z} + b_z \dot{z} + k_z z = 0, \quad (2)$$

$$M\ddot{x} + b_x \dot{x} + k_x x + b_{x\beta} \dot{\beta} + k_{x\beta} \beta + \ddot{s}_u = 0,$$

$$M\ddot{y} + b_y \dot{y} + k_y y - b_{y\beta} \dot{\beta} - k_{y\beta} \beta + \ddot{s}_v = 0,$$

$$A\ddot{\beta} + b_\beta \dot{\beta} + k_\beta \beta - C_r \omega \dot{\alpha} + b_{x\beta} \dot{x} + k_{x\beta} x + d\ddot{s}_u = 0,$$

$$-A\ddot{\alpha} - b_\beta \dot{\alpha} - k_\beta \alpha - C_r \omega \dot{\beta} + b_{x\beta} \dot{y} + k_{x\beta} y + d\ddot{s}_v = 0, \quad (3)$$

$$m\kappa \ddot{\varphi}_i r + b_r r (\dot{\varphi}_i - \omega) = m(a_{Du} \sin \varphi_i - a_{Dv} \cos \varphi_i),$$

$$i = \overline{1, n/}, \quad (4)$$

где  $s_u = m_0 r_0 + \sum_{i=1}^n m_i r_i \cos \varphi_i$ ,  $s_v = \sum_{i=1}^n m_i r_i \sin \varphi_i$  – соответственно проекции суммарного дисбаланса точечной массы и КГ на оси  $Ou$ ,  $Ov$ ;  $a_{Du} = \ddot{x} + d\ddot{\beta}$ ,  $a_{Dv} = \ddot{y} + d\ddot{\alpha}$ ;  $M = m_c + m_r$ ,  $A = A_c + A_r$ ,  $k_x = 2k$ ,  $k_\beta = k(z_L^2 + z_R^2)$ ,  $k_{x\beta} = k(z_L + z_R)$ ,  $b_x = 2b$ ,  $b_\beta = b(z_L^2 + z_R^2)$ ,  $b_{x\beta} = b(z_L + z_R)$ ,  $\kappa = 1 + \kappa^{(rot)}$ ;  $\kappa^{(rot)} = 2/5$  – для шаров,  $\kappa^{(rot)} = 1/2$  – для цилиндрических роликов,  $\kappa^{(rot)} = 0$  – для маятников.

Из равенств (2)–(4) видно, что корпус, совершающий только часть движений ротора, «прибавляет» к соответствующим массо-инерционным характеристикам свои характеристики. При этом условно образуется составной ротор – более массивный и длинный, и именно его характеристики влияют на динамику системы. Поэтому даже ко-

роткий ротор в массивном корпусе может вести себя как длинный.

Система (2)–(4) распадается на две независимые подсистемы – уравнение (2) описывает загибающее движение машины вдоль оси  $z$ , остальные уравнения описывают процесс автобалансировки. В дальнейшем будем рассматривать только уравнения (3), (4).

#### Основные движения роторной системы и дифференциальные уравнения для исследования их устойчивости

На основных движениях ротор уравновешен и вращается вокруг собственной продольной оси, поэтому обобщенные координаты ротора  $x, y, \alpha, \beta$  и проекции суммарного дисбаланса  $s_u, s_v$  равны нулю:

$$x = y = \alpha = \beta = s_u = s_v = 0. \quad (5)$$

Устойчивость основных движений будем исследовать по этим обобщенным координатам. Система уравнений (3) незамкнута. Замыкаем ее минимальным количеством уравнений, являющихся комбинациями дифференциальных уравнений движения КГ (4).

Умножим каждое уравнение в (4) поочередно на  $\sin\varphi_i$  и сложим, затем – на  $\cos\varphi_i$  и сложим. Полученные уравнения в окрестности определенного установившегося движения линеаризуются и принимают вид

$$\begin{aligned} & \kappa(\ddot{s}_u + 2\omega\dot{s}_v - \omega^2 s_u) + b_r(\dot{s}_u + \omega s_v) / m = \\ & = -mnd \left[ a_{Dv}(p_1 \sin 2\omega t + p_2 \cos 2\omega t) + \right. \\ & \quad \left. + a_{Du}(1 - p_1 \cos 2\omega t + p_2 \sin 2\omega t) \right] / 2, \\ & \kappa(\ddot{s}_v - 2\omega\dot{s}_u - \omega^2 s_v) + b_r(\dot{s}_v - \omega s_u) / m = \\ & = mnd \left[ a_{Dv}(1 + p_1 \cos 2\omega t - p_2 \sin 2\omega t) + \right. \\ & \quad \left. + a_{Du}(p_1 \sin 2\omega t + p_2 \cos 2\omega t) \right] / 2, \quad (6) \end{aligned}$$

где  $p_1 = (\sum_{i=1}^n \cos 2\tilde{\psi}_i) / n$ ,  $p_2 = (\sum_{i=1}^n \sin 2\tilde{\psi}_i) / n$ ;  $\tilde{\psi}_i$ ,  $i=1, n$  – угловое положение  $i$ -го КГ в установившемся движении.

Введем угол  $\mathcal{G}$  и параметр  $p$ :  $\cos \mathcal{G} = p_1/p$ ,  $\sin \mathcal{G} = p_2/p$ ,  $p = \sqrt{p_1^2 + p_2^2}$ . Сдвинем время:  $2\omega t + \mathcal{G} = 2\omega\tau$  или  $t = \tau - \mathcal{G}/(2\omega)$ . Тогда уравнения (6) запишутся в виде

$$\begin{aligned} & \kappa(\ddot{s}_u + 2\omega\dot{s}_v - \omega^2 s_u) + b_r / m \cdot (\dot{s}_u + \omega s_v) = \\ & = -mnd / 2 \cdot [a_{Dv}(1 - p \cos 2\omega\tau) - a_{Du} p \sin 2\omega\tau], \\ & \kappa(\ddot{s}_v - 2\omega\dot{s}_u - \omega^2 s_v) + b_r / m \cdot (\dot{s}_v - \omega s_u) = \\ & = mnd / 2 \cdot [a_{Dv} p \sin 2\omega\tau - a_{Du}(1 + p \cos 2\omega\tau)]. \quad (7) \end{aligned}$$

Уравнения (3) не изменятся при переходе к новому времени, поэтому уравнения (7) замыкают их относительно неизвестных функций  $x, y, \alpha, \beta, s_u, s_v$ .

Уравнения (3), (7) – это система обыкновенных линейных дифференциальных уравнений 2-го порядка с периодическими коэффициентами. В нее входят 16 параметров  $M, A, C_r, k_x, k_\beta, b_\beta, k_{x\beta}, b_{x\beta}, b_x, \omega, d, m, n, \kappa, b_r, p$ .

#### Псевдо сворачивание, переход к подвижной системе координат и обезразмеривание системы дифференциальных уравнений

Дифференциальные уравнения для исследования устойчивости основных движений в комплексном виде. В комплексных переменных  $X_z, B_z, S_{zu}$ :

$$X_z = x + iy, B_z = \beta - i\alpha, S_{zu} = s_u + is_v$$

уравнения (3), (7) примут вид

$$\begin{aligned} L_1 &= M\ddot{X}_z + b_x \dot{X}_z + k_x X_z + b_{x\beta} \dot{B}_z + k_{x\beta} B_z + \ddot{S}_{zu} = 0, \\ \bar{L}_1 &= 0, \\ L_2 &= A\ddot{B}_z + b_\beta \dot{B}_z + k_\beta B_z - i\omega C_r \dot{B}_z + \\ &+ b_{x\beta} \dot{X}_z + k_{x\beta} X_z + d\ddot{S}_{zu} = 0, \quad \bar{L}_2 = 0, \\ L_3 &= \kappa \bar{D}_t^2 S_{zu} + b_r / m \cdot \bar{D}_t S_{zu} + \\ &+ mnd / 2 \cdot [\ddot{X}_z + d\ddot{B}_z - (\ddot{X}_z + d\ddot{B}_z) pe^{2\omega\tau}] = 0, \\ \bar{L}_3 &= 0, \quad (8) \end{aligned}$$

где  $D_t \bullet = \dot{\bullet} + i\omega \bullet$  – оператор.

Приведение уравнений к автономному виду. В новых комплексных переменных  $\Xi_z = X_z e^{i\omega\tau}$ ,  $\Theta_z = B_z e^{i\omega\tau}$ ,  $S_z = S_{zu} e^{i\omega\tau}$  система (8) приводится к автономному виду

$$\begin{aligned} L_1 &= MD_t^2 \Xi_z + b_x D_t \Xi_z + k_x \Xi_z + b_{x\beta} D_t \Theta_z + \\ &+ k_{x\beta} \Theta_z + D_t^2 S_z = 0, \quad \bar{L}_1 = 0, \\ L_2 &= AD_t^2 \Theta_z + b_\beta D_t \Theta_z + k_\beta \Theta_z - i\omega C_r D_t \Theta_z + \\ &+ b_{x\beta} D_t \Xi_z + k_{x\beta} \Xi_z + dD_t^2 S_z = 0, \quad \bar{L}_2 = 0, \\ L_3 &= \kappa \ddot{S}_z + b_r / m \cdot \dot{S}_z + \\ &+ mnd / 2 \cdot \left[ D_t^2 \Xi_z + dD_t^2 \Theta_z - \right. \\ & \quad \left. - p(\bar{D}_t^2 \Xi_z + d\bar{D}_t^2 \Theta_z) \right] = 0, \quad \bar{L}_3 = 0. \quad (9) \end{aligned}$$

Уравнения в безразмерном виде. При стандартном обезразмеривании уравнения (9) примут вид

$$\begin{aligned} L_1 &= D^2 \xi_z + \tilde{b}_x D \xi_z + \xi_z + \\ &+ \tilde{k}_{x\beta} (\tilde{b}_x D \theta_z + \theta_z) + D^2 s_z = 0, \quad \bar{L}_1 = 0, \\ L_2 &= D^2 \theta_z + (\tilde{k}_\beta \tilde{b}_x - i\tilde{\omega} \tilde{C}) D \theta_z + \tilde{k}_\beta \theta_z + \\ &+ \tilde{k}_{x\beta} (\tilde{b}_x D \xi_z + \xi_z) + \tilde{d} D^2 s_z = 0, \quad \bar{L}_2 = 0, \quad (10) \\ L_3 &= \tilde{s}'_z + \tilde{b} s'_z + \tilde{m} \left[ D^2 (\xi_z + \tilde{d} \theta_z) - \right. \\ & \quad \left. - p \bar{D}^2 (\bar{\xi}_z + \tilde{d} \bar{\theta}_z) \right] = 0, \\ \bar{L}_3 &= 0, \quad (11) \end{aligned}$$

где  $\xi_z = \Xi_z M / (mr)$ ,  $\theta_z = \Theta_z \sqrt{AM} / (mr)$ ,  $s_z = S_z / (mr)$  – безразмерные комплексные обобщенные координаты; штрих обозначает производную по безразмерному времени  $\tilde{\tau} = \omega_0 t$ ;  $D(\bullet) = (\bullet)' + i\tilde{\omega}(\bullet)$  – оператор,  $\tilde{k}_x = b_x \omega_0 / k_x$ ,  $\omega_0 = \sqrt{k_x / M}$ ,  $\tilde{k}_{x\beta} = k_{x\beta} / (\omega_0^2 \sqrt{AM})$ ,  $\tilde{d} = d / \sqrt{AM}$ ,  $\tilde{k}_\beta = k_\beta / (A\omega_0^2)$ ,  $\tilde{C} = C_r / A$ ,  $\tilde{\omega} = \omega / \omega_0$ ,  $\tilde{k}_{x\beta} = b_r / (m\kappa\omega_0)$ ,  $m\tilde{r} = mn / (2\kappa M) \ll 1$ .

Из (5) и способа введения новых обобщенных координат следует, что на основных движениях

$$\xi_z = \bar{\xi}_z = 0, \theta_z = \bar{\theta}_z = 0, s_z = \bar{s}_z = 0.$$

Уравнения (10), (11) линейны и стационарны, поэтому устойчивость основных движений роторной системы можно исследовать по обобщенным комплексным координатам  $\xi_z, \bar{\xi}_z, \theta_z, \bar{\theta}_z, s_z, \bar{s}_z$  с применением теории устойчивости линейных систем дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Заметим, что в уравнения входят девять независимых безразмерных параметров  $\tilde{d}, \tilde{C}, \tilde{m}, \tilde{\omega}, \tilde{k}_\beta, \tilde{k}_{x\beta}, \tilde{b}_x, \tilde{b}, p$ .

**Оценка величин безразмерных параметров**

$$\tilde{\omega}, \tilde{d}, \tilde{C}, \tilde{m}, \tilde{k}_x, \tilde{k}_{x\beta}, \tilde{b}_x, \tilde{b}, p$$

Параметр  $\tilde{\omega}$  соответствует угловой скорости вращения ротора и теоретически может меняться в пределах от 0 до  $+\infty$ . Нужно определить такие области изменения  $\tilde{\omega}$ , в пределах которых будут устойчивыми основные движения.

Для реальных роторных машин масса КГ намного меньше массы ротора с корпусом, поэтому  $\tilde{m} \ll 1$ . Параметр  $\tilde{d}$  равен отношению расстояния от центра масс составного ротора до плоскости дисбаланса к радиусу инерции составного ротора относительно его поперечной центральной оси, поэтому  $\tilde{d} \geq 0$ .

Параметр  $\tilde{k}_\beta$  характеризует жесткость опор. Для реальных роторных машин он эквивалентен 1. Параметр  $\tilde{k}_{x\beta}$  характеризует расположение опор относительно центра масс системы и может изменяться в пределах от -1 до 1. При почти симметричных опорах он эквивалентен 0.

Параметры  $\tilde{b}_x, \tilde{b}$ , соответственно, характеризуют силы вязкого сопротивления в опорах и силы сопротивления относительно движению КГ. Для реальных роторных машин  $\tilde{m} \ll \tilde{b}_x \ll 1, \tilde{b} \sim 1$ .

Параметры  $p$  и  $\tilde{C}$  подробно описаны в [21]:  $p$  зависит от расположения КГ в АБ и принимает значения в пределах от 0 до 1;  $\tilde{C}$  характеризует вид составного ротора (при  $\tilde{C} < 1$  ротор длинный, при  $\tilde{C} \approx 1$  – сферический, при  $\tilde{C} > 1$  – короткий). Будем считать, что  $\tilde{C} \sim 1$ .

Окончательно имеем такие оценки величин безразмерных параметров:

$$\tilde{\omega} \in (0, +\infty), \tilde{m} \ll 1, \tilde{d} \geq 0, \tilde{C}, \tilde{k}_\beta, \tilde{b} \sim 1, p \in [0, 1],$$

$$\tilde{m} \ll \tilde{b}_x \ll 1, \tilde{k}_{x\beta} \in [-1; 1] (\tilde{k}_{x\beta} \sim 0).$$

**Исследование устойчивости основных движений и характера переходных процессов**

Характеристическое уравнение системы (10), (11) имеет вид

$$\lambda^2(\lambda + \tilde{b})^2 X\bar{X} - \lambda(\lambda + \tilde{b})(X\bar{Y} + \bar{X}Y) \cdot \tilde{m} + (1 - p^2)Y\bar{Y} \cdot \tilde{m}^2 = 0, \quad (12)$$

где

$$X = (\Lambda^2 - 1 + i\tilde{b}_x\Lambda)\Lambda_1 - [\tilde{d}\Lambda^2 - (\tilde{d} - \tilde{k}_{x\beta})(1 - i\tilde{b}_x\Lambda)]^2,$$

$$Y = \Lambda^4\Lambda_1, \Lambda = -\tilde{\omega} + i\lambda,$$

$$\Lambda_1 = \Lambda^2(1 + \tilde{d}^2) + \Lambda\tilde{C}\tilde{\omega} - a_1 + a_1i\tilde{b}_x\Lambda,$$

$$a_1 = \tilde{d}^2 - 2\tilde{d}\tilde{k}_{x\beta} + \tilde{k}_\beta.$$

Заметим, что мнимые части корней характеристического уравнения определяют частоту колебаний в переходных процессах, а их продолжительность зависит от величин отрицательных действительных частей этих корней – чем они меньше, тем меньше продолжительность.

Разложение корней уравнения (12) по степеням малых параметров  $0 < \tilde{m} \ll \tilde{k}_x \ll 1$  имеет вид

$$\begin{aligned} \lambda_{1,2} = & -\frac{[(1 - \tilde{C} + \tilde{d}^2)\tilde{\omega}^2 - \tilde{d}^2 - \tilde{k}_\beta + 2\tilde{d}\tilde{k}_{x\beta}]\tilde{\omega}^4}{(\tilde{\omega}^2 - 1)[\tilde{\omega}^2(1 - \tilde{C}) - \tilde{k}_\beta] - \tilde{k}_{x\beta}^2} \times \\ & \times \frac{1 \pm p}{\tilde{b}} \tilde{m} + O(\tilde{m}^2), \quad \lambda_{3,4} = -\tilde{b} + O(\tilde{m}), \\ \lambda_{5,8} = & -i(\tilde{\omega} + \Lambda_{5,8}^{(0)}) - \\ & -\tilde{b}_x \frac{\left[ \frac{(1 + \tilde{k}_\beta)(\Lambda_{5,8}^{(0)})^2 + \tilde{\omega}\tilde{C}\Lambda_{5,8}^{(0)} - 2(\tilde{k}_\beta - \tilde{k}_{x\beta}^2)\Lambda_{5,8}^{(0)}}{2\Lambda_{5,8}^{(0)}[(\Lambda_{5,8}^{(0)})^2 - \Lambda_{5,8}^{(0)}\tilde{C}\tilde{\omega} - \tilde{k}_\beta] + } \right] \Lambda_{5,8}^{(0)}}{\left[ \frac{2\Lambda_{5,8}^{(0)}[(\Lambda_{5,8}^{(0)})^2 - \Lambda_{5,8}^{(0)}\tilde{C}\tilde{\omega} - \tilde{k}_\beta] + }{+[(\Lambda_{5,8}^{(0)})^2 - 1](2\Lambda_{5,8}^{(0)} - \tilde{C}\tilde{\omega})} \right]} + \\ & + O(\tilde{b}_x^2), \quad \lambda_{9,12} = \bar{\lambda}_{5,8}, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $\Lambda_{5,8}^{(0)} \in R$  – корни уравнения

$$(\Lambda^2 - 1)(\Lambda^2 + \tilde{\omega}\tilde{C}\Lambda - \tilde{k}_\beta) - \tilde{k}_{x\beta}^2 = 0. \quad (14)$$

В случае симметричного расположения опор ( $\tilde{k}_{x\beta} \sim 0$ ) корни уравнения (14) находятся аналитически. При этом корни (13) принимают вид:

$$\begin{aligned} \lambda_{1,2} = & -\frac{(1 - \tilde{C} + \tilde{d}^2)\tilde{\omega}^2 - \tilde{d}^2 - \tilde{k}_\beta}{(\tilde{\omega}^2 - 1)[\tilde{\omega}^2(1 - \tilde{C}) - \tilde{k}_\beta]} \tilde{\omega}^4 \cdot \frac{1 \pm p}{\tilde{b}} \tilde{m} + O(\tilde{m}^2), \\ \lambda_{3,4} = & -\tilde{b} + O(\tilde{m}), \\ \lambda_{5,6} = & -i(\tilde{\omega} \mp 1) - \frac{1 - \tilde{k}_\beta \mp \tilde{\omega}\tilde{C}}{2(1 - \tilde{k}_\beta \pm \tilde{\omega}\tilde{C})} \tilde{b}_x + O(\tilde{b}_x^2), \\ \lambda_{7,8} = & -i(\tilde{\omega}\tilde{C} \mp \sqrt{\tilde{\omega}^2\tilde{C}^2 + 4\tilde{k}_\beta}) / 2 - \\ & - \frac{(1 + \tilde{k}_\beta)\tilde{k}_\beta}{\tilde{C}\tilde{\omega}(4\tilde{\omega}\tilde{C} \pm 3\sqrt{\tilde{\omega}^2\tilde{C}^2 + 4\tilde{k}_\beta})} \tilde{b}_x + O(\tilde{b}_x^2), \quad \lambda_{9,12} = \bar{\lambda}_{5,8}. \end{aligned}$$

Эти же корни в размерном виде

$$\begin{aligned} \lambda_{1,2} = & -\frac{\omega^4}{2} \frac{\sqrt{M(A - C_r + Md^2)}\omega^2 - k_\beta - d^2k_x}{\sqrt{k_x(\omega^2M - k_x)[\omega^2(A - C_r) - k_\beta]} \times \\ & \times \frac{1 \pm p}{b_r} m^2 n + O\left(\frac{m^2 n^2}{M^2}\right), \\ \lambda_{3,4} = & -\frac{b_r}{\kappa m} \sqrt{\frac{M}{k_x}} + O\left(\frac{mn}{M}\right), \\ \lambda_{5,6} = & -i\left(\omega \sqrt{\frac{M}{k_x}} \mp 1\right) + \\ & + \frac{b_x}{2\sqrt{Mk_x}} \frac{\omega \mp (Ak_x - Mk_\beta) / (\sqrt{Mk_x} C_r)}{\omega \pm (Ak_x - Mk_\beta) / (\sqrt{Mk_x} C_r)} + O\left(\frac{b_x^2}{k_x M}\right), \end{aligned}$$



$$\lambda_{7,8} = -i \frac{C_r}{2A} \sqrt{\frac{M}{k_x}} (\omega \mp \sqrt{\omega^2 + 4k_{\beta} A / C_r^2}) - \frac{(k_x A / C_r^2 + k_{\beta} M / C_r^2) k_{\beta} / k_x}{\omega (4\omega \pm 3\sqrt{\omega^2 + 4k_{\beta} A / C_r^2})} \frac{b_x}{\sqrt{Mk_x}} + O\left(\frac{b_x^2}{k_x M}\right),$$

$$\lambda_{9,12} = \bar{\lambda}_{5,8}.$$

#### Анализ устойчивости.

Корни  $\lambda_{3,12}$  имеют отрицательную действительную часть, а следовательно, соответствующие им частные решения асимптотически устойчивы при любых . Эти корни определяют быстрые переходные процессы, при которых практически прекращаются движения КГ относительно ротора и устанавливается движение ротора, соответствующее суммарному дисбалансу КГ и дисбаланса ротора. Скорость протекания быстрых переходных процессов зависит от параметров закрепления корпуса, массо-инерционных характеристик составного ротора, его скорости вращения, положения плоскости балансировки, сил вязкого сопротивления, действующих на КГ, и не зависит от уравновешиваемого дисбаланса, количества и положений КГ. Поэтому возможна отдельная оптимизация этих параметров роторной машины с целью скорейшего наступления ее автобалансировки.

Корни  $\lambda_{1,2}^{(1)}$  устойчивы при выполнении условия

$$\{(\tilde{\omega}^2 - 1)[\tilde{\omega}^2(1 - \tilde{C}) - \tilde{k}_{\beta}] - \tilde{k}_{x\beta}^2\} \times \times [(1 - \tilde{C} + \tilde{d}^2)\tilde{\omega}^2 - \tilde{d}^2 - \tilde{k}_{\beta} + 2\tilde{d}\tilde{k}_{x\beta}] > 0. \quad (15)$$

В размерном виде условие (15) имеет вид

$$\{(M\omega^2 - k_x)[\omega^2(A - C_r) - k_{\beta}] - k_{x\beta}^2\} \times \times [(A - C_r + Md^2)\omega^2 - d^2k_x - k_{\beta} + 2dk_{x\beta}] > 0. \quad (16)$$

Условие (16), с точностью до обозначений, получено и исследовано в работе [5] при помощи эмпирического критерия наступления автобалансировки, и в работе [14] – при помощи энергетического метода, основанного на применении функции Гамильтона. Условие (16) получено для многосферного, многомятникового или многошарового АБ и ротора, заключенного в упруго-вязко закреплённый корпус, а условия в работах [5, 14] получены для любого типа АБ и ротора на упругих опорах.

Корни  $\lambda_{1,2}^{(1)}$  соответствуют медленным переходным процессам – реакции КГ на движение ротора, установившееся после затухания быстрых переходных процессов. КГ медленно стремятся к автобалансировочному положению. При чрезмерном количестве КГ существует семья установившихся движений и КГ стремятся к одному из движений этой семьи. Скорость протекания медленных переходных процессов зависит уже и от уравновешиваемого дисбаланса, количества КГ и их текущих положений, но не зависит от сил сопротивления опор.

Полученные разложения корней позволяют оптимизировать параметры роторной машины из

условия наименьшего времени наступления автобалансировки.

Результаты работ [5, 14] позволяют сделать следующие заключения об условиях наступления автобалансировки.

*а) Для длинного составного ротора ( $C_r < A$ ):*

- если  $k_{x\beta} \neq 0$  или  $k_{x\beta} = 0$ ,  $\omega_{cч1} = \sqrt{k_x/M} \neq \omega_{cч2} = \sqrt{k_{\beta}/(A - C_r)}$  и  $d \neq 0$ , то машина имеет три разные резонансные частоты

$$\omega_{1,3} = \sqrt{\left\{ \omega_{cч1}^2 + \omega_{cч2}^2 \pm \sqrt{(\omega_{cч1}^2 - \omega_{cч2}^2)^2 + 4k_{x\beta}^2 / [M(A - C_r)]} \right\} / 2},$$

$$\omega_2 = \sqrt{k_x d^2 - 2k_{x\beta} d + k_{\beta}} / \sqrt{A - C_r + Md^2},$$

причем  $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$  и автобалансировка наступает при  $\omega \in (\omega_1, \omega_2) \cup (\omega_3, \infty)$ ;

- если  $k_{x\beta} = 0$ ,  $\omega_{cч1} \neq \omega_{cч2}$  и  $d = 0$ , то резонансная частота  $\omega_2$  совпадает с  $\omega_1$  при  $\omega_{cч1} > \omega_{cч2}$  или с  $\omega_3$  при  $\omega_{cч1} < \omega_{cч2}$  и автобалансировка, соответственно, наступает на скоростях  $\omega \in (\omega_1, \infty)$  или  $\omega \in (\omega_3, \infty)$ ;
- если  $k_{x\beta} = 0$  и  $\omega_{cч1} = \omega_{cч2}$ , то все три резонансные частоты совпадают –  $\omega_{1,2,3} = \omega_{cч1}$  и автобалансировка наступает на скоростях  $\omega \in (\omega_1, \infty)$ .

Для обеспечения наступления автобалансировки на как можно меньших скоростях вращения ротора нужно уменьшать жесткость закрепления корпуса ( $k_x, k_{\beta}$ ).

*б) Для сферического составного ротора ( $C_r = A$ ):*

- если  $k_{\beta} \neq k_{x\beta} d$ , то машина имеет две разные резонансные скорости

$$\omega_1 = \sqrt{(k_x - k_{x\beta}^2 / k_{\beta}) / M},$$

$$\omega_2 = \sqrt{(k_x d^2 - 2k_{x\beta} d + k_{\beta}) / (Md^2)},$$

причем  $\omega_1 < \omega_2$  и автобалансировка наступает на скоростях  $\omega \in (\omega_1, \omega_2)$  (если  $d \rightarrow 0$ , то  $\omega_2 \rightarrow +\infty$ ). При этом сферический ротор целесообразно уравновешивать в плоскости, проходящей через центр масс ротора и корпуса.

- если  $k_{\beta} = k_{x\beta} d$ , то резонансные скорости одинаковы ( $\omega_1 = \omega_2$ ) и область автобалансировки вырождается в точку.

*в) Для короткого составного ротора ( $C_r > A$ ):*

- если  $d^2 > (C_r - A) / M$ , то у машины существует единственная резонансная частота

$$\omega_1 = \sqrt{\left\{ \omega_{cч1}^2 - k_{\beta} / (C_r - A) + \sqrt{[\omega_{cч1}^2 + k_{\beta} / (C_r - A)]^2 - 4k_{x\beta}^2 / [M(C_r - A)]} \right\} / 2}$$

и автобалансировка наступает на скоростях  $\omega \in (\omega_1, \infty)$ ;

- если  $d^2 \leq (C_r - A) / M$ , то у машины появляется дополнительная резонансная частота

$$\omega_2 = \sqrt{(k_x d^2 - 2k_{x\beta} d + k_{\beta}) / (Md^2 - C_r + A)}, \quad \omega_2 > \omega_1$$

и автобалансировка наступает на скоростях  $\omega \in (\omega_1, \omega_2)$ .



Для обеспечения наступления автобалансировки на как можно меньших скоростях вращения ротора нужно уменьшать  $k_x$  и увеличивать  $k_p, k_{xp}$ .

#### Выводы

1. Корпус и ротор ведут себя как условный составной ротор – более массивный и удлиненный, чем сам ротор, и характеристики этого составного ротора влияют на процесс автобалансировки.
2. Если составной ротор длинный, то у машины существуют три резонансные скорости вращения ротора и автобалансировка наступает между первой и второй и над третьей скоростью. Если составной ротор сферический или короткий, то у машины существует одна или две резонансные скорости вращения ротора. При этом в случае двух резонансных скоростей автобалансировка наступает между этими скоростями, а в случае одной резонансной скорости автобалансировка наступает над этой скоростью для короткого составного ротора, и никогда не наступает для сферического составного ротора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thearle E.L. Automatic dynamic balancers. P. 1. Leblanc balancers // *Machine Design*. – 1950. – V. 22. – № 9. – P. 119–124.
2. Thearle E.L. Automatic dynamic balancers. P. 2. Ring, pendulum and ball balancers // *Machine Design*. – 1950. – V. 22. – № 10. – P. 103–106.
3. Ларри Дж. Автоматическое балансирование вращающихся масс // Сб. переводов и обзоров периодической иностранной литературы. – 1955. – Т. 23. – № 5. – С. 14–19.
4. Гусаров А.А. Автобалансирующие устройства прямого действия. – М.: Наука, 2002. – 119 с.
5. Філімоніхін Г.Б. Зрівноваження і віброзахист роторів автобалансирами з твердими коригувальними вантажами. – Кіровоград: КНТУ, 2004. – 352 с.
6. Нестеренко В.П. Автоматическая балансировка роторов приборов и машин со многими степенями свободы. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1985. – 84 с.
7. Нестеренко В.П. Теория и практика устройств автоматической балансировки роторов: автореф дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 1990. – 34 с.
8. Sperling L., Merten F., Duckstein H. Self-synchronization and automatic balancing in rotor dynamics // *Int. J. Rotating Machinery*. – 2000. – V. 6. – № 4. – P. 275–285.
9. Sperling L., Ryzhik B., Duckstein H. Two-plane automatic balancing // *Machine Dynamics Problems*. – 2001. – V. 25. – № 3/4. – P. 139–152.
10. Ryzhik B., Sperling L., Duckstein H. Display of the Sommerfeld-Effect in a Rigid Rotor One-plane Autobalancing Device // *Advanced Problems in Mechanics: Proc. of XXX Summer School*. – St. Petersburg, 2002. – P. 554–563.
11. Simulation of two-plane automatic balancing of a rigid rotor / L. Sperling, B. Ryzhik, Ch. Linz, H. Duckstein // *Mathematics and Computers in Simulation*. – 2002. – V. 58. – № 4–6. – P. 351–365.
12. Sperling L., Ryzhik B., Duckstein H. Single-Plain Auto-Balancing of Rigid Rotors // *Technische Mechanik*. – 2004. – V. 24. – № 1. – P. 1–24.

3. Переходные процессы, характеризующие наступление автобалансировки, делятся на: быстрые, при которых прекращаются быстрые движения КГ относительно ротора и устанавливается устойчивое движение ротора, соответствующее текущему суммарному дисбалансу; медленные, при которых КГ приходят в автобалансировочное положение, медленно двигаясь относительно ротора.
4. Скорость протекания быстрых переходных процессов зависит от параметров закрепления корпуса, массо-инерционных характеристик составного ротора, скорости вращения ротора, положения плоскости балансировки, сил вязкого сопротивления, действующих на КГ, и не зависит от уравниваемого дисбаланса, количества и положений КГ.
5. Скорость протекания медленных переходных процессов дополнительно зависит от уравниваемого дисбаланса, количества и положений КГ, но не зависит от сил сопротивления опор.

*Работа выполнена в соответствии с госбюджетной темой Министерства образования и науки Украины № 0105U001506, период выполнения 2012–2014 гг.*

13. Sperling L., Ryzhik B., Duckstein H. Single-Plain Auto-Balancing of Anisotropically Supported Rigid Rotors // *Technische Mechanik*. – 2004. – V. 24. – № 1. – P. 37–50.
14. Філімоніхін І.І. Застосування функції Гамільтона до визначення умов зрівноваження автобалансирами ротора, здійснюючого просторовий рух // *Збірник наукових праць КНТУ*. – 2007. – Вип. № 18. – С. 34–41.
15. Automatic two-plane balancing for rigid rotors / D.J. Rodrigues, A.R. Champneys, M.I. Friswell, R.E. Wilson // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. – 2008. – V. 43. – Iss. 6. – P. 527–541.
16. Lu Chung-Jen, Wang Ming-Cheng, Huang Shih-Hsuan. Analytical study of the stability of a two-ball automatic balancer // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2009. – V. 23. – Iss. 3. – P. 884–896.
17. Bolton J.N. Single- and dual-plane automatic balancing of an elastically mounted cylindrical rotor with considerations of coulomb friction and gravity: *Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering Mechanics*. – Blacksburg, Virginia, 2010. – 317 p.
18. Two-plane automatic balancing: A symmetry breaking analysis / D.J. Rodrigues, A.R. Champneys, M.I. Friswell, R.E. Wilson // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. – 2011. – V. 46. – Iss. 9. – P. 1139–1154.
19. Блехман И.И. Синхронизация динамических систем. – М.: Наука, 1971. – 896 с.
20. Філімоніхін Г.Б., Гончаров В.В. Методика складання диференціальних рівнянь руху роторних систем з автобалансирами і її застосування до системи ротор – масивний корпус – автобаланси́р // *Збірник наукових праць КНТУ*. – 2009. – Вип. 22. – С. 357–363.
21. Филимоныхин Г.Б., Гончаров В.В. Уравнивание автобаланси́ром ротора в упруго-вязко закрепленном корпусе с неподвижной точкой // *Известия Томского политехнического университета*. – 2014. – Т. 324. – № 2. – С. 71–77.

*Поступила 21.05.2014 г.*

UDC 62–752+62–755

## ROTOR BALANCING by AUTO-BALANCER IN VISCO-ELASTIC FIXED BED BEING IN SPATIAL MOTION

**Gennadiy B. Filimonikhin,**

Dr. Sc., Kirovograd National Technical University, 8, University Avenue,  
Kirovograd, 25006, Ukraine. E-mail: filimonikhin@yandex.ua

**Valery V. Goncharov,**

Cand. Sc., Kirovograd National Technical University, 8, University Avenue,  
Kirovograd, 25006, Ukraine. E-mail: matkora@yandex.ru.

*The relevance of the study is caused by the need to research rotor balancing by auto-balancers.*

**The main aim of the study** is to evaluate the transients during static balancing rotor with many corrective weights by auto-balancer. The rotor is placed in heavy visco-elastic fixed bed being in spatial motion; the rotor can spin there.

**The methods used in the study:** theory of stability of mechanical system steady motions; mathematical theory of motion stability by Lyapunov.

**The results:** the authors have determined the conditions of auto-balance occurring and have found out that:

- bed and rotor form conventionally the composite rotor, more massive and long; its characteristics influence auto-balancing;
- transients that characterize auto-balancing are divided into: fast – when corrective weights motion relative to rotor stop and rotor motion corresponding to the total imbalance of corrective weights and rotor imbalance is set; slow – when corrective weights come in auto-balancing position moving relative to rotor;
- flow rate of the fast transients depends on bed fixing parameters, inertia characteristics of the composite rotor, rotation speed, balancing plane position, viscous resistance forces influencing the corrective weights; it does not depend on rotor imbalance, quantity and positions of corrective weights;
- flow rate of slow transients depends additionally on rotor imbalance, number and positions of corrective weights, but it does not depend on resistance forces of supports.

### Key words:

Rotor, imbalance, auto-balancer, main motion, stability of motion.

*It is the taxpayer-funded research of the Ministry of Education and Science of the Ukraine № 0105U001506, 2012–2014.*

### REFERENCES

1. Thearle E.L. Automatic dynamic balancers. P. 1. Leblanc balancers. *Machine Design*, 1950, vol. 22, no 9, pp. 119–124.
2. Thearle E.L. Automatic dynamic balancers. P. 2. Ring, pendulum and ball balancers. *Machine Design*, 1950, vol. 22, no. 10, pp. 103–106.
3. Larri Dzh. Avtomaticheskoe balansirovanie vrashchayushchikhsya mass [Automatic balancing of rotating masses]. *Sbornik perevodov i obzorov periodicheskoy inostrannoy literatury* [Translations and reviews of periodic foreign literature]. Moscow, 1955, vol. 23, no 5, pp. 14–19.
4. Gusarov A.A. *Avtobalansiruyushchie ustroystva pryamogo deystviya* [Autobalancing direct action devices]. Moscow, Nauka Publ., 2002. 119 p.
5. Filimonikhin G.B. *Zrivnovazhennyya i vibrozakhyst rotoriv avtobalansirami z tverdymi korigovalnymi vantazhami* [Balancing and vibration protection of rotors by avtobalancers with solid corrective weights]. Kirovograd, KNTU Publ., 2004. 352 p.
6. Nesterenko V.P. *Avtomaticheskaya balansirovka rotorov priborov i mashin so mnogimi stepenyami svobody* [Automatic balancing of rotors of the devices and machines with many degrees of freedom]. Tomsk, Tomsk University Press, 1985. 84 p.
7. Nesterenko V.P. *Teoriya i praktika ustroystv avtomaticheskoy balansirovki rotorov. Avtoreferat Dokt. Dis.* [Theory and practice of devices of automatic rotors balancing. Dr. Diss. Abstract]. – Novosibirsk, 1990. – 34 p.
8. Sperling L., Merten F., Duckstein H. Self-synchronization and automatic balancing in rotor dynamics. *Int. J. Rotating Machinery*, 2000, vol. 6, no. 4, pp. 275–285.
9. Sperling L., Ryzhik B., Duckstein H. Two-plane automatic balancing. *Machine Dynamics Problems*, 2001, vol. 25, no. 3/4, pp. 139–152.
10. Ryzhik B., Sperling L., Duckstein H. Display of the Sommerfeld-Effect in a Rigid Rotor One-plane Autobalancing Device. *Proc. Of XXX Summer School «Advanced Problems in Mechanics»*. St. Peterburg, 2002. pp. 554–563.
11. Sperling L., Ryzhik B., Linz Ch., Duckstein H. Simulation of two-plane automatic balancing of a rigid rotor. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2002, vol. 58, no. 4–6, pp. 351–365.
12. Sperling L., Ryzhik B., Duckstein H. Single-Plane Auto-Balancing of Rigid Rotors. *Technische Mechanik*, 2004, vol. 24, no. 1, pp. 1–24.
13. Sperling L., Ryzhik B., Duckstein H. Single-Plane Auto-Balancing of Anisotropically Supported Rigid Rotors. *Technische Mechanik*, 2004, vol. 24, no. 1, pp. 37–50.
14. Filimonikhina I.I. Zastosuvannya funktsii Gamiltona do viznachennya umov zrivnovazhennyya avtobalansiramy rotora, zdiysnyuyuchogo prostorovery rukh [Applying Hamilton function to determine the conditions of rotor balancing by avtobalancers, making spatial movement]. *Zbirnyk naukovykh prats KNTU*, 2007, Iss. 18, pp. 34–41.
15. Rodrigues D.J., Champneys A.R., Friswell M.I., Wilson R.E. Automatic two-plane balancing for rigid rotors. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2008, vol. 43, Iss. 6, pp. 527–541.
16. Lu Chung-Jen, Wang Ming-Cheng, Huang Shih-Hsuan. Analytical study of the stability of a two-ball automatic balancer. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, vol. 23, Iss. 3, pp. 884–896.

17. Bolton J.N. Single- and dual-plane automatic balancing of an elastically mounted cylindrical rotor with considerations of coulomb friction and gravity. *Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering Mechanics*. Blacksburg, Virginia, 2010. 317 p.
18. Rodrigues D.J., Champneys A.R., Friswell M.I., Wilson R.E. Two-plane automatic balancing: A symmetry breaking analysis. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2011, vol. 46, Iss. 9, pp. 1139–1154.
19. Blekhman I.I. *Sinkhronizatsiya dinamicheskikh sistem* [The sync of dynamic systems]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 896 p.
20. Filimonikhin G.B., Goncharov V.V. Metodika skladannya dyferentsialnykh rivnyan rukhu rotornykh sistem z avtobalansirami i i'i' zastosuvannya do sistemy rotor – masyvny korpus – avtobalansir [Methodology of compiling differential equations of rotor system motion with avtobalancers and its application to rotor systems – a massive building – avtobalancer]. *Zbirnik naukovykh prats KNTU*, 2009, Iss. 22, pp. 357–363.
21. Filimonikhin G.B., Goncharov V.V. Uravnovesivanie avtobalansirov rotora v uprugovo-vyazkoy zakreplennom korpusy s nepodvizhnoy tochkoy [Rotor balancing in visco-elastic fixed casing with fixed point using avtobalancer]. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no 2, pp. 71–77.

Received: 21 May 2014.

УДК 621.86./87

## НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА КОМПЛЕКТА ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН ТРУБОУКЛАДОЧНОЙ КОЛОННЫ

**Щербаков Виталий Сергеевич,**

д-р техн. наук, профессор, декан факультета «Нефтегазовая и строительная техника» Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (СибАДИ), Россия, 644080, г. Омск, пр. Мира, д. 5.  
E-mail: sherbakov\_vs@sibadi.org

**Корытов Михаил Сергеевич,**

д-р техн. наук, профессор кафедры «Автомобили, конструкционные материалы и технологии» Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (СибАДИ), Россия, 644080, г. Омск, пр. Мира, д. 5. E-mail: kms142@mail.ru

**Шабалин Андрей Николаевич,**

аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов и электротехника» Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (СибАДИ), Россия, 644080, г. Омск, пр. Мира, д. 5.  
E-mail: andrei-shabalin@mail.ru

*В современной России из-за нестабильных политических отношений с соседними государствами реализуется крупная программа проектирования и строительства транснациональных магистральных трубопроводных систем. Обеспечение грузовой устойчивости комплекта машин трубоукладочной колонны является основной проблемой, с которой сталкиваются во время укладки трубопровода в траншею. Причинами потери краном-трубоукладчиком грузовой устойчивости являются: 1. малоопытные машинисты крана-трубоукладчика, которые, реагируя на частичную потерю грузовой устойчивости, чрезмерно разгружают свою машину, перегружая тем самым ее соседние; 2. неровности микрорельефа, по которому двигаются краны-трубоукладчики. Из всего сказанного можно сделать вывод о необходимости создания устройства управления трубоукладочной колонной, которое бы решило следующие проблемы: 1. предотвращение аварийных ситуаций в рабочем процессе трубоукладочной колонны; 2. облегчение труда машинистов крана-трубоукладчика; 3. уменьшение автоколебаний трубопровода; 4. обеспечение равной загрузки всех кранов-трубоукладчиков, входящих в трубоукладочную колонну.*

**Цель работы:** повышение безопасности рабочего процесса трубоукладочной колонны, предотвращение аварийной ситуации.

**Методы исследования** основываются на анализе и синтезе полученных результатов исследования; теоретические исследования базируются на математическом анализе, методах имитационного моделирования; экспериментальные исследования основаны на использовании теории планирования эксперимента и методах статистической обработки данных.

**Результаты:** На примере трубоукладочной колонны изучены особенности рабочего процесса комплекта грузоподъемных машин с целью обеспечения безопасности выполняемых работ. Предложена теоретическая концепция, основанная на компенсации возникающих во время рабочего процесса динамических воздействий на грузоподъемную технику. Разработано устройство управления комплектом машин, обеспечивающее грузovou устойчивость трубоукладочной колонны. Предложена перспективная модель крана-трубоукладчика с устройством стабилизации грузового момента.

### **Ключевые слова:**

Трубоукладочная колонна, комплект машин, кран-трубоукладчик, система управления, момент устойчивости, расчетная схема, однородные координаты.

### **Введение**

Обеспечение безопасности рабочего процесса грузоподъемных машин является актуальной проблемой по следующим причинам: *во-первых*, человек, занятый в производственном процессе, должен быть уверен в своей безопасности; *во-вторых*, аварийные ситуации приводят к большим финансовым затратам. Для обеспечения безопасности производственного процесса грузоподъемных машин создано множество различных устройств и систем безопасности, направленных на сохранение устойчивости грузоподъемных машин, принцип действия которых основан на огра-

ничении грузового момента, создаваемого самим краном. Данный подход работает для случая работы отдельно стоящей машины с собственным единственным грузом. В рабочем процессе комплекта машин с общим грузом есть свои особенности, которые делают все эти устройства неэффективными. Предложена теоретическая концепция обеспечения безопасности рабочего процесса комплекта грузоподъемных машин на примере трубоукладочной колонны, основанная на компенсации возникающих во время рабочего процесса динамических воздействий на грузоподъемную технику [1–6].

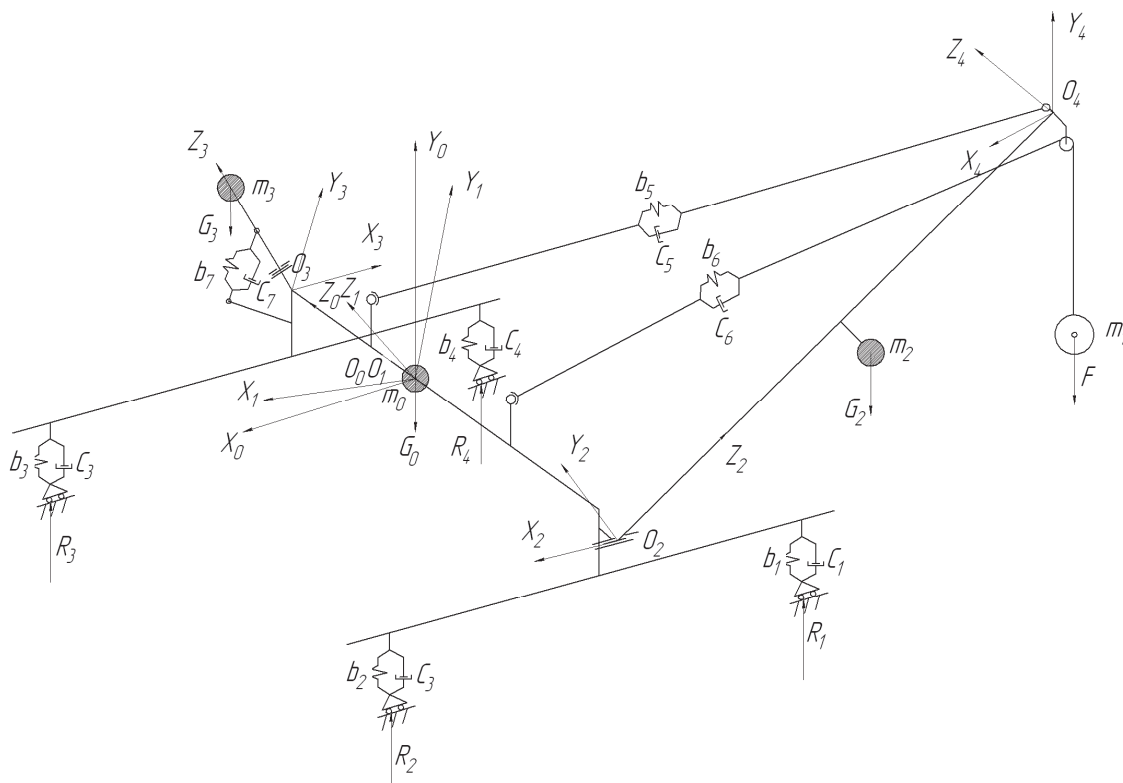
**Направления и методы повышения безопасности рабочего процесса комплекта грузоподъемных машин трубоукладочной колонны**

Типичным примером комплекта грузоподъемных машин является трубоукладочная колонна, состоящая из нескольких кранов-трубоукладчиков. Кран-трубоукладчик (КТ) – это строительная машина, созданная на базе трактора с увеличенной шириной базы и смещенным центром тяжести, оснащенного боковой стрелой А-образной формы [7, 8]. Рабочий процесс трубоукладочной колонны заключается в движении колонны вдоль трубопровода, поднятии его условно неограниченного участка с одновременным смещением к оси траншеи. Сложность задачи заключается в том, что укладка трубопровода требует согласованных действий всех участников рабочего процесса. На машинистов КТ колонны возложена корректировка расстояния между машинами, движущимися вдоль оси траншеи, угла наклона стрелы КТ, высоты подвеса крюковой обоймы КТ. При движении колонна перемещается по естественному рельефу, все КТ связаны между собой трубопроводом, что делает трубоукладочную колонну сложной динамической системой.

При движении трубоукладочной колонны по неровностям рельефа происходит постоянное перераспределение нагрузки между кранами трубоукладчиками, машинисты КТ не всегда правильно оценивают загруженность своих КТ и чрезмерно разгружают их, тем самым перегружая соседние

КТ. Поэтому высота подвеса крюковой обоймы должна регулироваться на основе текущего состояния высот всех КТ и их грузовых моментов. С целью предотвращения повреждения трубопровода расстояния между КТ должны варьироваться строго в рамках расстояний, указанных в технологической схеме, что зачастую машинисту КТ не удается выполнить. Трубоукладочная колонна – это сложная динамическая система, где взаимодействуют между собой две динамические системы: трубопровод и кран-трубоукладчик. Каждая из них имеет собственную частоту колебаний. При совпадении по частоте колебаний трубопровода и собственных колебаний КТ происходит вхождение всей трубоукладочной колонны в резонанс, в результате чего происходит опрокидывание колонны. Излишнее раскачивание трубопровода на крюках кранов-трубоукладчиков можно предотвратить, обеспечив плавный подъем и опускание крюковой обоймы и исключив излишние включения устройства управления [9, 10].

Для решения поставленной задачи необходимо разработать математическую модель сложной динамической системы «трубоукладочная колонна». Ее условно можно разделить на следующие подсистемы: краны-трубоукладчики, трубопровод, гидропривод, рельеф. Для создания универсальной математической модели, которая будет отражать особенности большинства существующих моделей КТ, необходимо разработать пространственные расчетные схемы КТ (рис. 1) и трубопровода (рис. 2).



**Рис. 1.** Обобщенная пространственная расчетная схема отдельного крана-трубоукладчика в составе трубоукладочной колонны

**Fig. 1.** Generalized three-dimensional design pattern of a single pipe-layer crane in pipe-laying column



При составлении пространственных обобщенных расчетных схем на основании анализа конструкций и условий работы КТ примем следующие допущения: 1) КТ и трубопровод являются голономными и стационарными системами; 2) КТ и трубопровод представляют собой шарнирно-сочлененные многозвенники с наложенными на них упруго-вязкими и динамическими связями; 3) Внешние силы, действующие на КТ и трубопровод, являются сосредоточенными; 4) Люфты и силы сухого трения в шарнирах отсутствуют; 5) Колебания элементов КТ и трубопровода малы.

На рис. 1 изображена пространственная обобщенная расчетная схема КТ, представляющего собой шарнирно-сочлененный многозвенник, звеньями которого являются: базовая машина массой  $m_1$ ; стрела КТ массой  $m_2$ ; противовес КТ массой  $m_3$ ; трубопровод массой  $m_4$  [7, 8, 11].

На рис. 2 представлена пространственная расчетная схема трубопровода, описанного в виде шарнирно-сочлененного многозвенника, звенья которого расположены вдоль оси трубопровода и по окружности с массами  $m_{ij}$  [12].

Для разработки динамической модели КТ и трубопровода применялся метод уравнений Лагранжа второго рода. Каждое из уравнений Лагранжа второго рода для голономной системы с числом степеней свободы, равным  $l$ , которым соответствуют обобщенные координаты  $q_j$  ( $j=1, \dots, l$ ), будет иметь вид [13, 14]:

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial K}{\partial \dot{q}_j} \right] - \frac{\partial K}{\partial q_j} + \frac{\partial P}{\partial q_j} + \frac{\partial \Phi}{\partial q_j} = F_j. \quad (1)$$

где  $t$  – время;  $q_j$  – обобщенная координата;  $K$  – кинетическая энергия;  $P$  – потенциальная энергия;  $\Phi$  – диссипативная функция;  $\dot{q}_j$  – обобщенная скорость;  $F_j$  – обобщенная сила, действующая по обобщенной координате.

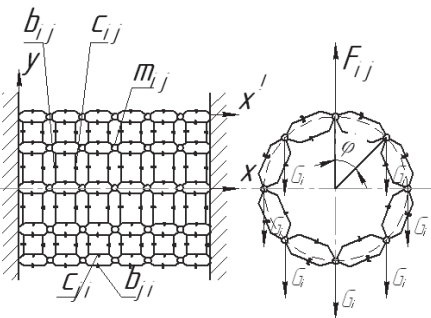


Рис. 2. Обобщенная пространственная расчетная схема трубопровода

Fig. 2. Generalized three-dimensional design pattern of a pipe-line

В векторно-матричной форме система дифференциальных уравнений будет иметь вид [13, 14]:

$$A \cdot \ddot{\vec{q}} + B \cdot \dot{\vec{q}} + C \cdot \vec{q} = \vec{F}, \quad (2)$$

где  $A, B, C$  – матрицы коэффициентов дифференциальных уравнений ( $A$  – матрица инерционных коэффициентов,  $B$  – матрица коэффициентов

демпфирования,  $C$  – матрица коэффициентов жесткости);  $q$ ,  $q'$ ,  $q$  – векторы соответственно ускорения, скорости и обобщенных координат;  $F$  – вектор внешних сил, действующих по обобщенным координатам.

После подстановки всех слагаемых в уравнение Лагранжа (1), (2), получим в общем виде уравнение системы дифференциальных уравнений [13–16]:

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{\ell} tr[U_{ij} H_i U_{iv}^T] \dot{q}'_j + \sum_{u=1}^n \sum_{v=1}^{\ell} tr[M_{uj} B_u M_{uv}^T] \dot{q}'_j + \sum_{u=1}^n \sum_{j=1}^{\ell} tr[M_{uj} N_u M_{uv}^T] \dot{q}_j + \sum_{i=1}^k m_i g G^T U_{iv} \vec{R}_i = \sum_{r=1}^m \vec{F}_r U_{iv} \vec{R}_{ir}. \quad (3)$$

Коэффициенты дифференциальных уравнений являются функциями больших значений обобщенных координат и конструктивных параметров.

Результатом решения системы дифференциальных уравнений (3), как с замороженными, так и с переменными коэффициентами, являются временные зависимости изменения обобщенных координат, отражающие изменение положения элементов КТ в пространстве.

Математическая модель КТ вида (3), составленная на основе предложенной методики, позволяет решать задачи статики, кинематики и динамики, проводить исследования КТ в различных эксплуатационных режимах.

Используя данную математическую модель, можно исследовать зависимость грузового момента КТ от всех факторов, существенно влияющих на устойчивость отдельного КТ и трубоукладочной колонны в целом.

Для обеспечения безопасности рабочего процесса трубоукладочной колонны предлагается установить систему автоматического управления, которая будет корректировать расстояния между машинами и контролировать равную загруженность всех КТ, регулируя высоту подвеса крюковой обоймы [17].

Данная система использует в качестве первичных информационных параметров следующие величины:  $F$  – сила на крюке;  $\alpha$  – угол наклона КТ в поперечной плоскости;  $l$  – расстояние до идущего позади КТ;  $n$  – число оборотов грузовой лебедки;  $\gamma$  – угол наклона стрелы КТ.

В качестве сигналов управления выступают  $i_{\text{упр}}$  – сигнал изменения высоты подвеса крюковой обоймы,  $l_{\text{упр}}$  – сигнал изменения расстояния между КТ.

Для компенсации динамических воздействий, вызванных неровностями рельефа, по которому движутся КТ, и воздействий, вызванных колебаниями трубопровода, на КТ предлагается установить устройство стабилизации грузового момента, принципиальная схема которого представлена на рис. 3. Принцип действия устройства стабилизации заключается в том, что на базовую машину –

1 дополнительно устанавливается упруго-вязкая связь – 8, один конец которой неподвижно закреплен, а к другому прикреплен шкив – 9, через который проходит грузовой канат – 4. Параметры упруго-вязкой связи подобраны так, что при приближении грузового момента к моменту устойчивости происходит удлинение грузового каната и перераспределение нагрузки между различными КТ колонны. Принцип работы устройства стабилизации грузового момента (УСГМ) заключается в следующем: КТ, работающий в колонне, двигается по неровностям микрорельефа. Это приводит к тому, что высота подвеса крюковой обоймы КТ постоянно изменяется. Изменение высоты подвеса крюковой обоймы – 6 приводит к перераспределению нагрузки между КТ трубоукладочной колонны. На одних КТ нагрузка увеличивается, на других – уменьшается. Машинисты КТ не успевают реагировать на изменение силы на крюке. Установка на КТ упруговязкого элемента – 8 со шкивом – 9 позволяет снизить влияние неровностей микрорельефа на изменение динамических нагрузок и на устойчивость единичных КТ и трубоукладочной колонны в целом. При достижении нагрузкой на крюковой обойме – 6 значения, больше необходимого для устойчивого движения КТ, пружина – 8 начинает растягиваться. Это приводит к опусканию крюковой обоймы на значение, достаточное для выравнивания нагрузки с соседними КТ. После снижения нагрузки на крюковой обойме – 6 пружина – 8 сжимается.

Основными требованиями, которым должна удовлетворять система управления, являются: динамическая устойчивость колонны, предотвращение излома трубопровода и облегчение труда машинистов КТ. Безопасность работ, прежде всего, связана с устойчивостью колонны, что достигается равномерной загруженностью КТ за счет изменения высоты крюковой обоймы и расстояния между

КТ и изменением частоты колебания трубопровода, с целью исключения ситуации совпадения частоты колебания трубопровода и отдельных КТ.

Частотный спектр динамических воздействий трубопровода на КТ достаточно широк, его условно можно разделить на две группы: высокочастотные и низкочастотные воздействия. На поперечную устойчивость КТ оказывают влияние низкочастотные колебания. Особую опасность представляют резонансные частоты, когда собственные частоты колебаний элементов КТ совпадают с частотой воздействий. Поэтому основной задачей УСГМ является предотвращение совпадения по частоте этих колебаний. Используя описанную математическую модель КТ и результаты экспериментальных исследований, можно определить частоту собственных колебаний КТ и трубопровода.

Для расчета колебаний УСГМ необходимо знать массу на крюке отдельного КТ, приведенные коэффициенты жесткости и вязкости УСГМ, а также передаточное отношение полиспаста. Уравнение движения крюковой обоймы КТ в случае применения УСГМ будет иметь вид неоднородного дифференциального уравнения второго рода:

$$\frac{m}{i} \cdot y'' + by' + cy = F_0(t), \quad (4)$$

где  $m$  – масса груза;  $i$  – кратность полиспаста;  $b$  – вязкость УСГМ;  $c$  – жесткость УСГМ;  $F_0$  – сила, действующая на крюковую обойму;  $t$  – время.

Передаточная функция данного колебательно-го звена:

$$W(p) = \frac{k}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}, \quad (5)$$

где  $p$  – оператор Лапласа,  $k=1/c$ ,  $T_1=m/c$ ,  $T_2=b/c$ .

Введено понятие  $\xi$  – коэффициента колебательности:

$$\xi = T_2 / (2T_1), \quad (6)$$

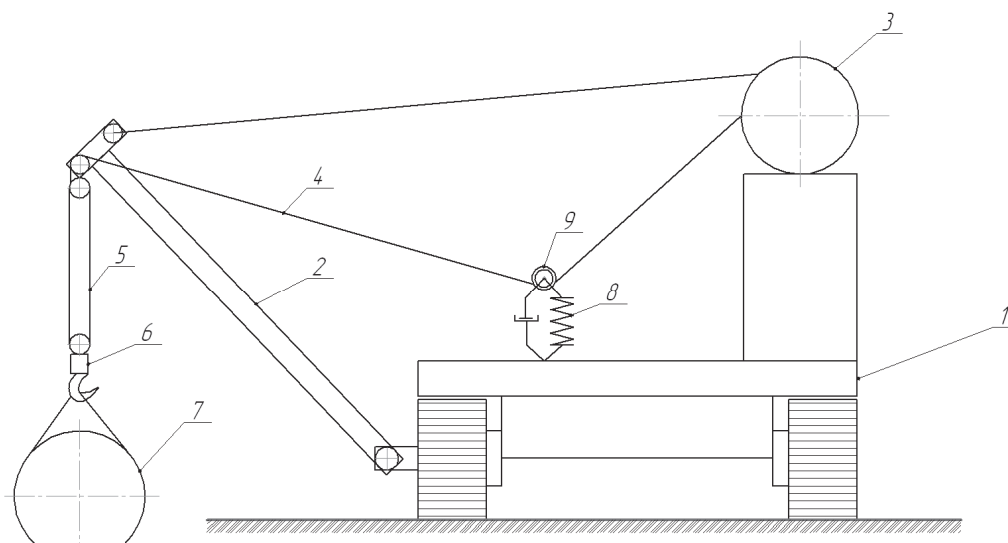
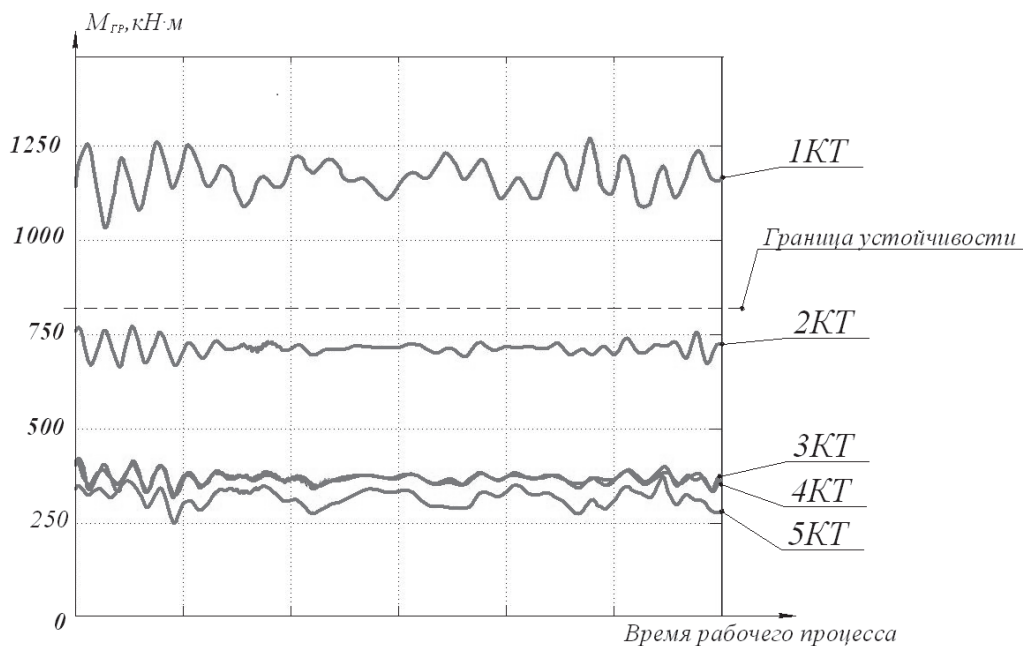


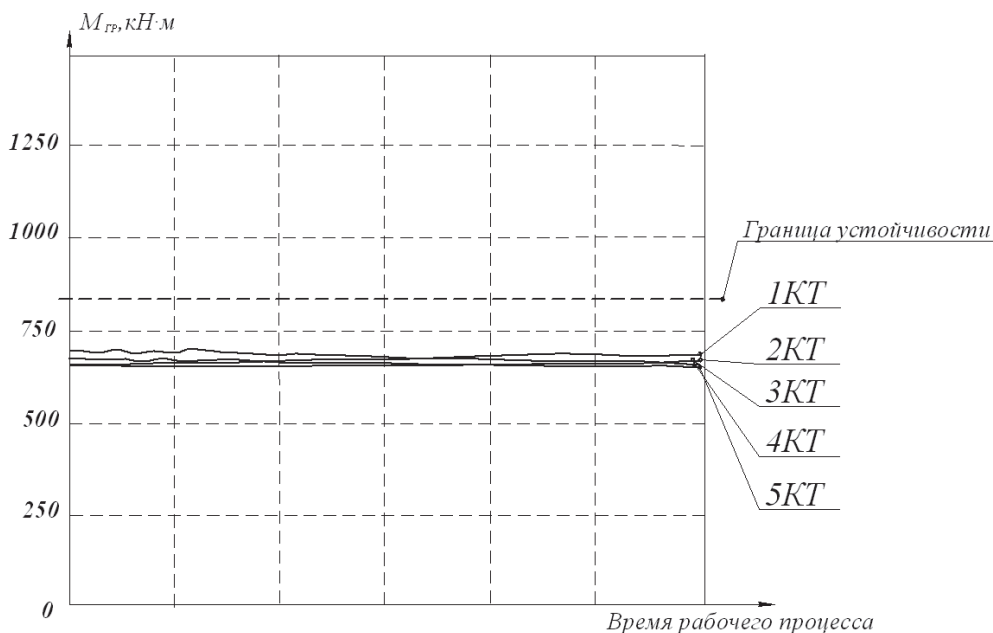
Рис. 3. Схема устройства стабилизации грузового момента крана-трубоукладчика

Fig. 3. Diagram of a stabilization device of a pipe-layer crane cargo moment



**Рис. 4.** Графическая зависимость изменения грузового момента кранов-трубоукладчиков, входящих в состав трубоукладочной колонны с типовыми устройствами безопасности

**Fig. 4.** The curve of changing cargo moment of pipe-layer cranes in pipe-laying column with typical safety device



**Рис. 5.** Графическая зависимость изменения грузового момента кранов-трубоукладчиков, входящих в состав трубоукладочной колонны с системой автоматического управления и устройством стабилизации грузового момента

**Fig. 5.** The curve of changing cargo moment of pipe-layer cranes in pipe-laying column with automated control system and cargo moment stabilization device

При подстановке коэффициента колебательности в уравнение (5) получено выражение:

$$W(p) = k / (T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1), \quad (7)$$

Если  $\xi < 1$ , то звено колебательное; если  $\xi \geq 1$ , то колебательное звено вырождается в апериодическое звено 2-го порядка.

При проведении теоретических исследований в качестве примера была исследована колонна из пяти КТ марки ТГ-50З номинальной грузоподъемностью 50 т на плече 2,5 м. Производит данную марку КТ Чебоксарский тракторный завод. Был исследован трубопровод диаметром 1420 мм, с толщиной стенки 40 мм. Марка стали Ст 20. Скорость движения колонны была принята равной 1 м/с.

Статистические параметры микрорельефа принимали значения:  $\alpha_1=0,53 \text{ с}^{-1}$ ;  $\alpha_2=0,138 \text{ с}^{-1}$ ;  $\beta_1=0,79 \text{ с}^{-1}$ ;  $\beta_2=3,7 \text{ с}^{-1}$ . Время моделирования было принято равным 100 с.

Моделировался установленный на КТ марки ТГ-503 типовой гидронасос НШ-100А-50А3 с номинальным давлением 16 МПа. Его рабочий объем 250 см<sup>3</sup> при угловой скорости 157 рад/с, подача  $35,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{рад}$  (335 л/мин).

Оценить эффективность внедрения автоматической системы управления и УСГМ можно с помощью функциональной зависимости грузового момента  $M_{гр}$  кранов-трубоукладчиков без данных устройств (рис. 4) и с ними (рис. 5). Для этого математическая модель сложной динамической системы была смоделирована в программном продукте MATLAB [18–22].

По функциональным зависимостям видно, что грузовые моменты отдельных КТ в колонне без автоматической системы управления и УСГМ сильно отличаются друг от друга. Диапазон значений около 1000 кН/м. Крайние КТ сильно перегружены, в то время как КТ, находящиеся в середине колонны, имеют малую загруженность, что недопустимо, т. к.

это приводит к потере грузовой устойчивости всей трубоукладочной колонны. При этом неровности микрорельефа вызывают динамические воздействия высокой частоты в диапазоне 200 кН/м, что приводит к обрывам грузовых канатов и преждевременному износу навесного и ходового оборудования.

#### Заключение

Анализ результатов проведенных исследований позволил сделать следующие выводы. Для обеспечения безопасности рабочего процесса трубоукладочной колонны недостаточно типовых устройств безопасности, применяемых на грузоподъемной технике, необходимо внедрение устройств, которые будут компенсировать появляющиеся внешние динамические воздействия. Внедрение системы автоматического управления и устройства стабилизации грузового момента не только облегчает труд машинистов, но и делает его безопасным, поскольку грузовые моменты различных КТ в колонне при этом стремятся к одинаковому значению, не превышая при этом момент устойчивости КТ. Максимальный грузовой момент наименее устойчивого КТ колонны снизился на 48 %.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Куляшов А.П., Тютнев И.А. Нагрузки, действующие на трубоукладчики при выполнении технологического процесса // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2011. – № 1. – С. 148–152.
- Дудников Ю.В. Влияние надземных нагрузок на напряжённо-деформированное состояние подземного трубопровода // Межотраслевой журнал для главных специалистов предприятий «Химическая техника». – 2006. – № 9. – С. 42–43.
- Петров И.П., Калюшин К.И. Расстановка механизмов и выбор типа трубоукладчиков при производстве изоляционно-укладочных работ на трубопроводах большого диаметра // Труды ВНИИСТ. – 1968. – Вып. 15. – С. 86–90.
- Федоров В.М. Динамика передвижения строительно-монтажных гусеничных кранов с грузом на крюке: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1976. – 210 с.
- Хомиченко С.А. Разработка методов укладки магистральных газопроводов в условиях Заполярья: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2007. – 164 с.
- Тихонов Ю.Б. Повышение устойчивости изоляционно-укладочной колонны путем совершенствования систем управления кранами-трубоукладчиками: дис. ... канд. техн. наук. – Омск, 2003. – 199 с.
- Строительство магистральных трубопроводов: справочник / В.Г. Чирсков и др. – М.: Недра, 1991. – 474 с.
- Строительная, дорожная и специальная техника: краткий справочник / Н.А. Манаков, А.А. Глазов, А.В. Понкратов и др. – М.: АО «Профтехника», 1996. – 304 с.
- Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов. – М.: НПО ОБТ, 1993. – 245 с.
- РД 50–233–81. Методические указания: надежность в технике. Оценка параметров безопасности колесных и гусеничных машин по опрокидыванию. Характеристики статической и динамической устойчивости. – М.: Изд-во Стандартов, 1981. – 63 с.
- Раад В.Ф. Повышение грузовой устойчивости трубоукладчиков // Гидропривод и системы управления строительных и дорожных машин. – Омск: ОмПИ, 1987. – С. 62–66.
- Корытов М.С., Манник П.Ю. Метод составления уравнений динамики для исследования движения подъемно-транспортных машин в больших перемещениях // Дорожные и строительные машины (исследование, испытание и расчет): Сб. науч. тр. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2001. – Вып. 4. – Ч. 4. – С. 72–79.
- Пол Р. Моделирование, планирование траекторий и управление движением робота-манипулятора: пер. с англ. – М.: Наука, 1976. – 104 с.
- Щербаков В.С., Корытов М.С., Шабалин А.Н. Совершенствование методов управления машинными комплексами, обеспечивающих оптимизацию рабочего процесса трубоукладочной колонны // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 180–188.
- Шабалин А.Н. Математическое описание трубопровода для создания систем управления трубоукладочной колонной // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2012. – № 3. – С. 134–136.
- Петров И.П., Камерштейн А.Г., Долгов В.К. Расчет напорных стальных трубопроводов на прочность. – М.: Госстройиздат, 1955. – 166 с.
- Щербаков В.С., Корытов М.С., Шабалин А.Н. Алгоритм процесса управления положением крюковой обоймы грузоподъемного крана // Вестник СибАДИ. – 2013. – № 3. – С. 107–113.
- Alvin A. Modeling and Analysis of Hydraulic Load Sensing: PhD Thesis. – Parma, 2004. – 251 p.
- Mitrev R., Gruychev R., Pobegailo P. CAD/CAE investigation of a large hydraulic mining excavator // Machine design. – 2011. – V. 3. – № 1. – P. 17–22.
- Manfred H. Modeling, simulation and control design for large and heavy manipulators // Journal of Robotics and Autonomous Systems. – 1996. – № 19. – P. 167–177.
- Caso P., Anthony A., Rigosi M. Modeling of an Excavator System – Semi Empirical Hydraulic Pump Model // SAE Int. J. Commer. Veh. – 2011. – № 4 (1). – P. 242–255.
- Beater P., Otter M. Multi-Domain Simulation: Mechanics and Hydraulics of an Excavator // Proc. of the 3<sup>rd</sup> International Modelling Conference. – Linkong, November 3–4, 2003. – P. 331–340.

Поступила 29.06.2014 г.



UDC 621.86./87

## DIRECTIONS IN DEVELOPING SAFETY THEORY OF WORKING PROCESS FOR A LOAD-LIFTING CARS SET OF A PIPE-LAYING COLUMN

**Vitaly S. Shcherbakov,**

Dr. Sc., the Siberian Automobile and Highway Academy, 5, Mira Avenue, Omsk,  
644080, Russia. E-mail: sherbakov\_vs@sibadi.org

**Mikhail S. Korytov,**

Dr. Sc., the Siberian Automobile and Highway Academy, 5, Mira Avenue, Omsk,  
644080, Russia. E-mail: kms142@mail.ru

**Andrey N. Shabalin,**

the Siberian Automobile and Highway Academy, 5, Mira Avenue, Omsk,  
644080, Russia. E-mail: andrei-shabalin@mail.ru

*A large-scale program of designing and constructing transnational pipeline systems is implemented in modern Russia because of its unstable political relations with neighboring states. The main problem when laying pipeline in a trench is ensuring cargo stability of a set of pipe-laying column cars. There are some reasons of losing cargo stability by a pipe layer crane: 1. inexperienced drivers. They react to partial loss of cargo stability and unload excessively the car, overloading the next pipe-layer crane; 2. roughness of a microrelief. The conclusion can be drawn on designing a control unit for a pipe-laying column to solve the following problems: 1. prevention of emergencies in pipe-laying column operation; 2. simplification of a pipe-layer crane driver work; 3. reduction of pipeline self-oscillations; 4. equal load of all pipe layer cranes of a pipe-laying column.*

**The main aim of the study** is to increase safety of a pipe-laying column operation; to prevent emergency.

**The methods used in the study** are based on the analysis and synthesis of the results received in the research; theoretical researches are based on mathematical analysis, methods of imitating modeling; pilot studies are based on use of the experiment planning theory and the methods of statistical data processing.

**The results:** Based on the example of a pipe-laying column the authors have studied the features of a load-lifting cars set operation to ensure safety of the works; have proposed the theoretical concept based on compensation of dynamic impacts on load-lifting equipment arising at operation; have designed the cars set control unit, providing cargo stability of a pipe-laying column. The paper introduces the perspective model of the pipe layer crane with the cargo moment stabilization device.

### Key words:

Pipe-laying column, set of cars, pipe-layer crane, control system, stability moment, settlement scheme, uniform coordinates.

### REFERENCES

1. Kulyashov A.P., Tyutnev I.A. Nagruzki, deystvuyushchie na truboukladchiki pri vypolnenii tekhnologicheskogo protsesssa [Loads effecting the pipe layer at the process]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva*, 2011, no. 1, pp. 148–152.
2. Dudnikov Yu.V. Vliyaniye nadzemnykh nagruzok na napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye podzemnogo truboprovoda [Influence of above-ground loads on stress-strain behavior of underground pipeline]. *Mezhotraslevoy zhurnal dlya glavnykh spetsialistov predpriyatiy «Khimicheskaya tekhnika»*, 2006, no. 9, pp. 42–43.
3. Petrov I.P., Kaloshin K.I. Rasstanovka mekhanizmov i vybor tipa truboukladchikov pri proizvodstve izolyatsionno-ukladochnykh rabot na truboprovodakh bolshogo diametra [Mechanism arrangement and choice of pipe layers at pipe-laying at big-inch pipe-lines]. *Trudy VNIIST*, 1968, Iss. 15, pp. 86–90.
4. Fedorov V.M. *Dinamika peredvizheniya stroitelno-montaznykh gusenichnykh kranov s gruzom na kryuke. Dis. Kand.nauk* [Dynamics in movement of building and installation crawler cranes. Cand. Diss.]. Moscow, 1976. 210 p.
5. Khomichenko S.A. *Razrabotka metodov ukladki magistralnykh gazoprovodov v usloviyakh Zapolyarya. Dis. Kand. nauk* [Development of methods of installing main pipe-lines in polar regions. Cand. diss.]. Moscow, 2007. 164 p.
6. Tikhonov Yu.B. *Povyisheniye ustoychivosti izolyatsionno-ukladochnoy kolonny putem sovershenstvovaniya sistem upravleniya kranami-truboukladchikami. Dis. Kand. nauk* [Increasing stability of pipe-laying column improving the control systems of pipe layer cranes. Cand. Diss.]. Omsk, 2003. 199 p.
7. Chirskov V.G. *Stroitelstvo magistralnykh truboprovodov: spravochnik* [Installation of main pipelines: reference book]. Moscow, Nedra Publ., 1991. 474 p.
8. Manakov N.A., Glazov A.A., Ponkratov A.V. *Stroitel'naya, dorozhnaya i spetsial'naya tekhnika: kratkiy spravochnik* [Civil, road and special machinery: brief reference book]. Moscow, Prof-tehnika Publ., 1996. 304 p.
9. *Pravila ustroystva i bezopasnoy ekspluatatsii gruzopodemnykh kranov* [Rules of arrangement and safety of lifting cranes]. Moscow, NPO OBT Publ., 1993. 245 p.
10. *RD 50–233–81. Metodicheskie ukazaniya: nadezhnost v tekhnike. Otsenka parametrov bezopasnosti kolesnykh i gusenichnykh mashin po oprokidyvaniyu. Kharakteristiki staticheskoy i dinamicheskoy ustoychivosti* [Methodical instructions: industrial product dependability. Estimation of rollover safety parameters for wheel and track vehicles. Characteristics of static and dynamic stability]. Moscow, Izdatelstvo Standartov, 1981. 63 p.
11. Raats V.F. *Povyisheniye gruzovoy ustoychivosti truboukladchikov* [Increasing stability under working conditions of pipe layers]. *Gidroprivod i sistemy upravleniya stroitelnykh i dorozhnykh mashin* [Hydraulic gear and control systems of building and road machines]. Omsk, OmPI, 1987. pp. 62–66.
12. Korytov M.S., Mannik P.Yu. *Metod sostavleniya uravneniy dinamiki dlya issledovaniya dvizheniya podemno-transportnykh mashin v bolshikh peremeshcheniyakh* [Method of dynamic equation generation for investigating movement of handling machine-



- ry in large displacements]. *Dorozhnyie i stroitelnyie mashiny (issledovanie, ispytanie i rashchet): Sbornik nauchnykh trudov* [Road and civil machinery (investigation, tests and calculation)]. Omsk, SibADI publ., 2001. Iss. 4, Ch. 4, pp. 72–79.
13. Pol R. *Modelirovanie, planirovanie traektoriy i upravlenie dvizheniem robota-manipulyatora* [Modeling, trajectory planning and movement control of robot manipulator]. Translated from English. Moscow, Nauka Publ., 1976. 104 p.
  14. Shcherbakov V.S., Korytov M.S., Shabalin A.N. Sovershenstvovanie metodov upravleniya mashinnymi kompleksami, obespechivayushchikh optimizatsiyu rabocheho protsessa truboukladnoy kolonny [Improving the methods for controlling machine systems optimizing the operation process of pipe laying column]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki*, 2013, no. 4 (28), pp. 180–188.
  15. Shabalin A.N. Matematicheskoe opisanie truboprovoda dlya sozdaniya sistem upravleniya truboukladnoy kolonnoy [Mathematical description of pipe line for developing control systems of pipe laying column]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*, 2012, no. 3, pp. 134–136.
  16. Petrov I.P., Kamershteyn A.G., Dolgov V.K. *Raschet napornykh stalnykh truboprovodov na prochnost* [Strength design of pressure steel pipe lines]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1955. 166 p.
  17. Shcherbakov V.S., Korytov M.S., Shabalin A.N. Algoritm protsessa upravleniya polozheniem kryukovoy oboymy gruzopodemnogo krana [Algorithm of a position control of hook block in lifting crane]. *Vestnik SibADI*, 2013, no. 3, pp. 107–113.
  18. Alvin A. *Modeling and Analysis of Hydraulic Load Sensing: PhD Thesis*. Parma, 2004. 251 p.
  19. Mitrev R., Gruychev R., Pobegailo P. CAD/CAE investigation of a large hydraulic mining excavator. *Machine design*, 2011, vol. 3, no. 1, pp. 17–22.
  20. Manfred H. Modeling, simulation and control design for large and heavy manipulators. *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, 1996, no. 19, pp. 167–177.
  21. Caso P., Anthony A., Rigosi M. Modeling of an Excavator System – Semi Empirical Hydraulic Pump Model. *SAE Int. J. Commer. Veh.*, 2011, no. 4 (1), pp. 242–255.
  22. Beater P., Otter M. Multi-Domain Simulation: Mechanics and Hydraulics of an Excavator. *Proc. of the 3<sup>rd</sup> International Modelling Conference*. Linkong, November 3–4, 2003. pp. 331–340.

Received: 29 June 2014.

УДК 631.36:628.51

## МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

**Куц Виктор Петрович,**

канд. техн. наук, профессор каф. пищевых технологий Тернопольского национального технического университета им. Ивана Пулюя, Украина, 46001, г. Тернополь, ул. Руська, 56. E-mail: Victor\_Kuts@tstu.edu.ua

**Слободян Степан Михайлович,**

д-р техн. наук, профессор каф. геологии и разработки нефтяных месторождений Института природных ресурсов ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: sms\_46@ngs.ru

*Актуальность работы обусловлена необходимостью очистки техногенных выбросов предприятий.*

**Цель работы:** Создание методики расчетов эффективности созданных пылеулавливающих систем – центробежно-инерционных с жалюзийным отводом воздуха, мокрых и магнитных.

**Методы исследования:** системный подход с применением аналитических расчетов, методы численного анализа и исследования экспериментальных образцов пылеуловителей.

**Результаты:** Изложена методика расчета эффективности созданных пылеулавливающих систем – центробежно-инерционных с жалюзийным отводом воздуха, мокрых и магнитных. Оценена их эффективность в условиях, отличающихся от условий эксперимента, для обеспечения нормативной остаточной концентрации пыли в выбросах с учетом надежности работы пылеуловителей при эксплуатации.

Описан метод оценки эффективности созданных авторами конструкций и принципа действия новых устройств с использованием анализа дисперсного состава пылевидных материалов. Рассматривается концепция интегрированных моделей и конструкций конкретных устройств и систем для анализа дисперсного состава пылевидных материалов, которая объединяет новые и известные взаимно дополняющие методы и средства анализа дисперсного состава пылевидных материалов. Работа посвящена исследованию проблемы оценки для различных логических моделей и принципа действия практических конструкций новых устройств для анализа дисперсного состава пылевидных материалов. Применение предложенных устройств позволяет значительно сократить длительность анализа по сравнению с известными методами: седиментометрии – разделение частиц по размерам, вторым – по скорости движения частиц в воздушной среде. Рассматриваются возможности решения проблемы экологии, в том числе возможные варианты оценки состояния загрязнения водной и воздушной среды городов выбросами промышленных предприятий и транспорта. Изложена методика расчетов эффективности созданных новых и усовершенствованных пылеулавливающих систем – центробежно-инерционных с жалюзийным отводом воздуха, мокрых и магнитных. В работе показано, что учёт уравнений взаимосвязи параметров новых устройств с применением предложенного метода анализа дисперсного состава порошков и пылевидных материалов обуславливает отличие от нуля погрешностей оценки, что позволяет решить проблему оценки размеров частиц, фракций, контроля и диагностики вне рамок традиционных подходов решения этой проблемы.

### **Ключевые слова:**

Оценка, эффективность, пыль, улавливание, предельно допустимая концентрация (ПДК), ступенчатая система.

### **Введение**

Очистка техногенных выбросов предприятий является весьма актуальной в наше время проблемой. Её решению в настоящее время уделяется много внимания [1–12]. Однако полностью обеспечить требования к допустимому остаточному содержанию пыли в выбросах промышленных и вентиляционных установок только с помощью одного пылеуловителя [1–5] удается очень редко. Ведь применение даже самого эффективного пылеулавливающего аппарата возможно только при достаточно малом содержании пыли в газовых средах, подлежащих очистке. При сильной запыленности газовой среды (200...300 г/м<sup>3</sup>) приходится использовать несколько аппаратов, причем на каждой следующей ступени должны использоваться пылеуловители более высокого класса, чем на предыдущих. Ступенчатый подход объединения средств очистки применяют в следующих случаях. Во-первых, для достижения концентрации пыли в выбросах уловителями с меньшей, чем это необхо-

димо, эффективностью. Во-вторых, когда хотят получить из первых ступеней очистки, в которых, как правило, используют сухие пылеуловители (пылеосадительные камеры, циклоны), крупнодисперсный порошок, пригодный для применения в технологии, или более удобный для транспортировки, чем шлам мокрых пылеуловителей.

Анализ последних исследований и публикаций показывает [1–10], что в разных странах постоянно создаются новые технические средства для предотвращения загрязнения воздушной среды и борьбы с ним, причем более совершенные и, как правило, более сложные, что отражается на их стоимости, которая составляет от 10 до 40–50 % стоимости оборудования основного производства. При этом развитие пылеочистного оборудования [11–18] идет как путем создания качественно новых типов аппаратов, так и создания пылеуловителей, в которых сочетаются принципы действия нескольких уже известных аппаратов. Во втором случае удается не только повысить эффективность очистки и

снизить ее стоимость в сравнении с одиночным применением отдельных аппаратов, принцип действия которых сочетается, но и уменьшить производственные площади, занимаемые этим оборудованием. Положительные результаты исследований одного из первых пылеуловителей, с сочетанием принципов действия центробежных и жалюзийных аппаратов [13, 14], и успешная эксплуатация аппаратов такого типа на нескольких предприятиях стали убедительным доказательством целесообразности их создания и продолжения поисков путей улучшения их основных показателей работы.

С развитием теории и практики пылеулавливания в 50-х гг. прошлого века появился качественно новый тип аппаратов – аппараты со встречным закрученными потоками или вихревые аппараты, которые, как и циклоны, являются аппаратами центробежного действия. Эти пылеуловители позволяют эффективно улавливать частицы пыли размером 3...5 мкм, которые трудно удаляются даже самыми эффективными циклонами. Их применяют в горнодобывающей, пищевой, химической и многих других отраслях промышленности для очистки газов в сушилках, мельницах, смесителях. От циклонов вихревые пылеуловители отличаются наличием в них двух встречных в осевом направлении закрученных потоков: нижнего (первичного) и верхнего (вторичного).

#### Основные положения

При использовании рукавных фильтров обычно предварительное отделение части пыли необходимо при начальной её концентрации, превышающей 20 г/м<sup>3</sup>, или при необходимости фракционирования частиц уловленного материала путем выделения крупных фракций в первой степени очистки.

Эффективность пылеуловителя или суммарная эффективность пылеулавливающей установки  $E$ , % должна быть не менее величины

$$E = \frac{C_H - C_K}{C_H} \cdot 100, \quad (1)$$

где  $C_H$  – концентрация твердых частиц в воздухе, поступающем на очистку, мг/м<sup>3</sup>;  $C_K$  – конечная концентрация твердых частиц в очищенном воздухе, мг/м<sup>3</sup>. Величина  $C_K$  должна быть не больше допустимой остаточной концентрации, которая определяется по формуле

$$C_K = (160 - 4L) \cdot k,$$

где  $L$  – расход запыленного воздуха, тыс. м<sup>3</sup>/ч;  $k$  – коэффициент, зависящий от ПДК ( $k=0,3-1$ ). При  $L > 15$  тыс. м<sup>3</sup>/ч  $C_K = 100 k$ .

При наличии значительных подсосов воздуха эффективность более точно выразится формулой

$$E = \frac{L_H C_H - L_K C_K}{L_H C_H},$$

где  $L_H$  и  $L_K$  – расход, соответственно, запыленного и очищенного воздуха.

Эффективность отдельных ступеней, например, двухступенчатой установки, определяется по формулам:

$$\text{первой ступени: } E_1 = \frac{C_H - C_1}{C_H} \cdot 100; \quad (2)$$

$$\text{второй ступени: } E_2 = \frac{C_1 - C_K}{C_1} \cdot 100, \quad (3)$$

где  $C_1$  и  $C_K$  – соответственно, концентрация пыли в воздухе на выходе пылеуловителей, первой и второй (конечной) ступеней. Значения этих концентраций находятся из формул (2) и (3):  $C_1 = C_H - C_H E_1$  и  $C_K = C_1 - C_1 E_2$ .

После подстановки и преобразований получим

$$C_K = C_1 + C_H (E_1 E_2 - E_2). \quad (4)$$

Формула для общей эффективности имеет вид

$$E_{1,2} = E_1 + E_2 (1 - E_1). \quad (5)$$

Аналогично для трехступенчатой установки

$$E_{1,2,3} = E_{1,2} + E_3 (1 - E_{1,2}). \quad (6)$$

Полученные формулы на стадии проектирования позволяют оценить эффективность пылеуловителя конечной ступени очистки, необходимую для обеспечения нормируемой остаточной запыленности очищенного выброса [11–12] или же необходимое количество ступеней очистки.

#### Экспериментальные исследования

Результаты экспериментальных исследований трех конструкций [13–15] пылеулавливающих аппаратов: жалюзийно-вихревого, батарейного циклона с жалюзийными элементами и циклона со ступенчатым отводом пыли, говорят о том, что по эффективности и гидравлическому сопротивлению они превосходят известные в настоящее время аппараты центробежной очистки – циклоны.

Улучшение этих показателей обусловлено сочетанием в предложенных пылеуловителях двух принципов разделения запыленных потоков: центробежного, как в циклонах, и жалюзийных (прохождение через решетки). Все типы аппаратов испытывались по требованиям стандартной методики, рекомендованной для такого пылеочистного оборудования. Исследования проводились в два этапа: сначала, на первом этапе, на не запыленном воздухе определялись гидродинамические характеристики и изучалось влияние на них режимных и конструктивных параметров, а затем определялась эффективность пылеулавливания и исследовалось влияние на нее тех же параметров. В качестве экспериментальной использовалась кварцевая пыль с медианным распределением диаметра частиц  $\delta_{50} = 8$  мкм плотностью  $\rho_H = 2650$  кг/м<sup>3</sup>. Начальная концентрация пыли в воздухе, поступающем в аппарат, составляла  $C_H = 3$  г/м<sup>3</sup>.

В натуральных испытаниях учтены конструктивные особенности каждого аппарата для использования в полной мере их преимуществ и устранения

выявленных недостатков. Это позволило получить результаты, не вызывающие сомнений в их достоверности.

Самый высокий показатель эффективности пылеулавливания в жалюзийно-вихревом пылеуловителе диаметром 0,16 м составляет 96 %. Его эффективность выше эффективности аппарата со встречными закрученными потоками (без жалюзи решетки).

Оптимальные значения режимных и конструктивных параметров:

- а) скорость в поперечном плане (сечении) аппарата составляет 3,7 м/с;
- б) скорость прохождения воздуха через жалюзийную решетку близка к 4,5 м/с. Эту скорость при оптимальных значениях расходов в пылеуловителях такой конструкции обеспечивает жалюзийная решетка с коэффициентом живого сечения  $k_p=0,4$ ;
- в) количество направляющих спиральных перегородок в завихрителях как первичного, так и вторичного воздушных потоков составляет 4;
- г) соотношение расходов вторичного и первичного потоков равно 2,3;
- д) гидравлическое сопротивление пылеуловителя при этом составляет  $\Delta p=1155$  Па, коэффициент гидравлического сопротивления  $\zeta=132$ .

В батарейном циклоне с жалюзийными элементами наивысшая эффективность достигает 93 % при следующих значениях параметров:

- а) скорость в поперечном сечении (плане) циклонных элементов близка к 3,5 м/с;
- б) скорость прохождения воздуха через жалюзийные решетки циклонных элементов находится в пределах 4,5–5,0 м/с;
- в) направляющие аппараты в циклонных элементах – аппараты типа «розетка»;
- г) гидравлическое сопротивление пылеуловителя составляет 753 Па, а коэффициент гидравлического сопротивления  $\zeta=102$ .

При использовании направляющих аппаратов типа «винт» максимальная эффективность пылеулавливания достигает 91 % при гидравлическом сопротивлении 502 Па (коэффициент гидравлического сопротивления  $\zeta=68$ ).

Максимальный показатель эффективности пылеулавливания в циклоне со ступенчатым отводом пыли составляет 95 % для аппарата диаметром 0,4 м, и 96 % – для аппарата диаметром 0,1 м при следующих режимных и конструктивных параметрах:

- а) скорость пылегазового потока на входе в аппарат находится в пределах 25–28 м/с;
- б) скорость потока в сечении аппарата в пределах 3,5–4,0 м/с;
- в) скорость прохождения воздуха через жалюзийную решетку в пределах 4–5 м/с;
- г) гидравлическое сопротивление аппаратов при этом составило 850 Па, коэффициент гидравлического сопротивления, отнесенный к входной скорости, равен 1,84, а коэффициент сопротивления, отнесенный к скорости в поперечном се-

чении аппарата, – 115 для пылеуловителя диаметром 0,4 м, а для пылеуловителя диаметром 0,1 м с гидравлическим сопротивлением 790 Па коэффициенты сопротивления 1,91 и 107.

### Результаты и их обсуждение

В процессе экспериментальных исследований эффективность пылеулавливания, достигнутая во всех трех типах предложенных пылеуловителей с жалюзийным отводом воздуха, довольно высокая. Она выше эффективности других существующих пылеуловителей того же класса, однако достичь норм остаточного содержания пыли в очищенном воздухе только за счет применения одного любого из аппаратов оказалось невозможным. Поэтому рекомендовать их применение можно в качестве ступеней очистки перед аппаратами высших классов. Для применения аппаратов [13–15] в конкретных условиях производства следует учесть специфику этих условий и внести коррективы в показатели, полученные при исследованиях в лабораторных условиях. В процессе создания экспериментальных образцов пылеуловителей, с проведением соответствующего объема исследований и опытной эксплуатацией, разработана методика теоретического определения конструктивных размеров и основных показателей пылеуловителей, которая позволяет на стадии проектирования систем пылеочистки оценивать целесообразность применения в них того или иного комплекта систем, с учетом используемых вариантов комплексирования базовых пылеуловительных устройств. Для проверки достоверности и целесообразности принятых при создании конструктивных решений и замыслов любое новое оборудование должно быть испытано по общепринятой для такого класса оборудования методике, а полученные результаты должны быть пригодными для сравнения с показателями существующих аппаратов. Для пылеуловителей известная методика предусматривает определение основных показателей их работы – гидравлического сопротивления и эффективности очистки – и влияния на эти показатели режимных и конструктивных параметров. Гидравлическое сопротивление определяется на не запыленном газе, а для определения эффективности используют стандартную пыль, требования к которой регламентированы той же методикой. Различие данных эксперимента и расчетных по изложенной методике при определении гидравлического сопротивления составляет 12 %, а при определении эффективности пылеулавливания – 6 % [16].

Эксплуатационные свойства всех типов предложенных пылеуловителей, которые будут работать в условиях, отличающихся от тех, для которых известны экспериментальные данные по фракционной эффективности, могут быть предусмотрены на основе имеющихся данных путем сопоставления с экспериментальными данными [16]:

- 1) при изменении плотности пыли размер частиц новой пыли, которые будут улавливаться с той



- же эффективностью, что и частицы заданного размера тестовой пыли, может быть найден путем умножения размера тестовой пыли на величину, равную отношению:  $(\text{плотность тестовой пыли}/\text{плотность новой пыли})^{1/2}$ ;
- 2) при изменении объемной скорости газового потока, проходящего через пылеуловитель, при новом расходе размер частиц, которые будут улавливаться с той же эффективностью, что и частицы тестового размера при экспериментальном расходе, может быть рассчитан путем умножения размера частиц экспериментальной пыли на величину, определяемую соотношением:  $(\text{экспериментальный расход}/\text{новый расход})^{1/2}$ ;
- 3) при изменении вязкости газа (например, связанном с изменением температуры газа) размер частиц при равной эффективности можно найти умножением размера частицы тестовой пыли на величину отношения:  $(\text{новая вязкость}/\text{тестовая вязкость})^{1/2}$ ;
- 4) при изменении диаметра пылеуловителя (циклонного элемента батарейного циклона), но при сохранении геометрического подобия с экспериментальным аппаратом, размер частиц для равной эффективности может быть найден умножением размера частицы экспериментального циклона на величину корня квадратного из отношения:  $(\text{диаметр новой модели}/\text{диаметр экспериментальной модели})^{1/2}$ .

Так как разработанные пылеуловители (жалюзийно-вихревой, батарейный циклон с жалюзийными элементами, циклон со ступенчатым отводом пыли), исследованные на экспериментальном стенде, имели различную производительность и различные диаметры, целесообразно оценить их эффективность при одинаковой производительности, воспользовавшись приведенными выше множителями.

Если принять конкретное значение расхода газового потока (производительность пылеуловителя), например  $3000 \text{ м}^3/\text{час}$  ( $0,83 \text{ м}^3/\text{с}$ ), то для жалюзийно-вихревого пылеуловителя производительностью  $0,07 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $250 \text{ м}^3/\text{час}$ ) поправочный множитель для исчисления размера частиц при изменении расхода составит  $\sqrt{0,07/0,83}=0,29$ .

Для батарейного циклона с жалюзи элементами производительности  $0,55 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $2000 \text{ м}^3/\text{час}$ ) без изменения диаметра циклона элементов (самых эффективных, с наименьшим рекомендованным размером) при изменении расхода изменится только количество циклонных элементов. Итак, при производительности  $3000 \text{ м}^3/\text{час}$  ( $0,83 \text{ м}^3/\text{с}$ ) их количество должно быть в 1,5 раза больше, чем в исследованном аппарате, то есть 12.

Для циклона со ступенчатым отводом пыли поправочный множитель для аппарата производительностью  $0,44 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $1600 \text{ м}^3/\text{час}$ ) равен:  $\sqrt{0,44/0,83}=0,73$ ; для аппарата производительностью  $0,0277 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $100 \text{ м}^3/\text{с}$ ):  $\sqrt{0,0277/0,83}=0,18$ .

Однако внесение поправки на изменение производительности в пылеуловителе выглядит не совсем корректным без установления определенных границ таких изменений, например не более  $\pm 20\%$  от оптимальной производительности, ведь конструкции аппаратов рассчитываются по оптимальным значениям скоростей в них. Значительное изменение этих скоростей может очень существенно повлиять в первую очередь на гидравлическое сопротивление аппарата и не привести к улучшению эффективности.

Если же сделать перерасчет диаметра частиц, которые полностью улавливаются в аппарате другого размера, по формуле

$$d'_c = d_c \sqrt{D'/D},$$

(где  $d'_c$  – диаметр частиц, улавливаемых в новом аппарате, м;  $d_c$  – диаметр частиц, улавливаемых в исследованном аппарате, м;  $D'$  – диаметр нового аппарата, м;  $D$  – диаметр исследованного аппарата, м), а затем по графику интегральной функции распределения экспериментального пыли определить эффективность очистки в новом аппарате, то для жалюзийно-вихревого пылеуловителя производительностью  $3000 \text{ м}^3/\text{час}$  ( $0,83 \text{ м}^3/\text{с}$ ) она составит  $93\%$  (диаметр аппарата при этом  $0,53 \text{ м}$ ), а для циклона со ступенчатым отводом пыли –  $92\%$  (диаметр аппарата при этом  $0,55 \text{ м}$ ).

Эти значения эффективности позволяют определить эффективность очистки системой той же производительности  $3000 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $0,83 \text{ м}^3/\text{с}$ ) с одним из рассматриваемых уловителей на первой ступени и, например, мокрого пылеуловителя [17] – на второй ступени, эффективность которого составляет  $98,5\%$ . Предельно допустимая концентрация пыли в очищенном воздухе составляет  $5 \text{ мг}/\text{м}^3$ . Используя формулу (5), можно найти значение эффективности этой двухступенчатой установки  $E_{1,2}$ . Из формулы (1) можно определить предельное значение начальной зависимости газового потока, при которой можно достичь нормируемого значения  $C_k$ .

Наибольшую начальную запыленность газового потока, который можно очистить до ПДК в трехступенчатой установке из циклона со ступенчатым отводом пыли, жалюзийно-вихревого пылеуловителя и мокрого пылеуловителя, можно определить, используя формулы (5), (6) и (1). Расчетное значение начальной запыленности при этом составит величину равную  $C_k=60 \text{ г}/\text{м}^3$ . Значит, для очистки газов с большей запыленностью на первой ступени очистных систем нужно использовать пылеуловители других типов, которые позволили бы уловить основную часть пыли. Для очистки газов от пыли с ферромагнитными свойствами на конечной ступени очистки можно использовать предложенный автором магнитный пылеуловитель [18].

Определение областей рационального применения, разработка методики определения технико-экономических показателей способствовали ускорению практического применения созданных ап-



паратов в конкретных условиях разных производств. Разработанные авторами пылеуловители с успехом эксплуатируются на семи предприятиях различных отраслей с высокой эффективностью и надежностью.

#### Заключение

Результаты анализа говорят о том, что использование в очистных системах предложенных пылеуловителей позволяет достичь допустимого остаточного содержания пыли в выбросах промышленных и вентиляционных установок при некотором начальном содержании пыли в газах, поступающих на очистку. При большей начальной запыленности необходимо применять пылеочистные аппараты, способные существенно уменьшать пылевые нагрузки на следующие ступени очистных систем. Максимальная начальная запыленность газового потока, при которой можно достичь ПДК пыли в очищенном воздухе в пылеулавливающей установке из указанных пылеуловителей, составляет 60 г/м<sup>3</sup>. Повышение чувствительности, снижение погрешности измерений и более точная оценка меры и объема промышленных

выбросов загрязнений природной среды приводят к необходимости использования для целей оценки выбросов более точных оптических и других электромагнитных волновых методов контроля и диагностики сред и веществ. В средствах и системах автоматического контроля и диагностики состояния концентрации пыли в наблюдаемом пространстве и в выбросах абсорберов и пылеуловителей [1–10] весьма эффективным решением станет применение оптических и лазерных, в том числе гетеродинных, интерферометрических и доплеровских, методов и фотоприёмных систем, обеспечивающих высокую чувствительность, фемтосекундное быстроедействие и дистанционный контроль [4, 10, 19–24]. Постоянное совершенствование используемых в настоящее время методов, методик и приборов контроля пылевого и аэрозольного промышленного загрязнения воздушной и водных сред приводит к необходимости применения новых технических средств для предотвращения загрязнения среды и борьбы с ним, причем более совершенных. Они, как правило, и более сложные, что отражается на стоимости решения задач [1–10, 19–22].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Arffman A., Marjamäki M., Keskinen J. Simulation of low pressure impactor collection efficiency curves // *Journal of Aerosol Science*. – 2011. – V. 42. – № 5. – P. 329–340.
- Investigation of solid particle number measurement: Existence and nature of sub-23 nm particles under PMP methodology / Z. Zheng, C. Kent, Z. Liu, T. Durbin, S. Hu, T. Huai, D. Kittelson, H. Jung // *Journal of Aerosol Science*. – 2011. – V. 42. – № 12. – P. 883–897.
- Modelling and measurement of particle deposition for cell exposure at the air-liquid interface / A. Comouth, H. Saathoff, K. Naumann, S. Muelhopt, H. Paur, T. Leisner // *Journal of Aerosol Science*. – 2013. – V. 63. – № 1. – P. 103–110.
- Milián C., Skryabin D. Soliton families and resonant radiation in a micro-ring resonator near zero group-velocity dispersion: erratum // *Optics Express*. – 2014. – V. 22. – Iss. 7. – P. 8068–8069.
- Evaluation of composition-dependent collection efficiencies for the aerodyne aerosol mass spectrometer using field data / A. Middlebrook, R. Bahreini, J. Jimenez, M. Canagaratna // *Aerosol Science and Technology*. – 2012. – V. 46. – № 3. – P. 258–271.
- Littringer E., Mescher A. Spray Drying of Mannitol as a Drug Carrier – The Impact of Process Parameters on Product Properties // *Drying Technology*. – 2012. – V. 30. – № 1. – P. 114–124.
- Бадалян Л.Х., Курдюков В.Н., Алейникова А.М. Теоретические основы системы учёта фактических выбросов загрязняющих веществ автотранспортом // *Безопасность жизнедеятельности*. – 2013. – № 5. – С. 31–37.
- Шмиголь И.Н., Володин А.М., Тимашков К.В. Интенсифицированный абсорбер для улавливания диоксида серы из дымовых газов // *Энергетик*. – 2013. – № 12. – С. 48–49.
- Дева В.С., Слободян С.М. Физическая модель пространства скользящего взаимодействия сред // *Известия Алтайского государственного университета*. – 2013. – № 1/1 (77). – С. 157–161.
- Микрофизические параметры и элементный состав атмосферного аэрозоля в г. Барнауле в 2006–2008 гг. / В.Ю. Бортников, В.И. Букатый, И.В. Рябинин, Г.А. Семенов // *Известия Алтайского государственного университета*. – 2009. – № 1 (59). – С. 103–107.
- Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха. – М.: Стройиздат, 1981. – 296 с.
- Белевицкий А.М. Проектирование газоочистительных сооружений. – Л.: Химия, 1990. – 228 с.
- Жалюзийно-вихревой пылеуловитель: пат. Украина № 23900; заявл. 24.06.96; опубл. 31.08.98. Бюл. № 4. – 6 с.
- Батарейный циклон с жалюзийными элементами: пат. Украина № 59139; заявл. 24.02.03; опубл. 15.08.03. Бюл. № 8. – 4 с.
- Циклон повышенной эффективности со ступенчатым отводом твердой фазы: пат. Украина № 62320; заявл. 04.03.03; опубл. 15.12.03. Бюл. № 12. – 4 с.
- Страус В. Промышленная очистка газов / пер. с англ. – М.: Химия, 1981. – 616 с.
- Аппарат для мокрого пылеулавливания: пат. на полезную модель Украина № 35760; заявл. 03.03.08; опубл. 16.10.08. Бюл. № 19. – 2 с.
- Устройство для удаления аэрозольных частиц из газового потока: пат. на полезную модель Украина № 39426; заявл. 09.09.08; опубл. 25.02.09. Бюл. № 4. – 2 с.
- Slobodyan S.M. Optimizing phase-space scanning by a dynamic system for monitoring chaotic media // *Measurement Techniques*. – 2006. – V. 49. – № 1. – P. 1–6.
- Арутюнов В.А., Слободян С.М. Исследование ПЗС-датчика волнового фронта адаптивно-оптической системы фокусировки излучения // *Приборы и техника эксперимента*. – 1985. – № 1. – С. 160–162.
- Регистрация импульсного лазерного излучения фотоприемником на основе матрицы ПЗС / В.Ф. Волков, А.К. Пешель, С.М. Слободян, И.С. Тырышкин // *Приборы и техника эксперимента*. – 1981. – № 6. – С. 176–178.
- Слободян С.М. Диссекторные гетеродинные системы // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1986. – № 6. – С. 62–72.
- Slobodyan S.M. Investigation of the correlation between direct and specular-reflected waves // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. – 1992. – V. 1693. – P. 492–494.
- Slobodyan S.M., Kohanov V.I., Shishigin S.A. Time trend of spectral radiation from laser spark // *11<sup>th</sup> International conference on spectral line shapes: Scientific program and abstract*. – Carry le Rouet, June 8–12, 1992. – P. A01–A02.

Поступила 27.03.2014 г.

UDC 631.36:628.51

## METHOD FOR ESTIMATING DEDUSTING SYSTEM EFFICIENCY

Viktor P. Kuts,

Cand. Sc., I. Pulyuya Ternopil National Technical University, 565, Russian street,  
Ternopil, 46001, Ukraine. E-mail: Victor\_Kuts@tstu.edu.ua

Stepan M. Slobodyan,

Dr. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,  
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: sms\_46@ngs.ru

The urgency of the discussed issue is caused by the need to provide the technology of industrial recycling of technogenic dust in air of mining enterprises.

**The main aim of the study** is to develop the technique for calculating the efficiency of the existing dedusting systems – centrifugal inertia with air exhaust louver, wet and magnetic ones.

**The methods used in the study:** system approach with analytic calculations, methods of experiment measurements and investigations of dedusting systems.

**The results:** The paper introduces the technique for calculating the efficiency of the developed dedusting systems: centrifugal inertia with air exhaust louver, wet and magnetic ones. To ensure regulatory residual dust concentration in emissions taking into account the reliability of dust collectors in their operation the authors have estimated the efficiency of the systems under conditions differing from the experimental ones. The paper describes the technique, design and operation principle of new devices for analyzing dust particulate materials. The article considers the concept of integrated models and constructions of certain devices and systems to analyze dust particulate materials. The concept combines new and existing complementary methods, and means of analysis of dust particulate materials. The work is devoted to investigation of estimation problem for different logical models and mode of operation of new devices for the analysis of dust particulate materials. Application of the devices proposed can significantly reduce duration of analysis in comparison with the known methods: in one device the separation of the particle size is done by sedimentometer, in another device – by particle motion rate in the air. The paper considers the concept of integrated ecology problems which combines complementary methods and devices for the analysis of dust particulate materials and powders disperse composition. The authors propose the methodology for calculating the efficiency of the developed dedusting systems: the centrifugal inertia with air exhaust louver, wet and magnetic ones. It is shown that the account of equations of parameters connections in new devices applying a new analyzing technique for powder and dedusting materials particle distribution determines the difference from zero of estimations approximations. It allows solving the estimation problem of particle sizes, fractions, control and diagnosis out-of-frame of traditional approaches to the problem solution.

**Key words:**

Estimation, efficiency, dust, dedusting, maximum permissible concentration (MPC), step system.

## REFERENCES

- Arffman A., Marjamäki M., Keskinen J. Simulation of low pressure impactor collection efficiency curves. *Journal of Aerosol Science*, 2011, vol. 42, no. 5, pp. 329–340.
- Zheng Z., Kent C., Liu Z., Durbin T., Hu S., Huai T., Kittelson D., Jung H. Investigation of solid particle number measurement: Existence and nature of sub-23 nm particles under PMP methodology. *Journal of Aerosol Science*, 2011, vol. 42, no. 12, pp. 883–897.
- Comouth A., Saathoff H., Naumann K., Muelhopt S., Paur H., Leisner T. Modelling and measurement of particle deposition for cell exposure at the air-liquid interface. *Journal of Aerosol Science*, 2013, vol. 63, no. 1, pp. 103–110.
- Milián C., Skryabin D. Soliton families and resonant radiation in a micro-ring resonator near zero group-velocity dispersion: erratum. *Optics Express*, 2014, vol. 22, Iss. 7, pp. 8068–8069.
- Middlebrook A., Bahreini R., Jimenez J., Canagaratna M. Evaluation of composition-dependent collection efficiencies for the aerodyne aerosol mass spectrometer using field data. *Aerosol Science and Technology*, 2012, vol. 46, no. 3, pp. 258–271.
- Litringer E., Mescher A. Spray drying of mannitol as a drug carrier—the impact of process parameters on product properties. *Drying Technology*, 2012, vol. 30, no. 1, pp. 114–124.
- Badalyan L.H., Kurdyukov V.N., Aleynikova A.M. Teoreticheskie osnovy sistemy ucheta vrednykh vybrosov transporta [Theoretical bases of the system of transport emissions calculation]. *Bezopasnost zhiznedeyatelnosti – Life safety*, 2013, no. 5, pp. 31–37.
- Shmigol I.N., Volodin A.M., Timashkov K.V. Intensifitsirovanny absorber dlya ulavlivaniya dioksida sery iz gaza [Intensification absorber for sulfur dioxide dedusting from gas]. *Energetik*, 2013, no. 12, pp. 48–49.
- Deeva V.S., Slobodyan S.M. Fiziceskaya model prostranstva skolyashchego kontakta sred [Sliding space model of media physical contact]. *Izvestiya ASU*, 2013, no. 1/1 (77), pp. 157–161.
- Bortnikov V.Yu., Bukaty V.I., Ryabinin I.V., Semenov G.A. Mikrofizicheskie parametry i elementny sostav atmosfernogo aerosolya v Barnaule v 2006–2008 gg. [Microphysic parameters and elemental composition of atmospheric aerosol in Barnaul in 2006–2008]. *Izvestiya ASU*, 2009, no. 1 (59), pp. 103–107.
- Pirumov A.I. *Obespylivanie vozdukh* [Air dedusting]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1981. 296 p.
- Belevitsky A.M. *Proektirovanie gazoochistnykh sooruzheniy* [Design of gas treatment facilities]. Leningrad, Khimiya Publ., 1990. 228 p.
- Kuts V.P., Kaspruk V.B., Pleskun M.I. *Zhalyuziyno-vikhrevoyy puleulovitel* [The jalousie dedusting system]. Patent UA, no. 23900, 1996.
- Kuts V.P., Yarosh Ya.D., Martsiyash O.M. *Batareyny tsikhlon s zhalyuziynymi elementami* [The exhaust cyclone in jalousie elements]. Patent UA, no. 59139, 2003.
- Kuts V.P., Martsiyash O.M., Yarosh Ya.D. *Tsikhlon povyshennoy effektivnosti so stupenchatym otvodom tverdogo fazy elementami* [High efficiency cyclone with step separation of solid phase by the elements]. Patent UA, no. 62320, 2003.

16. Straus V. *Promyshlennaya ochistka gasa* [Industrial gas dedusting]. Moscow, Khimiya Publ., 1981. 616 p.
17. Kuts V.P., Gorishna G.P., Martsiyash O.M. *Apparat dlya mokrogo pyleulavlivaniya* [The apparatus for wet dust exhaust]. Patent UA, no. 35760, 2008.
18. Kuts V.P. *Ustroystvo dlya udaleniya aerosolnykh chastits iz gazovogo potoka* [The devices for separating aerosol particles from gas flow]. Patent UA, no. 39426, 2009.
19. Slobodyan S.M. Optimizing phase-space scanning by a dynamic system for monitoring chaotic media. *Measurement Techniques*, 2006, vol. 49, no. 1, pp. 1–6.
20. Arutyunov V.A., Slobodyan S.M. Investigation of a CCD Wave Front Sensor of an Adaptive Optics Radiation Focusing System. *Instruments and Experimental Techniques*, 1985, vol. 28, pp. 160–162.
21. Volkov V.F., Peshel A.K., Slobodyan S.M., Tyryshkin I.S. Registration of a pulsed laser beam by a matrix of charge-coupled devices. *Instruments and Experimental Techniques*, 1981, no. 6, pp. 176–178.
22. Slobodyan S.M. Dissektornye geterodinnye sistemy [Dissector heterodin systems]. *Zarubezhnaya Radioelektronika*, 1986, no. 6, pp. 62–72.
23. Slobodyan S.M. Investigation of the correlation between direct and specular-reflected waves. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 1992, vol. 1693, pp. 492–494.
24. Slobodyan S.M., Kokhanov V.I., Shishigin S.A. Time trend of spectral radiation from laser spark. *11<sup>th</sup> International conference on spectral line shapes. Scientific program and abstract*. Carry le Rouet, June 8–12, 1992. pp. A01–A02.

*Received: 27 March 2014.*

УДК 62–82

## ВЛИЯНИЕ НЕРАСТВОРЕННОГО ГАЗА В РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ НА ДИНАМИКУ ГИДРОПРИВОДА ЛЕСОПОГРУЗЧИКА

**Никитин Александр Анатольевич,**

канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование» Механико-технологического факультета Политехнического института Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. E-mail: aannikitin@yandex.ru

**Мандраков Евгений Александрович,**

аспирант, ассистент кафедры «Технологические машины и оборудование» Механико-технологического факультета Политехнического института Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. E-mail: r\_esident@mail.ru

*Актуальность работы обусловлена тем, что рабочие жидкости гидропривода часто содержат нерастворенный воздух, и если при заполнении устройства гидропривода жидкость не подвергается вакуумированию, то она будет представлять собой смесь жидкости и газа. Такая же смесь может образовываться в гидроприводах во время динамических процессов из-за разных скоростей растворения и выделения газа при падении давления на отдельных участках течения рабочей среды. Поэтому в настоящей работе рассмотрено влияние газосодержания в рабочей жидкости на динамику гидропривода.*

**Цель работы:** оценка влияния процентного содержания нерастворенного газа в рабочей жидкости на динамику гидропривода.

**Методы исследования:** при составлении уравнений, описывающих процессы в гидроприводе, использованы методы теоретической механики и механики жидкости и газа; численные методы решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений, метод Рунге–Кутты 4-го порядка с использованием программного пакета Mathcad.

**Результаты:** Разработана математическая модель гидропривода лесопогрузчика, позволяющая исследовать переходные процессы. Проведены систематические расчеты динамики гидропривода.

**Выводы:** Результаты расчетов показывают, что даже малое количество (до 1 %) нерастворенного газа в рабочей жидкости оказывает влияние на изменение основных параметров в переходных процессах. Наибольшее влияние нерастворенного газа в рабочей жидкости проявляется в начальный период движения стрелы и поворотного основания. Математическая модель движения стрелы и поворотного основания лесопогрузчика позволяет на стадии проектирования исследовать влияние нерастворенного газа в рабочей жидкости на динамику навесного оборудования, а также выбрать оптимальные значения параметров привода. Результаты расчетов зависимости изменения угла и угловой скорости подъема стрелы и поворотного основания, а также давления в поршневых и штоковых полостях гидроцилиндров приведены в виде графиков.

### Ключевые слова:

Гидравлический привод, динамические нагрузки, сжимаемость, нерастворенный газ, рабочая жидкость, лесопогрузчик.

Динамике грузоподъемных машин посвящены работы [1–3]. В работе [1] не учитывается динамика гидропривода. В статьях [2, 3] не учитываются внутренние процессы, протекающие в гидроприводе. Динамике гидропривода грузоподъемных машин посвящены работы [4–8]. В статье [4] описана кинематическая схема навесного оборудования, приведено уравнение закона сохранения энергии с учетом энергии внутренних сил и намечены пути по составлению математической модели. В работах [5] и [6] рассматривается начальный этап движения стрелы при неподвижном основании и не рассматривается движение стрелы совместно с поворотным основанием. В работе [5] дано определение зависимости приведенных сил механизма подъема стрелы погрузчика к штоку гидроцилиндра от величины его хода, а в работе [6] предложена математическая модель гидропривода подъема стрелы, но она не учитывает изменения приведенной массы при движении навесного технологического оборудования. В работе [7] рабочая жидкость считается несжимаемой, а в статье [8] при рассмотрении динамики гидропривода постоянным считается приведенный момент инерции.

Ввиду того, что сжимаемость воздуха (газа) значительно (в тысячи раз) больше сжимаемости самих рабочих жидкостей (модуль упругости воздуха равен приблизительно величине абсолютного его давления), наличие в них воздушных пузырьков значительно понижает модуль их упругости, вследствие чего жесткость гидравлического механизма понижается (повышается податливость рабочих органов гидродвигателя, характеризуемая величиной смещения выходного его звена, под действием внешней нагрузки уменьшается) [9].

При подъеме груза из положения набора в положение разгрузки на первой половине траектории движения груза вращающий момент относительно шарнира А (основания) гидроцилиндров подъема стрелы больше суммарного момента сил тяжести, приложенных к стреле и челюсти с грузом, а вращающий момент относительно шарнира D (рамы, закрепленной на базовой машине) гидроцилиндров поворота основания со стрелой меньше суммарного момента сил тяжести, приложенных к поворотному основанию, стреле и челюсти с грузом. Поэтому сначала происходит поворот стрелы,

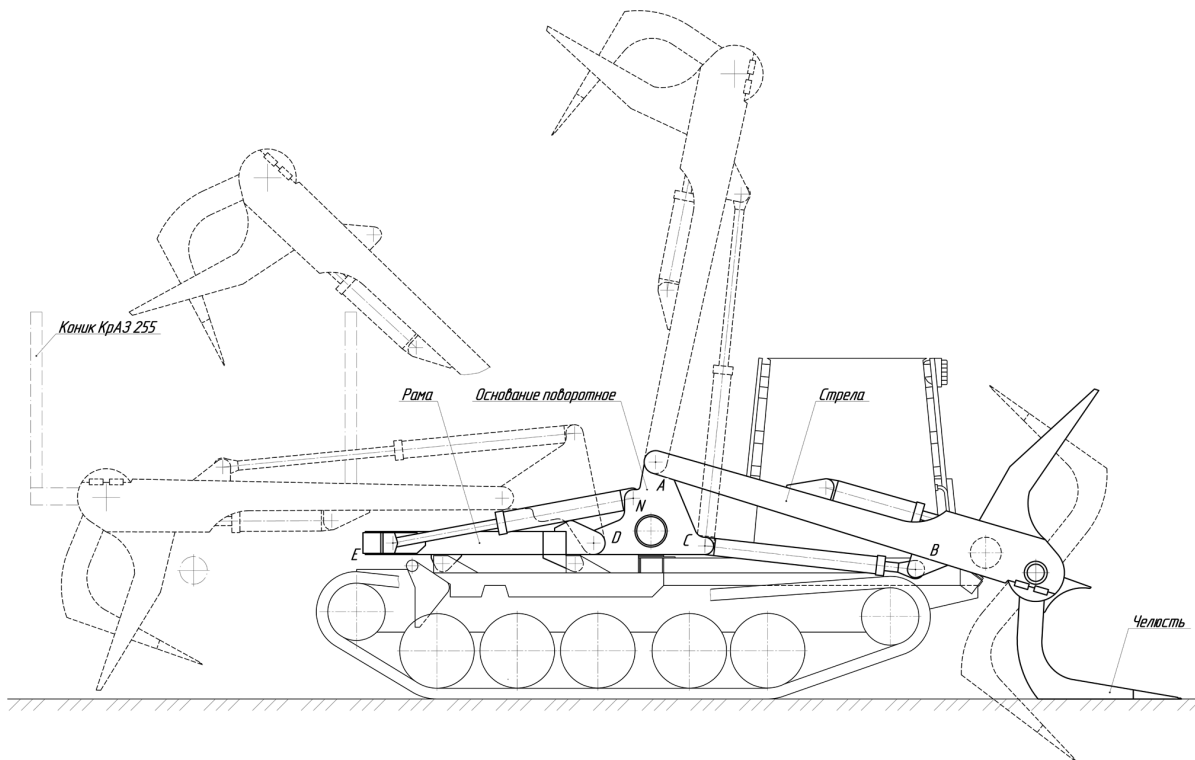


Рис. 1. Кинематическая схема челюстного лесопогрузчика перекидного типа ЛТ-188

Fig. 1. Kinematic diagram of timber logger of the cross-over type LT-188

относительно точки А, а затем поворот основания вместе со стрелой, относительно точки D (рис. 1). Гидроцилиндры стрелы и основания имеют общие нагнетающую и сливную магистрали и разные направления действия. Расчетная схема приведена на рис. 2.

Закон движения механизма машинного агрегата формируется под действием сил, приложенных к его звеньям. Прежде всего, это движущие силы и силы сопротивления, а также силы тяжести и многие другие. Характер действия сил может быть разным: некоторые из них зависят от положения звеньев механизма, а другие – от их скорости, силы могут быть и постоянными [10].

Выполнив приведение сил и масс, любой механизм с одной степенью свободы (рычажный, зубчатый, кулачковый и др.), сколь бы сложным он ни был, можно заменить его динамической моделью. Эта модель в общем случае имеет переменный приведенный момент инерции  $J_{\Sigma}^{np}$ , и к ней приложен суммарный приведенный момент  $M_{\Sigma}^{np}$ . Закон движения модели такой же, как и закон движения начального звена механизма. Основой для составления уравнения движения механизма с одной степенью свободы служит теорема об изменении кинетической энергии:

$$T - T_{нач} = A_{\Sigma}.$$

Работу совершают все активные силы, моменты и силы трения во всех кинематических парах механизма.

Изменение приведенного момента инерции найдем из уравнения движения в энергетической форме:

$$\frac{J_{\Sigma}^{np} \omega^2}{2} - \frac{J_{\Sigma_{нач}}^{np} \omega_{нач}^2}{2} = \int_{\phi_{нач}}^{\phi} M_{\Sigma}^{np} d\phi. \quad (1)$$

Продифференцируем уравнение (1) по координате  $\phi$ :

$$\frac{d}{d\phi} \left( \frac{J_{\Sigma}^{np} \omega^2}{2} \right) = M_{\Sigma}^{np}. \quad (2)$$

Определим производную, стоящую в левой части уравнения (2), помня, что в общем случае переменной величиной является не только угловая скорость  $\omega$ , но и  $J_{\Sigma}^{np}$ . Поэтому

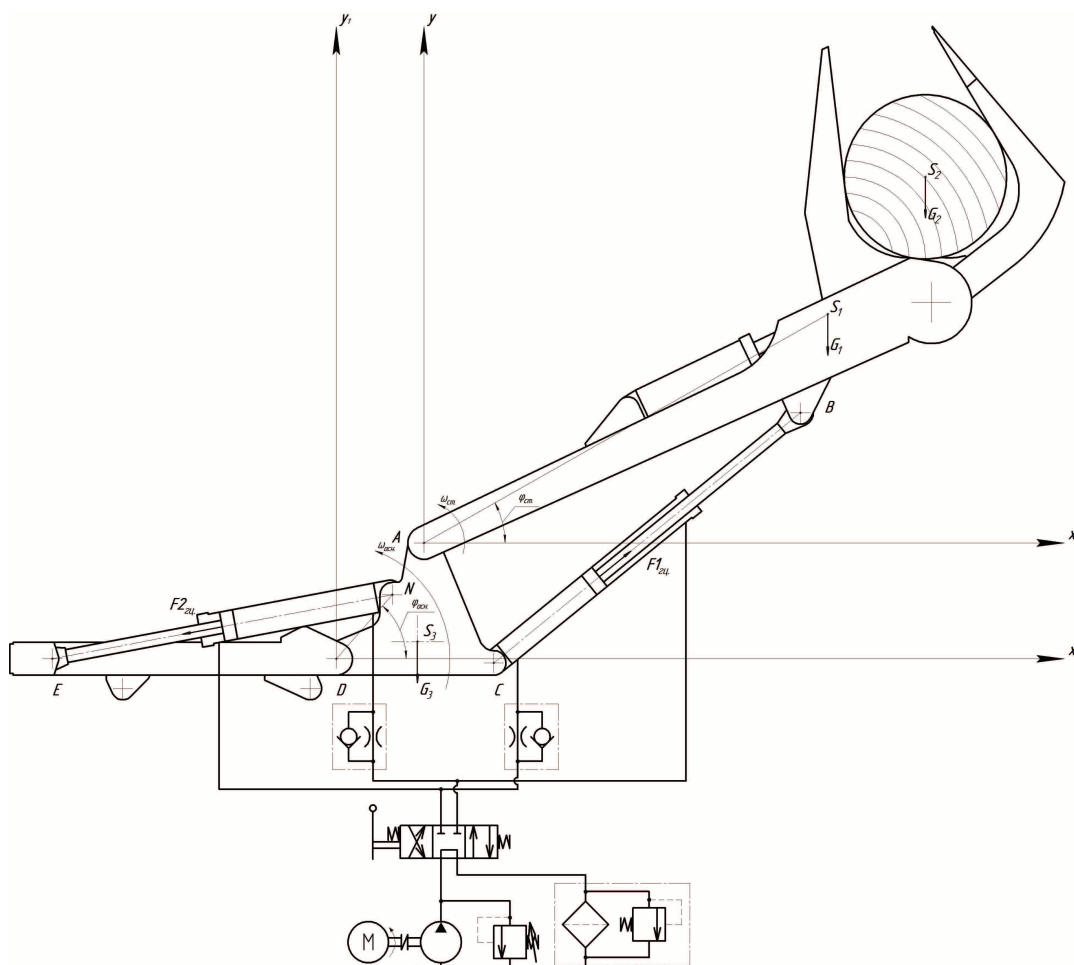
$$\begin{aligned} \frac{d}{d\phi} \left( \frac{J_{\Sigma}^{np} \omega^2}{2} \right) &= J_{\Sigma}^{np} \omega \frac{d\omega}{d\phi} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ_{\Sigma}^{np}}{d\phi} = \\ &= J_{\Sigma}^{np} \frac{d\omega}{d\phi} \frac{d\phi}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ_{\Sigma}^{np}}{d\phi} = J_{\Sigma}^{np} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ_{\Sigma}^{np}}{d\phi}. \end{aligned}$$

В итоге получим [11]:

$$J_{\Sigma}^{np} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ_{\Sigma}^{np}}{d\phi} = M_{\Sigma}^{np}. \quad (3)$$

Это и есть уравнение движения в дифференциальной форме (3), поскольку искомая переменная величина – угловая скорость начального звена механизма – стоит под знаком производной.





**Рис. 2.** Расчетная схема стрелы и поворотного основания челюстного лесопогрузчика перекидного типа ЛТ-188, где  $\phi_{ст.}$ ,  $\phi_{осн.}$  – угол поворота соответственно стрелы и основания;  $\omega_{ст.}$ ,  $\omega_{осн.}$  – угловая скорость соответственно стрелы и основания; A, D – шарнир, относительно которого происходит поворот соответственно стрелы и основания;  $F_{1гц.}$ ,  $F_{2гц.}$  – усилие, развиваемое соответственно гидроцилиндрами стрелы и основания;  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  – центр массы соответственно стрелы, груза и поворотного основания;  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$  – вес соответственно стрелы, груза и поворотного основания

**Fig. 2.** Design circuit of a boom and a rotary foundation of a timber logger of the cross-over type LT-188 where  $\phi_{boom}$ ,  $\phi_{rot.found.}$  is the angle of turn of a boom and foundation correspondingly;  $\omega_{boom}$ ,  $\omega_{rot.found.}$  is the angle rate of a boom and foundation correspondingly; A, D are the joints relative to which a boom and foundation turn;  $F_{1hycl.}$ ,  $F_{2hycl.}$  are the stresses generated by the hydrocylinders of a boom and a foundation;  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  are the centers of mass of a boom, load and foundation correspondingly;  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$  are the weights of a boom, load and foundation correspondingly

При составлении математической модели были приняты следующие допущения: процесс изменения давления описывается в сосредоточенных параметрах, модуль объемной упругости смеси является функцией давления, навесное оборудование рассматривается как плоский механизм. Так как большинство трубопроводов обладает большой жесткостью, их упругость не учитывается.

Математическую модель с учетом перечисленных выше допущений можно записать в следующем виде [12–14]:

$$M_{ГЦ.ст.} - M_{G.ст.} = J_{пр.ст.} \frac{d\omega_{ст.}}{dt} + \frac{\omega_{ст.}^2}{2} \frac{dJ_{пр.ст.}}{d\phi_{ст.}};$$

$$Q_0 - Q_{у.ст.} - Q_{к.ст.} - Q_{1ст.} = Q_{сж1ст.};$$

$$Q_{2ст.} - Q_{сл.ст.} = Q_{сж2ст.}, \quad (4)$$

$$M_{ГЦ.осн.} - M_{G.осн.} = J_{пр.осн.} \frac{d\omega_{осн.}}{dt} + \frac{\omega_{осн.}^2}{2} \frac{dJ_{пр.осн.}}{d\phi_{осн.}};$$

$$Q_0 - Q_{у.осн.} - Q_{к.осн.} - Q_{1осн.} = Q_{сж1осн.};$$

$$Q_{2осн.} - Q_{сл.осн.} = Q_{сж2осн.},$$

где  $M_{ГЦ.ст.}$ ,  $M_{ГЦ.осн.}$  – момент, развиваемый гидроцилиндрами соответственно стрелы и основания;  $M_{G.ст.}$ ,  $M_{G.осн.}$  – момент внешних сил относительно точки поворота соответственно стрелы и основания;  $J_{пр.ст.}$ ,  $J_{пр.осн.}$  – приведенный момент инерции соответственно к стреле и основанию;  $\omega_{ст.}$ ,  $\omega_{осн.}$  – угловая скорость соответственно стрелы и основания;  $\phi_{ст.}$ ,  $\phi_{осн.}$  – угол поворота соответственно стрелы и основания;  $Q_0$  – подача насоса;  $Q_{у.ст.}$ ,  $Q_{у.осн.}$  – расход, вызванный утечками рабочей жидкости соответственно при движении стрелы и основания;  $Q_{к.ст.}$ ,  $Q_{к.осн.}$  – расход жидко-

сти через предохранительный клапан соответственно при движении стрелы и основания;  $Q_{1ст.}$ ,  $Q_{1осн.}$  – расход жидкости, поступающий соответственно в поршневые полости гидроцилиндров стрелы и штоковые основания;  $Q_{2ст.}$ ,  $Q_{2осн.}$  – расход жидкости, вытесняемой соответственно из штоковых полостей гидроцилиндров стрелы и поршневых полостей гидроцилиндров основания;  $Q_{сл.ст.}$ ,  $Q_{сл.осн.}$  – расход жидкости в сливных трубопроводах соответственно гидроцилиндров стрелы и основания;  $Q_{сж1ст.}$ ,  $Q_{сж1осн.}$  – расходы, связанный со сжимаемостью рабочей жидкости соответственно в поршневых полостях гидроцилиндров стрелы и штоковых полостях гидроцилиндров основания;  $Q_{сж2ст.}$ ,  $Q_{сж2осн.}$  – расход, связанный со сжимаемостью рабочей жидкости соответственно в штоковых полостях гидроцилиндров стрелы и поршневых полостях гидроцилиндров основания.

Модуль объемной упругости смеси (жидкость+воздух)  $E_{см}$  определяется формулой [15, 16]:

$$E_{см} = \frac{V_{см} E_{ж}}{V_{ж} \left( 1 + \frac{V_{в} E_{ж}}{V_{ж} E_{в}} \right)}, \quad (5)$$

где  $V_{см}$  – объем смеси;  $V_{ж}$  – объем жидкости;  $V_{в}$  – объем воздуха;  $V_{ж}$  – модуль объемной упругости жидкости;  $E_{в}$  – модуль объемной упругости воздуха.

В реальных условиях объем пузырьков воздуха, содержащегося в жидкости, значительно меньше объема самой жидкости, поэтому принимаем  $V_{см} = V_{ж}$  и приводим формулу (5) к виду:

$$E_{см} = \frac{E_{ж}}{1 + \frac{\alpha_{в} \cdot E_{ж}}{E_{в}}},$$

где  $\alpha_{в} = \frac{V_{в}}{V_{см}}$  – объемное содержание воздуха в жидкости.

Для расчета в программе MathCAD систему уравнений (4) представим в форме Коши [17–20]:

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_{ст.}}{dt} &= \omega_{ст.}; \\ \frac{d\omega_{ст.}}{dt} &= \frac{1}{J_{пр.ст.}} \left( M_{ГЦ.ст.} - M_{G.ст.} - \frac{\omega_{ст.}^2}{2} \frac{dJ_{пр.ст.}}{d\phi_{ст.}} \right); \\ \frac{dp_{1ст.}}{dt} &= \frac{E_{см11}}{W_{1ст.}} (Q_0 - Q_{у.ст.} - Q_{к.ст.} - Q_{1ст.}); \\ \frac{dp_{2ст.}}{dt} &= \frac{E_{см12}}{W_{2ст.}} (Q_{2ст.} - Q_{сл.ст.}); \\ \frac{d\phi_{осн.}}{dt} &= \omega_{осн.}; \\ \frac{d\omega_{осн.}}{dt} &= \frac{1}{J_{пр.осн.}} \left( M_{ГЦ.осн.} - M_{G.осн.} - \frac{\omega_{осн.}^2}{2} \frac{dJ_{пр.осн.}}{d\phi_{осн.}} \right); \\ \frac{dp_{1осн.}}{dt} &= \frac{E_{см21}}{W_{1осн.}} (Q_0 - Q_{у.осн.} - Q_{к.осн.} - Q_{1осн.}); \\ \frac{dp_{2осн.}}{dt} &= \frac{E_{см22}}{W_{2осн.}} (Q_{2осн.} - Q_{сл.осн.}); \end{aligned}$$

где  $E_{см11}$ ,  $E_{см21}$  – модуль объемной упругости смеси соответственно в поршневых полостях гидроцилиндров стрелы и штоковых полостях гидроцилиндров основания;  $E_{см12}$ ,  $E_{см22}$  – модуль объемной упругости смеси соответственно в штоковых полостях гидроцилиндров стрелы и поршневых полостях гидроцилиндров основания;  $W_{1ст.}$ ,  $W_{1осн.}$  – объем соответственно поршневых полостей гидроцилиндров стрелы и штоковых полостей гидроцилиндров основания, который увеличивается при движении поршня, а также объем трубопроводов, соединяющих эти полости с распределителем;  $W_{2ст.}$ ,  $W_{2осн.}$  – объем соответственно штоковых полостей гидроцилиндров стрелы и поршневых полостей гидроцилиндров основания, который уменьшается при движении поршня, а также объем трубопроводов, соединяющих эти полости с распределителем.

На рис. 3, 4 приведены результаты расчета движения стрелы и поворотного основания, а также зависимости изменения давления в гидроцилиндрах при разном количестве содержания нерастворенного газа в рабочей жидкости. Рассмотрен начальный период движения стрелы и основания, равный 3 с, при котором в гидроприводе происходит колебания угловой скорости и давления с максимальной амплитудой.

Из графиков следует, что:

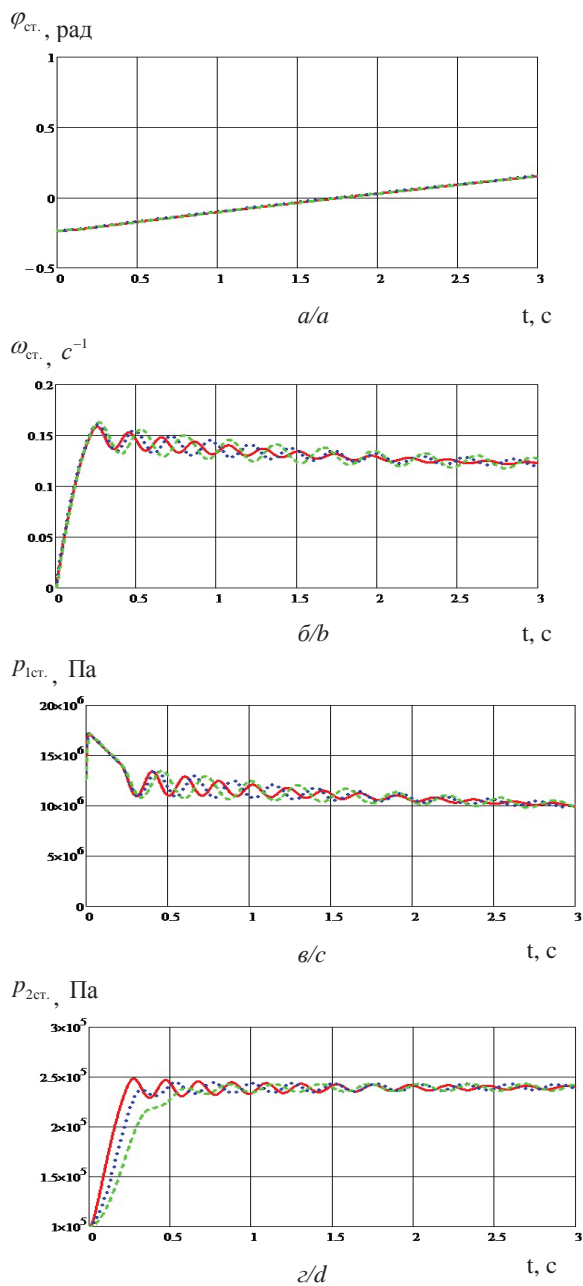
- увеличение количества содержания нерастворенного газа в рабочей жидкости не оказывает влияния на характер изменения угла подъема стрелы (рис. 3, а) и поворотного основания (рис. 4, а);
- при увеличении содержания нерастворенного газа от 0,1 до 1 % увеличивается амплитуда колебаний угловой скорости стрелы (рис. 3, б) и основания (рис. 4, б);
- амплитуда колебаний давления в поршневых полостях гидроцилиндров стрелы (рис. 3, в) и штоковых полостях гидроцилиндров основания (рис. 4, в) при увеличении содержания нерастворенного газа в рабочей жидкости также увеличивается;
- увеличение среднего значения давления в штоковых полостях гидроцилиндров стрелы (рис. 3, г) и поршневых основаниях (рис. 4, г), с увеличением количества нерастворенного газа в рабочей жидкости, происходит плавней на начальном участке движения.

#### Выводы

Результаты расчетов показывают, что при учете нерастворенного газа в рабочей жидкости процесс подъема стрелы и поворот основания сопровождается колебаниями.

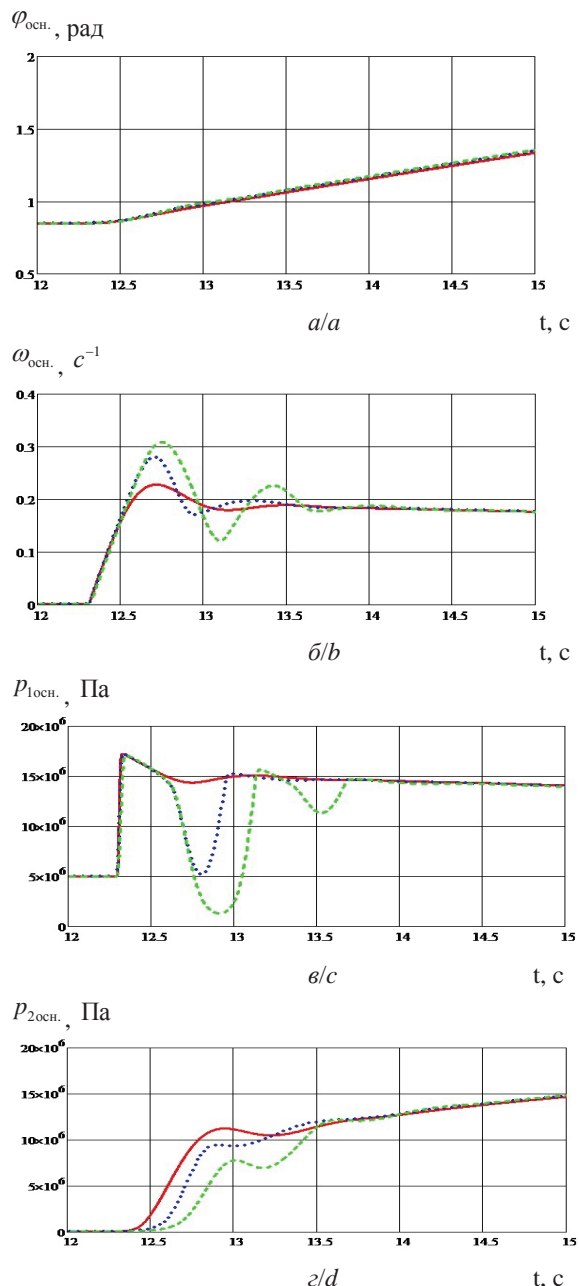
Наибольшее влияние нерастворенного газа в рабочей жидкости проявляется в начальный период движения стрелы и поворотного основания.

Таким образом, математическая модель движения стрелы и поворотного основания лесопогружчика перекидного типа ЛТ-188 позволяет на стадии проектирования исследовать влияние нерастворенного газа в рабочей жидкости на динамику навесного оборудования, а также выбрать оптимальные значения параметров привода.



**Рис. 3.** Влияние нерастворенного газа в рабочей жидкости на угол подъема (а) и угловую скорость (б) стрелы, а также давления в поршневых (в) и штоковых (г) полостях гидроцилиндров стрелы; содержание нерастворенного газа (%) — — — — 0,1; ..... — 0,5; — — — — 1

**Fig. 3.** Influence of undissolved gas in working liquid on lifting angle (a) and angle rate (b) of a boom; pressure in piston (c) and rod (d) planes of hydrocylinders of a boom; undissolved gas content (%) — — — — 0,1; ..... — 0,5; — — — — 1



**Рис. 4.** Влияние нерастворенного газа в рабочей жидкости на угол поворота (а) и угловую скорость (б) основания, а также давления в штоковых (в) и поршневых (г) полостях гидроцилиндров основания; содержание нерастворенного газа (%): — — — — 0,1; ..... — 0,5; — — — — 1

**Fig. 4.** Influence of undissolved gas in working liquid on lifting angle (a) and angle rate (b) of a foundation; pressure in rod (c) and piston (d) planes of hydrocylinders of a foundation; undissolved gas content (%) — — — — 0,1; ..... — 0,5; — — — — 1

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полетайкин В.Ф. Динамические нагрузки на гусеничные лесопогрузчики при движении через препятствие // Системы. Методы. Технологии. – 2012. – № 3. – С. 40–44.
2. Макеев В.Н., Плешков Д.Д. Исследование и выбор параметров грузоподъёмного механизма гидравлического экскаватора // Строительные и дорожные машины. – 2010. – № 9. – С. 24–25.
3. Сушков С.И., Макеев В.Н., Плешков Д.Д. Результаты исследования параметров грузоподъёмного механизма гидравлического экскаватора // Строительные и дорожные машины. – 2014. – № 2. – С. 47–52.
4. Кондрашов П.М., Мельников В.Г. Нетрадиционный метод автоматизации поочерёдного включения исполнительных механизмов // Вестник Красноярского государственного технического университета. – 2000. – № 18. – С. 16–20.
5. Щеглов Е.М. Снижение динамических нагрузок в гидроприводе лесопогрузчика: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск, 2001. – 24 с.
6. Абрамов В.В. Повышение работоспособности гидрофицированных самоходных машин дегазацией рабочей жидкости: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск, 2000. – 23 с.
7. Навроцкий В.К. Управление объемными дизельными гидроприводами и выбор их параметров с целью снижения непроизводительных затрат энергии строительными и подъемно-транспортными машинами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2002. – 50 с.
8. Васильев С.И., Иванчура В.И. Обоснование критериев оценки динамических процессов гидромеханического привода рабочих органов землеройно-транспортных машин // Системы. Методы. Технологии. – 2012. – № 1. – С. 62–66.
9. Башта Т.М. Машиностроительная гидравлика: справ. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1971. – 672 с.
10. Теория механизмов и механика машин / К.В. Фролов, С.А. Попов, А.К. Мусатов и др. / под ред. К.В. Фролова. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1998. – 496 с.
11. Gorbeshko M.V. Development of mathematical models for the hydraulic machinery of systems controlling the moving components of water-development works // Hydrotechnical construction. – 1997. – V. 31. – № 12. – P. 745–750.
12. Parr E.A. Hydraulics and pneumatics: a technician's and engineer's guide. 2<sup>nd</sup> ed. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998. – 244 p.
13. Mobley R.K. Fluid power dynamics. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999. – 288 p.
14. Rabie M.G. Fluid power engineering. – New York City: McGraw Hill Professional, 2009. – 420 p.
15. Попов Д.Н. Механика гидро- и пневмоприводов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 320 с.
16. Попов Д.Н., Панайотти С.С., Рябинин М.В. Гидромеханика / под ред. Д.Н. Попова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 384 с.
17. Никитин А.А., Мандраков Е.А. Влияние вязкости рабочей жидкости на динамику гидропривода лесопогрузчика // Строительные и дорожные машины. – 2014. – № 2. – С. 28–31.
18. Мандраков Е.А., Никитин А.А. Динамика гидросистем: монография. – М.: ИНФРА-М; Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – 128 с.
19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2012618094 РФ. Сравнение динамики гидромеханического механизма подъема груза лесопогрузчика без учёта и с учётом сжимаемости рабочей жидкости / А.А. Никитин, Е.А. Мандраков, правообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2012615741. Заявл. 10.07.2012. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 07.09.2012.
20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2013617101 РФ. Расчет динамики гидромеханического механизма подъема груза лесопогрузчика с учётом нерастворенного газа в рабочей жидкости / А.А. Никитин, Е.А. Мандраков, правообладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2013614584. Заявл. 04.06.2013. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 01.08.2013.

Поступила: 23.01.2014 г.

UDC 62–82

## INFLUENCE OF UNDISSOLVED GAS IN WORKING LIQUID ON DYNAMICS OF A LOGGER HYDRAULIC DRIVE

**Aleksandr A. Nikitin,**

Cand. Sc., Polytechnic Institute of the Siberian Federal University, 79, Svobodny pr., Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: aannikitin@yandex.ru

**Evgeniy A. Mandrakov,**

Polytechnic Institute of the Siberian Federal University, 79, Svobodny pr., Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: r\_esident@mail.ru

*The urgency of the discussed issue is caused by the fact that working liquids of a hydraulic drive often contain undissolved air. If the hydraulic liquid filling the device is not exposed to a vacuum, it will be a mixture of liquid and gas. The same mixture can be formed in a hydraulic drive during the dynamic processes due to the different rates of gas dissolution and emission at pressure drop on separate areas of working environment flow. Therefore, the paper considers the influence of gas content in working liquid on dynamics of a hydraulic drive.*

**The main aim of the study:** evaluation of influence of undissolved gas percentage in working liquid on dynamics of a hydraulic drive.

**The methods used in the study:** methods of theoretical mechanics and fluid mechanics are used setting up equations describing processes in hydraulic drive; numerical methods for solving ordinary differential equations systems, the Runge–Kutta method of the 4<sup>th</sup> order using the software package Mathcad.



**The results:** The authors have developed the mathematical model of a logger hydraulic drive that allows investigating transient processes and have carried out the systematic calculations of the dynamics of a hydraulic drive.

**The conclusion:** The results of calculations show that even a small amount (up to 1 %) of undissolved gas in working liquid influences the change of the basic parameters in transient processes. Undissolved gas in working liquid influences most of all in the initial period of a boom and a rotary foundation movement. The mathematical model of a logger boom and rotary foundation movement allows investigating the influence of undissolved gas in working liquid on dynamics of the hinged equipment at a design stage, and selecting as well the optimum values of drive parameters. The results of calculations of the dependence of change in an angle and angular velocity of a boom and a rotary foundation, as well as the pressure in piston and rod cavities of hydraulic cylinders are shown in the form of graphs.

**Key words:**

Hydraulic drive, dynamic loads, compressibility, undissolved gas, working liquid, logger.

**REFERENCES**

1. Poletaykin V.F. Dinamicheskie nagruzki na gusenichnye lesopogruzchiki pri dvizhenii cherez pripyatstvie [Dynamic load on caterpillar loggers when moving through obstacles]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii – Systems. Methods. Technologies*, 2012, no. 3, pp. 40–44.
2. Makeev V.N., Pleshkov D.D. Issledovanie i vybor parametrov gruzopodemnogo mekhanizma gidravlicheskogo ekskavatora [The research and the choice of hydraulic excavator load lifting mechanism characteristics]. *Stroitelnye i dorozhnye mashiny*, 2010, no. 9, pp. 24–25.
3. Sushkov S.I., Makeev V.N., Pleshkov D.D. Rezultaty issledovaniya parametrov gruzopodemnogo mekhanizma gidravlicheskogo ekskavatora [The results of the research of hydraulic excavator load lifting mechanism characteristics]. *Stroitelnye i dorozhnye mashiny*, 2014, no. 2, pp. 47–52.
4. Kondrashov P.M., Melnikov V.G. Netraditsionnyy metod avtomatizatsii poocherednogo vklyucheniya ispolnitelnykh mekhanizmov [Unconventional method of automation alternately activating of actuators]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2000, no. 18, pp. 16–20.
5. Shcheglov E.M. *Snizhenie dinamicheskikh nagruzok v gidroprivode lesopogruzchika* [Reduction of dynamic loads in a logger hydraulic drive]. Avtoreferat diss. kand. nauk. Krasnoyarsk, 2001. 24 p.
6. Abramov V.V. *Povyshenie rabotosposobnosti gidrofitsirovannykh samokhodnykh mashin degazatsiy rabochey zhidkosti* [Increasing the efficiency of hydroficated self-propelled machines by degassing working liquid]. Avtoreferat diss. kand. nauk. Krasnoyarsk, 2000. 23 p.
7. Navrotsky V.K. *Upravlenie obemnymi dizelnymi gidroprivodami i vybor ikh parametrov s tselyu snizheniya neproizvoditelnykh zatrat energii stroitelnyimi i podemno-transportnymi mashinami* [Manage bulk diesel hydraulic drives and a selection of their parameters in order to reduce the overhead of building and energy handling machinery]. Avtoreferat diss. dokt. nauk. Moscow, 2002. 50 p.
8. Vasilev S.I., Ivanchura V.I. Obosnovanie kriteriev otsenki dinamicheskikh protsessov gidromekhanicheskogo privoda rabochikh organov zemleroyno-transportnykh mashin [Substantiation of the assessment criterion for the dynamic processes of hydro-mechanical drive of the earthmovers operating members]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii – Systems. Methods. Technologies*, 2012, no. 1, pp. 62–66.
9. Bashta T.M. *Mashinostroitel'naya gidravlika* [Engineering hydraulics]. Moscow, Mashinostroenie, 1971. 671 p.
10. Prolov K.V., Popov S.A., Musatov A.K. *Teoriya mekhanizmov i mekhanika mashin* [Theory of mechanisms and machine mechanics]. Moscow, Vyssh. Shkola Publ., 1998. 496 p.
11. Gorbeshko M.V. Development of mathematical models for the hydraulic machinery of systems controlling the moving components of water-development works. *Hydrotechnical construction*, 1997, vol. 31, no. 12, pp. 745–750.
12. Parr E.A. *Hydraulics and pneumatics: A technician's and engineer's guide*. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2 ed., 1998. 244 p.
13. Mobley R.K. *Fluid power dynamics*. Oxford, Butterworth-Heinemann, 1999. 288 p.
14. Rabie M.G. *Fluid power engineering*. New York City, McGraw Hill Professional, 2009. 420 p.
15. Popov D.N. *Mekhanika gidro- i pnevmopriwodov* [Mechanics of hydro- and pneumatic drives]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman, 2001. 320 p.
16. Popov D.N., Panaiotti S.S., Ryabinin M.V. *Gidromekhanika* [Hydromechanics]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman, 2002. 384 p.
17. Nikitin A.A., Mandrakov E.A. Vliyaniye vyazkosti rabochey zhidkosti na dinamiku gidroprivoda lesopogruzchika [Influence of working liquid viscosity on dynamics of a logger hydraulic drive]. *Stroitelnye i dorozhnye mashiny*, 2014, no. 2, pp. 28–31.
18. Mandrakov E.A., Nikitin A.A. *Dinamika gidrosistem* [Dynamics of hydraulic systems]. Moscow, INFRA-M; Krasnoyarsk, Siberian federal university, 2014. 128 p.
19. Nikitin A.A., Mandrakov E.A. *Sravnenie dinamiki gidromekhanicheskogo mekhanizma podema gruzha lesopogruzchika bez ucheta i s uchedom szhimaemosti rabochey zhidkosti* [Comparison of dynamics of a logger load lifting hydromechanical mechanism with and without taking into account compressibility of the working liquid]. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM RF, no. 2012618094, 2012.
20. Nikitin A.A., Mandrakov E.A. *Raschet dinamiki gidromekhanicheskogo mekhanizma podema gruzha lesopogruzchika s uchedom nerastvorennogo gaza v rabochey zhidkosti* [Calculation of the dynamics of a logger load lifting hydromechanical mechanism considering undissolved gas in the working liquid]. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM RF, no. 2013617101, 2013.

Received: 23 January 2014.



УДК 53.08.004, 53.087/.088

## **СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ КОМБИНАЦИЕЙ МЕТОДОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, КАРТИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИИ НА ПОВЕРХНОСТИ И ТЕНЗОМЕТРИИ**

### **Панин Сергей Викторович,**

д-р. техн. наук, профессор кафедры «Материаловедение в Машиностроении» Института физики высоких технологий ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30; зав. лаб. «Механики полимерных композиционных материалов» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4. E-mail: svp@ispms.tsc.ru

### **Бяков Антон Викторович,**

канд. техн. наук, мл. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4. E-mail: bjakov@ispms.tsc.ru

### **Любутин Павел Степанович,**

канд. техн. наук, мл. науч. сотр. лаб. механики полимерных композиционных материалов Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634021, г. Томск, просп. Академический, 2/4. E-mail: psl@sibmail.com

### **Сундер Рамасубу,**

канд. техн. наук, технический директор Bangalore Integrated System Solutions (P) Ltd (BiSS), Индия, 560094, г. Бангалор, Cross AECS, 41a. E-mail: rs@biss.in

### **Гренке Виктор Валерьевич,**

канд. техн. наук, инженер Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4. E-mail: victor.grenke@gmail.com

### **Шакиров Игорь Вазирянович,**

канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4. E-mail: igor.shakirov@gmail.com

### **Башков Олег Викторович,**

д-р. техн. наук, профессор кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет», Россия, 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: bashkov\_ov@mail.ru

*На базе серийной сервогидравлической испытательной машины разработан лабораторный стенд для изучения поведения образцов конструкционных материалов при циклических испытаниях, включающий in situ регистрацию данных тензометрии, картирования деформации на поверхности и акустической эмиссии. С учетом специфики циклического приложения нагрузки предложены алгоритмы регистрации информации, обеспечивающие синхронизацию фотографирования с нагружением, а также выделения из потока данных только полезных сигналов АЭ. В основу принципа функционирования стенда положено выделение и*

совместный анализ характерных стадий изменения информативных параметров: интенсивности деформации сдвига, активности акустической эмиссии и удлинения образца как функции количества циклов нагружения.

Проведено тестирование разработанного стенда при циклическом растяжении образцов сплава В96. Показано, что изменение всех трех информативных параметров (регистрируемых от различных датчиков) во времени характеризуется тремя выраженными стадиями, причем начало стадии III (распространение трещины) четко совпадает по времени для всех проанализированных зависимостей. Несоответствие по времени начала стадии II наиболее вероятно обусловлено двумя причинами: для картирования деформации на поверхности это невысокое разрешение оптической системы, что не позволяет выявить развитие деформации на малых пространственных масштабах; для метода АЭ – чувствительность метода к механизмам деформации только микромасштабного уровня, а также высокая интенсивность деформации в начале циклического нагружения, что при конечной чувствительности АЭ аппаратуры не позволяет фиксировать все «полезные» АЭ сигналы.

Дальнейшее развитие предложенного подхода и стенда для его реализации предполагает использование нескольких датчиков акустической эмиссии для решения задач локации и идентификации источников, использование более высокого разрешения оптической системы для повышения чувствительности оценки деформации оптическим методом.

**Ключевые слова:**

Обработка изображений, акустическая эмиссия, корреляция цифровых изображений, тензометрия, усталостное разрушение.

**Введение**

Актуальность изучения механического поведения конструкционных материалов при циклическом нагружении обусловлена, прежде всего, поиском путей повышения усталостной прочности, а также факторов, ее определяющих. Однако проведение усталостных испытаний сопряжено с рядом сложностей, в том числе связанных с выбором и использованием исследовательского оборудования, средств измерения, процедур обработки данных и т. д. Указанная специфика определяется следующими факторами:

- длительностью экспериментов, что, например, в условиях фото (видео) регистрации поверхности нагружаемого образца требует значительных ресурсов памяти;
- значительным уровнем внешних механических шумов и т. п., связанных с непрерывным циклическим движением захватов испытательной машины и работой масляной станции (при использовании акустических методов, в частности акустической эмиссии). Например, авторы работ [1, 2] предлагают различные способы для устранения подобных типов шумов;
- зарождение микротрещин (ы), особенно на ранних стадиях, происходит локально и при малых их размерах сложно выявляется с помощью традиционных методов неразрушающего контроля;
- проведение электронно-микроскопических наблюдений требует извлечения образца из захватов (растровая электронная микроскопия) либо разрушения образца (просвечивающая микроскопия).

Важность получения такой информации, например, для проведения неразрушающего контроля деталей машин и элементов конструкций, стимулирует исследователей создавать новые, в том числе комбинированные методы *in situ* наблюдения и регистрации данных о процессах деформации и разрушения.

В традиционной реализации большинство методов неразрушающего контроля, как правило, позволяют выявлять дефекты (трещины) достаточно большого размера, поэтому более эффективными

являются методы *in situ* мониторинга, например метод акустической эмиссии (АЭ). Так, в литературе активно обсуждается использование метода АЭ для обнаружения несплошностей при искусственном нагружении инспектируемых объектов [3]. Однако, поскольку метод АЭ не является прямым методом измерения деформаций, а также не позволяет идентифицировать (визуально определять) формирующиеся дефекты, практикуют совместное использование нескольких методов, в частности АЭ и тензометрии (либо оптического наблюдения, включающего средства микроскопии).

В работе [4] рассмотрено применение метода АЭ, оптического наблюдения и тензометрии в процессе циклических испытаний планера самолета. В качестве оптического метода применяли визуальный контроль за ростом трещины с помощью эндоскопа, оборудованного черно-белой видеокамерой с разрешением 320×240 пикселей. Однако для проведения более тонких лабораторных испытаний образцов требуется использование точных и локальных методов оценки деформации, реализуемых, в частности, оптическим методом (например, картирование деформации на поверхности [5–7]).

Отметим, что в ТПУ, начиная с 70-х гг. прошлого века под руководством проф. С.Д. Заверткина успешно ведется разработка средств акустико-эмиссионного контроля в приложении к процессам кристаллизации [8]. В частности, был разработан метод синхронной регистрации термостимулированной радиочастотной электромагнитной эмиссии (ТСРЭЭ) и АЭ, основанный на эффекте генерирования радиочастотных электромагнитных импульсов при нагревании дефектных минералов и кристаллов с контролируемой дефектностью. С использованием такого подхода удастся установить связь между закономерностями генерирования ТСРЭЭ и АЭ вследствие фазовых переходов в природных и искусственных кристаллах, являющихся диэлектриками.

Ранее коллективом авторов данной статьи был разработан стенд регистрации АЭ для проведения исследований материалов в условиях приложения статических нагрузок (растяжения и трехточечного изгиба), а также было проведено тестирование

этого стенда совместно с оптико-телевизионной измерительной системой TOMSC и анализом данных тензометрии, получаемых с помощью регистрирующего блока испытательной машины INSTRON-5582 [9–11].

Однако применение такого стенда для изучения усталостного разрушения требовало помимо его адаптации к сервогидравлической испытательной машине, существенной доработки аппаратного и программного обеспечения, а также тестирования его функционирования при циклическом растяжении образцов конструкционных материалов. Описанию результатов этих исследований и посвящена настоящая работа.

#### Разработка структурной схемы и реализация стенда

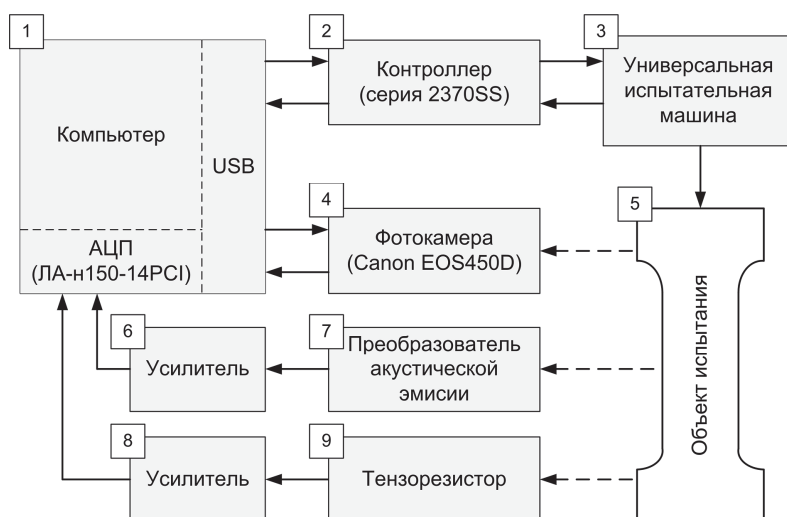
В работе была поставлена задача на базе промышленной сервогидравлической испытательной машины разработать и протестировать исследовательский стенд для проведения мониторинга усталостного разрушения комбинацией методов АЭ, картирования деформации на поверхности и тензометрии. В состав лабораторного стенда были включены следующие блоки (рис. 1): испытательная машина UTM150 (BiSS, Индия) – 3, фотокамера Canon EOS 450D – 4, стенд регистрации АЭ [10] – 6, 7, персональный компьютер для фиксации, обработки и визуализации данных, а также управления периферийными устройствами – 1.

Регистрация, обработка и анализ записываемых сигналов проводилась по алгоритму, приведенному на рис. 2. При этом принцип действия стенда заключается в следующем. Испытательная машина – 3 реализует циклическое растяжение образца (на рис. 1 обозначен как объект испытаний – 5). С помощью силоизмерителя регистрируется прикладываемая нагрузка, а датчик линей-

ных перемещений измеряет удлинение образца. Данная информация в настоящей работе трактуется как данные тензометрии, которые являются основанием для построения зависимости удлинения образца от времени (рис. 2, блок 4.1).

Для получения оценки деформации методом картирования деформации на поверхности регистрация оптических картин поверхности образца в процессе нагружения проводится с помощью цифровой зеркальной фотокамеры Canon EOS 450D (рис. 1–4), оборудованной длиннофокусным объективом Canon EF-S 55–250mm f/4–5.6 IS. Фотографирование проводилось с интервалом циклической нагрузки 1000 циклов и автоматическим режимом наведения фокуса. С использованием программного обеспечения DVECT [12] проводится расчет компонент деформации, и в частности интенсивности деформации сдвига (рис. 2, блок 4.3).

Спецификой циклических испытаний является регулярное удлинение образца подвижным захватом испытательной машины. По этой причине фотографирование должно быть произведено синхронно с перемещением захвата при минимальном удлинении образца, поскольку только в этом случае удастся оценить его остаточную деформацию. Для решения поставленной задачи была разработана схема синхронизации при фотографировании поверхности образца в процессе приложения циклической нагрузки (рис. 3). Программная реализация для ПЭВМ представленной схемы позволяет автоматически, с учетом данных обратной связи, формировать управляющие сигналы. Отметим, что возможность управлять работой испытательной машины появилась благодаря использованию функции глобального доступа к памяти (Global Data Sharing), которую обеспечивает программное обеспечение контроллера серии 2370SS [13].



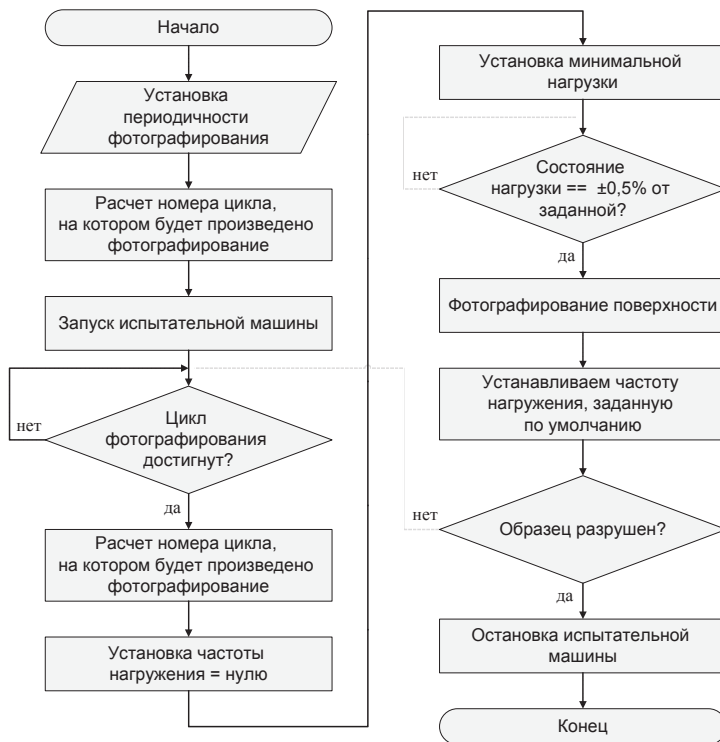
**Рис. 1.** Блок-схема комплекса для исследования усталостного разрушения комбинацией методов АЭ, картирования деформации на поверхности и тензометрии

**Fig. 1.** Block-chart for setup for investigation of fatigue fracture by combination of acoustic emission, surface strain mapping and strain gauging



**Рис. 2.** Блок-схема алгоритма регистрации, обработки и анализа информации в стенде комбинированного исследования усталостного разрушения

**Fig. 2.** Flow chart of algorithm for registration, processing and information analysis in the setup for combined investigation of fatigue failure



**Рис. 3.** Блок-схема программы, предназначенной для синхронизации приложения циклической нагрузки и фотографирования образца

**Fig. 3.** Flow chart of the program for synchronization of applying cyclic loading and specimen capturing

Основными параметрами нагружения, задаваемыми программно перед началом испытаний, являются: максимальная и минимальная сила приложения циклической нагрузки; частота механического циклирования; количество циклов нагружения до остановки испытаний; периодичность по времени фотографирования поверхности образца.

С использованием разработанного программного обеспечения сразу после запуска испытательной машины проводится мониторинг информации, поступающей от контроллера. При достижении заданного количества циклов на контроллер подается управляющий сигнал о снижении частоты циклирования до нуля, что позволяет приостановить перемещение подвижного захвата; следующий за ним сигнал корректирует нагрузку. После того как нагрузка на образце установлена в пределах  $\pm 0,5\%$  от заданной величины, приложение подает камере запрос на фотографирование поверхности. Последующий управляющий сигнал инициирует продолжение нагружения с первоначально заданными параметрами.

Поскольку для регистрации изображений поверхности использовали зеркальную фотокамеру Canon, для управления ее работой было разработано программное обеспечение, на основе средств разработчика EDSDK (Canon?). Использование последней позволяет управлять камерой без установки дополнительных драйверов, так как используется стандартный драйвер, входящий в состав ОС Windows. Программное обеспечение для фотографирования поверхности позволяет управлять: чувствительностью камеры; временем выдержки затвора; балансом белого; фокусировкой объектива.

В основу блока регистрации акустической эмиссии был положен разработанный нами ранее [11] стенд регистрации АЭ (рис. 1, блоки 1, 6, 7) с внесенными в него изменениями и модификациями, в которых регистрация АЭ проводилась путем on-line выделения полезных сигналов из потока входных данных.

Запись данных АЭ производится с помощью платы сбора данных; для инициализации ее работы необходимо задать следующие параметры: частоту дискретизации сигнала; количество каналов записи; размер блока данных. Запись данных осуществляется блоками. Перед каждым блоком данных записывается идентификатор и информация о номере и размере блока. Основная роль идентификатора заключается в повышении надежности определения информативных блоков и следующего за ними блока данных. Информация о номере и размере блока данных необходима для последующего восстановления шкалы времени.

Актуальная проблема, решение которой проводилось в работе, была связана со значительным шумовым фоном, возникающим в процессе работы испытательной машины, а также значительным количеством АЭ-сигналов, равных по уровню и даже превышающих полезные сигналы, но по своей природе являющихся помехами. Для исключения

подобных сигналов из рассмотрения авторами был реализован алгоритм фильтрации [14], основанный на анализе энергетического параметра MARSE (Measured Area of the Rectified Signal Envelope) [15]. По сравнению с методом регистрации сигналов с амплитудной дискриминацией (обнаружение по превышению установленного порога) использование в качестве параметра обнаружения энергетической характеристики более предпочтительно, так как параметр MARSE чувствителен одновременно и к амплитуде, и к длительности сигнала. Кроме того, параметр MARSE менее зависим от установленного порога и частоты, что позволяет относительно легко избавиться от влияния импульсных помех.

Следует отметить, что применение энергетического параметра для выделения сигналов АЭ не является безальтернативным. Так, авторы работ [16–20] для решения подобных задач разработали и успешно применяют в своих исследованиях методы кластеризации на основе различных параметров сигналов АЭ. В следующих работах авторы также планируют использовать более широкий набор параметров для получения более достоверной информации о регистрируемых сигналах АЭ.

#### Тестирование стенда и результаты эксперимента

Тестирование разработанных аппаратных средств, алгоритмического и программного обеспечения стенда комбинированного исследования усталостного разрушения проводили с использованием образцов алюминиевого сплава В96 с концентратором напряжений в форме центрального отверстия диаметром 6 мм.

Испытания проводили в области малоциклового усталости (долговечность менее 50 тыс. циклов). Фотокамеру устанавливали на штатив, приблизительно на расстоянии 1 м от образца. Частота опроса линейного датчика перемещений составляла 5 кГц. Параметры нагружения приведены в таблице.

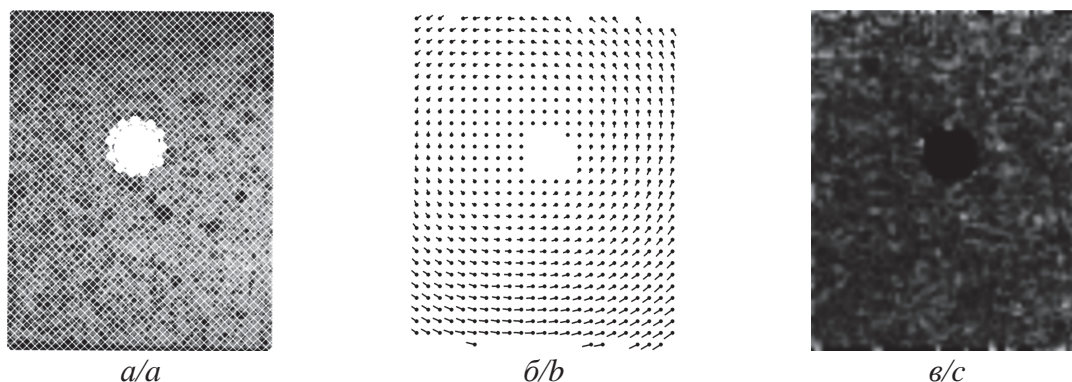
**Таблица.** Параметры циклического нагружения образцов сплава В96

**Table.** Parameters of cyclic load of V96 alloy samples

Макс./мин. напряжение, МПа max/min stress, MPa	Макс./мин. нагрузка, кН max/min load, kN	Асимметрия цикла Cycle asymmetry	Количество циклов до разрушения Amount of cycles to failure
173/17,3	20,229/2,0229	0,1	~40 000

На рис. 4, а приведено оптическое изображение поверхности образца, отражающее ее состояние на этапе  $3 \cdot 10^3$  циклов нагружения. Зарождение усталостной трещины визуально фиксируется лишь при количестве циклов нагружения  $N > 30 \cdot 10^3$ . Это подтверждается графиком зависимости удлинения образца ( $l$ , мм) от времени испытаний (рис. 5, а). Условно последний график можно разбить на три участка (стадии), характеризующиеся различной скоростью удлинения: стадия I характеризуется





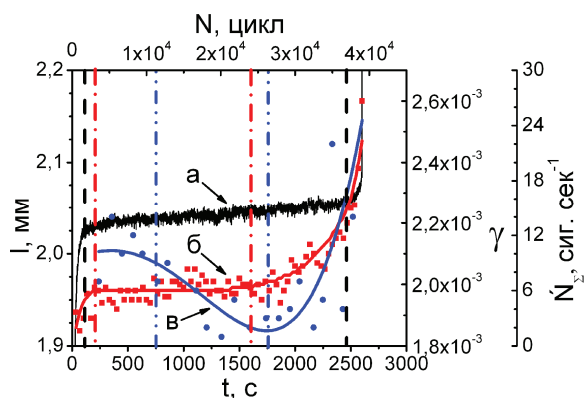
**Рис. 4.** Оптическое изображение поверхности образца (а), соответствующее ему поле векторов перемещений (б) и распределение интенсивности деформации сдвига (в), полученные и рассчитанные на этапе циклического нагружения равному  $3 \cdot 10^3$  циклов

**Fig. 4.** Optical images of specimen surface (a), corresponding displacement vector field (b) and shear strain intensity (c) calculated at cyclic loading of  $3 \cdot 10^3$  cycles

достаточно быстрым ростом трещины (до  $N \sim 0.2 \cdot 10^3$  циклов). Стадия II отражает стабильный рост трещины и соответствует большей длительности всего нагружения (до  $N \sim 36 \cdot 10^3$  циклов). Наконец, стадия III соответствует катастрофическому росту трещины и составляет менее четверти от общей продолжительности испытаний.

явном виде прослеживается наличие всех трех стадий в изменении параметра  $\gamma$  от времени нагружения, которые с позиции длительности достаточно хорошо коррелируют с результатами данных тензометрии.

На рис. 5, кривая в ( $\dot{N}_s$ ) приведен график активности АЭ по мере циклического нагружения. Видно, что на нем также четко проявляются три участка, первый из которых длится до  $t = 750$  с от начала нагружения, второй до  $t = 1750$  с, а третий завершается в момент разрушения. Таким образом, временные границы начала и окончания стадия III по данным тензометрии и акустической эмиссии (равно как и картирования деформации на поверхности) неплохо соответствуют друг другу, что, безусловно, вызвано зарождением и ростом усталостной трещины. Различие во времени начала второй стадии может быть связано с длительным локализованным развитием пластической деформации в небольшой зоне в окрестности отверстия (что должно сопровождаться постепенным снижением активности АЭ в образце). В этом случае имеет место различная чувствительность каждого из методов к (локализованному) развитию деформации на микромасштабном уровне (данные АЭ) и интегральному удлинению образца (данные тензометрии).



**Рис. 5.** Временные зависимости данных тензометрии  $l$  от  $t$  (а), интенсивности деформации сдвига  $\gamma$  от  $t$  (б) и активности АЭ  $\dot{N}_s$  от  $t$  (в)

**Fig. 5.** Time dependences of strain gauging data  $l$  vs  $t$  (a), shear strain intensity  $\gamma$  vs  $t$  (б) acoustic emission activity  $\dot{N}_s$  vs  $t$  (в)

На основании построенных полей векторов перемещений (рис. 4, б) были рассчитаны значения интенсивности деформации сдвига  $\gamma$  (график интегрального значения которого показан на рис. 5, кривая б). 2D-картина распределения  $\gamma$  приведена на рис. 4, в. Видно (рис. 5, кривая б), что до момента времени  $t = 200$  с она имела минимальное значение. С момента времени  $t = 200$  и до  $t = 1600$  с величина  $\gamma$  составляла  $\gamma \approx 2 \cdot 10^{-3}$ . При количестве циклов нагружения  $N \sim 30 \cdot 10^3$  начинается заметный рост анализируемого параметра, который перед разрушением достигает максимального значения  $\gamma \approx 2,6 \cdot 10^{-3}$ . Таким образом, на указанном графике в

### Выводы

На базе серийной сервогидравлической испытательной машины разработан лабораторный стенд для изучения поведения образцов конструкционных материалов при циклических испытаниях, включающий in situ регистрацию данных тензометрии, картирования деформации на поверхности и акустической эмиссии. С учетом специфики циклического приложения нагрузки предложены алгоритмы регистрации информации, обеспечивающие синхронизацию фотографирования с нагружением, а также выделения из потока данных только полезных сигналов АЭ. В основу принципа функционирования стенда положено выделение и

совместный анализ характерных стадий изменения информативных параметров: интенсивности деформации сдвига, активности акустической эмиссии и удлинения образца как функции количества циклов нагружения.

Проведено тестирование разработанного стенда при циклическом растяжении образцов сплава В96. Показано, что изменение всех трех информативных параметров (регистрируемых от различных датчиков) во времени характеризуется тремя выраженными стадиями, причем начало стадии III (распространение трещины) четко совпадает по времени для всех проанализированных зависимостей. Несоответствие по времени начала стадии II наиболее вероятно обусловлено двумя причинами: для картирования деформации на поверхности это невысокое разрешение оптической системы, что не позволяет выявить развитие деформации на малых пространственных масштабах; для метода АЭ – чувствительность метода к механизмам деформации только микромасштабного уровня, а

также высокая интенсивность деформации в начале циклического нагружения, что при конечной чувствительности АЭ аппаратуры не позволяет фиксировать все «полезные» АЭ сигналы.

Дальнейшее развитие предложенного подхода и стенда для его реализации предполагает использование нескольких датчиков акустической эмиссии для решения задач локации и идентификации источников, использование более высокого разрешения оптической системы для повышения чувствительности оценки деформации оптическим методом и использование контактного датчика раскрытия трещины, а также расчет параметра COD (смещение раскрытия трещины) для увеличения точности оценки локальной деформации в области концентратора напряжений.

*Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы, а также гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ «Школа академика В.Е. Панина» № 2817.2014.1 (2014–2015 гг.).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barat V., Borodin Y., Kuzmin A. Intelligent AE signal filtering methods // Journal of Acoustic Emission. – 2010. – V. 28. – P. 109–119.
2. Barat V., Grishin D., Rostovtsev M. Detection of signals against background friction noise. Journal of Acoustic Emission. – 2011. – V. 29. – P. 133–141.
3. Акустико-эмиссионный контроль криволинейных панелей фюзеляжа самолета RRJ при ресурсных испытаниях / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, О.В. Митрофанов и др. // Дефектоскопия. – 2008. – № 12. – С. 42–47.
4. Использование метода акустической эмиссии и тензометрии при проверке остаточной прочности самолета / А.Н. Серьезнов, Степанова Л.Н., А.Б. Тихонравов и др. // Дефектоскопия. – 2008. – № 2. – С. 28–35.
5. James M.R., Morris W.L., Cox B.N. A High Accuracy Automated Strain-Field Mapper. // Experimental Mechanics. – 1990. – № 30. – P. 60–67.
6. Chivers K.F., Clocksin W.F. Inspection of surface strain in materials using optical flow // Eleventh British Machine Vision Conference. – Bristol, September 2000. – P. 392–401.
7. Lin Q., Labuz J.F. Identifying quasi-brittle fracture by AE and digital imaging // Journal of Acoustic Emission. – 2011. – V. 29. – P. 68–77.
8. Заверткин С.Д. Электромагнитная и акустическая эмиссия при фазовых переходах в минералах и гетерогенных материалах: автореф. дис.... д-ра геол.-минерал. наук. –Томск, 2011. – 46 с.
9. Многомасштабное исследование стадийности локализованной пластической деформации при растяжении образцов сплава Д16АТ с надрезами акустико-эмиссионным и оптико-телевизионными методами / С.В. Панин, А.В. Бяков, В.В. Гренке, И.В. Шакиров, С.А.К. Юсиф // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12. – № 6. – С. 63–72.
10. Testing of automatic system for registration, processing and analysis of acoustic emission data by model signals / S.V. Panin, A.V. Biakov, M.S. Kuzovlev, V.V. Grenke, I.V. Shakirov, B.B. Ovechkin // Proceedings IFOST'2009. Ho Chi Ming City, Vietnam, 21–23 October, 2009. – V. 3. – P. 202–206.
11. Разработка и испытание лабораторного стенда регистрации и анализа данных акустической эмиссии / С.В. Панин, А.В. Бяков, В.В. Гренке, И.В. Шакиров, О.В. Башков // Автометрия. – 2011. – Т. 47. – № 1. – С. 115–128.
12. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2004612276. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 06.10.2004 / Любутин П.С., Панин С.В., Сапожников С.В., Сырякин В.И. Программа построения векторов смещений и оценки деформаций поверхностей твердых тел.
13. Sunder R. Recent developments to improve the quality and economics of testing for fatigue and fracture // Strength of Materials. – 2009. – V. 41. – № 1. – P. 8–19.
14. Куликов Д.А., Харитонов К.О., Чье Ен Ун. Обнаружение импульсов акустической эмиссии и обеспечение единого времени в системе сейсмоакустического контроля горного давления // Измерительная техника. – 2007. – № 2 (14). – С. 109–119.
15. ПБ 03–593–03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. – СПб.: Изд-во ДЕАН, 2004. – 64 с.
16. Barat V.A., Alyakritskiy A.L. Automated method for statistic processing of AE testing data // Journal of Acoustic Emission. – 2008. – V. 26. – P. 132–141.
17. Crack growth monitoring with hierarchical clustering of AE / N.F. Ince, Chu-Shu Kao, M. Kaveh, A. Tewfik, J.F. Labuz // Journal of Acoustic Emission. – 2009. – V. 27. – P. 167–185.
18. Разработка метода кластеризации по параметрам сигналов акустической эмиссии / Л.Н. Степанова, К.В. Канифадин, И.С. Рамазанов, С.И. Кабанов // Дефектоскопия. – 2010. – № 2. – С. 78–89.
19. Использование двухэтапной кластеризации сигналов акустической эмиссии для определения дефектов сварки / Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов, К.В. Канифадин, В.В. Кириченко // Дефектоскопия. – 2011. – № 6. – С. 44–49.
20. Степанова Л.Н., Рамазанов И.С., Канифадин К.В. Динамическая кластеризация по набору параметров сигналов акустической эмиссии // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 10. – С. 12–16.

*Поступила 01.04.2013 г.*

UDC 53.08.004, 53.087/.088

## TEST BENCH FOR FATIGUE FAILURE INVESTIGATION BY COMBINATION OF ACOUSTIC EMISSION, SURFACE STRAIN MAPPING AND TENSOMETRY

**Sergey V. Panin,**

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia;  
Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS,  
2/4, Academicheskii avenue, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: svp@ispms.tsc.ru

**Anton V. Byakov,**

Cand. Sc., Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS,  
2/4, Academicheskii avenue, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: bjakov@ispms.tsc.ru

**Pavel S. Lyubutin,**

Cand. Sc., Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS,  
2/4, Academicheskii avenue, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: psl@sibmail.com

**Ramasubbu Sunder,**

PhD, Bangalore Integrated System Solutions (P) Ltd (BiSS), 41a, Cross AECS,  
Bangalore, 560094, India. E-mail: rs@biss.in

**Viktor V. Grenke,**

Cand. Sc., Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS,  
2/4, Academicheskii avenue, Tomsk, 634021, Russia.  
E-mail: viktor.grenke@gmail.com

**Igor V. Shakirov,**

Cand. Sc., Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS,  
2/4, Academicheskii avenue, Tomsk, 634021, Russia.  
E-mail: igor.shakirov@gmail.com

**Oleg V. Bashkov,**

Dr. Sc., Komsomolsk-on-Amur State Technical University, 27, Lenin avenue,  
Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: bashkov\_ov@mail.ru

*Based on industrial servohydraulic testing machine the authors have designed a laboratory setup for studying behavior of structural material samples under cyclic testing. It includes in situ strain gauging data registration, surface strain mapping and acoustic emission data. Taking into account cyclic pattern of loading application the algorithms for information acquisition were offered that provides synchronization of surface image capturing with loading as well as detecting acoustic emission signals from input data flow. The operation principle of the setup is underlined by detecting and joint analysis of characteristic stages of informative parameters changing: shear strain intensity, acoustic emission activity and specimen elongation as a function of number of loading cycles.*

*The authors tested the setup designed under tension of A7075 alloy specimens. It is shown that changing of all three informative parameters (registered by three different sensors) in time is characterized by 3 pronounced stages. The beginning of the III stage (crack propagation) coincides well for all three dependences. Difference in time of the II stage beginning is most probably related to a couple of reasons. For surface strain mapping it is governed by low resolution of optical system that does not allow revealing deformation development at low spatial scales. For acoustic emission method it is associated with sensitivity of the technique to deformation mechanisms of microscale level as well as high deformation intensity at the onset of cyclic loading. If this takes place finite sensitivity of AE equipment did not allow registering all informative acoustic emission signals.*

*The development of the offered technique and the setup is related to use of several AE sensors for solving the problems of AE source location and identification. The optical sensors of higher resolution will be attracted as well in order to increase sensitivity of strain measurement by optical technique.*

### **Key words:**

*Image processing, acoustic emission, digital image correlation, strain gauging, fatigue.*

*The research was supported by the program of basic scientific studies of the RF state academies of sciences for 2013–2020 and the grant of the President of the RF for support of leading scientific schools «Scholl of academician V.E. Panin» No. 2817.2014.1 (2014–2015).*

## REFERENCES

1. Barat V., Borodin Y., Kuzmin A. Intelligent AE signal filtering methods. *Journal of Acoustic Emission*, 2010, vol. 28, pp. 109–119.
2. Barat V., Grishin D., Rostovtsev M. Detection of signals against background friction noise. *Journal of Acoustic Emission*, 2011, vol. 29, pp. 133–141.
3. Sereznov A.N., Stepanova L.N., Mitrofanov O.V. Akustiko-emissionnyy kontrol krivolineynykh paneley fyuzelyazha samoleta RRJ pri resurnykh ispytaniykh [Acoustic-emission inspection of curved panels of fuselage of RRJ aircraft under resource testing]. *Defektoskopiya – Defectoscopy*, 2008, no. 12, pp. 42–47.
4. Sereznov A.N., Stepanova L.N., Tikhonravov A.B. Ispolzovanie metoda akusticheskoy emissii i tenzometrii pri proverke ostatochnoy prochnosti samoleta [Application of acoustic emission technique at inspection of an aircraft residual strength]. *Defektoskopiya – Defectoscopy*, 2008, no. 2, pp. 28–35.
5. James M.R., Morris W.L., Cox B.N. A High Accuracy Automated Strain-Field Mapper. *Experimental Mechanics*, 1990, no. 30, pp. 60–67.
6. Chivers K.F., Clocksin W.F. Inspection of surface strain in materials using optical flow. *Eleventh British Machine Vision Conference*. Bristol, September 2000. pp. 392–401.
7. Lin Q., Labuz J.F. Identifying quasi-brittle fracture by AE and digital imaging. *Journal of Acoustic Emission*, 2011, vol. 29, pp. 68–77.
8. Zavertkin S.D. *Elektromagnitnaya i akusticheskaya emissiya pri fazovykh perekhodakh v mineralakh i geterogennykh materialakh*. Avtoreferat Diss. Dokt. nauk [Electromagnetic and acoustic emission under phase transitions in mineral and heterogeneous materials. Dr. Sc. Abstract]. Tomsk, 2011. 46 p.
9. Panin S.V., Byakov A.V., Grenke V.V., Shakirov I.V., Jussif S.A.K. Mnogomasshtabnoe issledovanie stadiynosti lokalizovannoy plasticheskoy deformatsii pri rastyazhenii obraztsov splava D16AT s nadrezami akustiko-emissionnym i optiko-televizionnym metodami [Multiscale investigation of stage pattern of localized plastic deformation under tension of A2024 alloy specimens with notches by acoustic emission and television-optical methods]. *Fizicheskaya mezomekhanika – Physical Mesomechanics*, 2009, vol. 12, no. 6, pp. 63–72.
10. Panin S.V., Biakov A.V., Kuzovlev M.S., Grenke V.V., Shakirov I.V., Ovechkin B.B. Testing of automatic system for registration, processing and analysis of acoustic emission data by model signals. *Proceedings IFOST'2009*. Ho Chi Ming City, Vietnam, 21–23 October 2009. Vol. 3, pp. 202–206.
11. Panin S.V., Byakov A.V., Grenke V.V., Shakirov I.V., Bashkov O.V. Razrabotka i ispytanie laboratornogo stenda registratsii i analiza dannyykh akusticheskoy emissii [Development and testing of laboratory setup for registration and analysis of acoustic emission data]. *Avtometriya – Autometry*, 2011, vol. 47, no. 1, pp. 115–128.
12. Lyubutin P.S., Panin S.V., Sapozhnikov S.V., Syryamkin V.I. *Programma postroeniya vektorov smeshcheniya i otsenki deformatsiy poverkhnostey tverdykh tel* [Program for constructing displacement vectors and estimation of surface deformation of solids]. Svidetelstvo ob ofitsialnoy registratsii programm dlya EVM – Certificate for official registration software for PC no. 2004612276, 2004.
13. Sunder R. Recent developments to improve the quality and economics of testing for fatigue and fracture. *Strength of Materials*, 2009, vol. 41, no. 1, pp. 8–19.
14. Kulikov D.A., Kharitonov K.O., Che En Un. Obnaruzhenie impulsov akusticheskoy emissii i obespechenie edinogo vremeni v sisteme seysmoakusticheskogo kontrolya gornogo davleniya [Revealing acoustic emission pulses and providing unite time in a system for seismic inspection of mine pressure]. *Izmeritelnaya tekhnika – Measuring equipment*, 2007, no. 2 (14), pp. 109–119.
15. PB 03–593–03. *Pravila organizatsyi i provedeniya akustiko-emissionnogo kontrolya sudov, apparatov, kotlov i tekhnologicheskikh truboprovodov* [Rules for organizing and carrying out acoustic emission inspection of vessels, apparatus, boilers and technological pipelines]. St. Petersburg, DEAN Publ., 2004. 64 p.
16. Barat V.A., Alyakritskiy A.L. Automated method for statistic processing of AE testing data. *Journal of Acoustic Emission*, 2008, vol. 26, pp. 132–141.
17. Ince N.F., Chu-Shu Kao, Kaveh M., Tewfik A., Labuz J.F. Crack growth monitoring with hierarchical clustering of AE. *Journal of Acoustic Emission*, 2009, vol. 27, pp. 167–185.
18. Stepanova L.N., Kanifadin K.V., Ramazanov I.S., Kabanov S.I. Razrabotka metoda klasterizatsii po parametram signalov akusticheskoy emissii [Development of method for clusterization over parameters of acoustic emission signals]. *Defektoskopiya – Defectoscopy*, 2010, no. 2, pp. 78–89.
19. Stepanova L.N., Ramazanov I.S., Kanifadin K.V., Kireenko V.V. Ispolzovanie dvukhetapnoy klasterizatsiyi signalov akusticheskoy emissii dlya opredeleniya defektov svarki [Application of two-stage clusterization of acoustic emission for detecting defects of welding]. *Defektoskopiya – Defectoscopy*, 2011, no. 6, pp. 44–49.
20. Stepanova L.N., Ramazanov I.S., Kanifadin K.V. Dinamicheskaya klasterizatsiya po naboru parametrov signalov akusticheskoy emissii [Dynamic clusterization by set of parameters of acoustic emission signals]. *Kontrol. Diagnostika – Inspection. Diagnostics*, 2012, no. 10, pp. 12–16.

Received: 01 April 2013.



УДК 539.621

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПТ-ЗВ И ВТ6 С КРУПНОЗЕРНИСТОЙ И УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРОЙ

**Круковский Константин Витальевич,**

канд. техн. наук, мл. науч. сотр. Лаборатории материаловедения сплавов с памятью формы Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634021, Томск, пр. Академический, 2/4. E-mail: kvk@ispms.tsc.ru

**Кашин Олег Александрович,**

д-р техн. наук, ведущ. науч. сотр. Лаборатории материаловедения сплавов с памятью формы Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634021, Томск, пр. Академический, 2/4. E-mail: okashin@ispms.tsc.ru

**Гирсова Наталья Васильевна,**

инженер Лаборатории материаловедения сплавов с памятью формы Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634021, Томск, пр. Академический, 2/4. E-mail: girsova@ispms.tsc.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения триботехнических характеристик титановых сплавов с целью расширения сферы их применения.

**Цель работы:** изучение закономерностей изнашивания титановых сплавов ПТ-ЗВ и ВТ6 с крупнозернистой и ультрамелкозернистой структурой при трении с граничной смазкой. Выявление наиболее значимых параметров ультрамелкозернистой структуры, влияющих на износостойкость сплавов ПТ-ЗВ и ВТ6. Определение наиболее оптимальных режимов абс-прессования, обеспечивающих формирование ультрамелкозернистой структуры с параметрами, максимально повышающими износостойкость сплавов ПТ-ЗВ и ВТ6.

**Методы исследования:** рентгеновский структурно-фазовый анализ с излучением  $CoK_{\alpha}$ , оптическая металлография, методы растровой и электронной микроскопии, метод микрорентгеноспектрального анализа, метод дифракции обратнорассеянных электронов (ДРОЭ) с использованием программного обеспечения CHANNEL 5.

**Результаты:** формирование в сплавах ПТ-ЗВ и ВТ6 ультрамелкозернистой структуры с использованием методов интенсивной пластической деформации не изменяет адгезионного механизма изнашивания этих сплавов. Изнашивание сплавов ПТ-ЗВ и ВТ6 как с крупнозернистой, так и с ультрамелкозернистой структурой происходит в результате адгезионного переноса материала образцов на контртело и образования большого количества частиц изнашивания. При формировании высоконеравновесной структуры именно неравновесность структуры оказывает определяющее влияние на его сопротивление изнашиванию.

### Ключевые слова:

Титановые сплавы, закономерности изнашивания, ультрамелкозернистая структура, неравновесность структуры, дифракция обратнорассеянных электронов.

### Введение

Наиболее распространенными конструкционными титановыми сплавами являются  $(\alpha+\beta)$ -сплавы системы Ti-Al-V ВТ6 и ПТ-ЗВ. По данным [1], около 50 % используемого в авиакосмической промышленности титана приходится на сплав ВТ6 (Ti-6Al-4V), кроме того, сплав ВТ6 широко применяется в имплантационной медицине. Сплав ПТ-ЗВ главным образом используют в судостроении, из него изготавливают обшивку судов, гребные винты, теплообменники и другие изделия. Однако в ряде случаев их применение ограничивается низкими триботехническими свойствами: высокой склонностью к схватыванию, низким сопротивлением изнашиванию [2, 3]. Это является проблемой для большинства титановых сплавов. Влияние легирующих элементов в титановых сплавах на их изнашивание исследовано в недостаточной степе-

ни, что не позволяет сделать однозначных выводов о возможности повышения триботехнических характеристик титановых сплавов за счет целенаправленного легирования. В тех случаях, когда титановые сплавы всё же используются в триботехнических узлах, применяют, как правило, различные методы модификации поверхности [4].

Стремление современной техники к снижению материалоемкости привело к появлению нового класса материалов с объёмной ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой. Одним из методов формирования такой структуры являются методы интенсивной пластической деформации (ИПД) [5–8]. Разумеется, сплавы системы Ti-Al-V, как наиболее применяемые в качестве конструкционных материалов титановые сплавы, были одними из первых, в которых была сформирована ультрамелкозернистая структура. Исследования прочностных



**Таблица 1.** Химический состав (вес. %) исследуемых материалов**Table 1.** Chemical composition (wt. %) of the materials

Марка и основные фазы Grade and main phases	Al	V	Zr	Si	Fe	C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
<b>ПТ-3В <math>\alpha+\beta</math></b>	<b>4,66</b>	<b>1,92</b>	0,02	0,013	0,006	0,004	0,096	0,006	0,006
<b>ВТ6 <math>\alpha+\beta</math></b>	<b>6,2</b>	<b>4,0</b>	0,02	0,038	0,13	0,006	0,168	0,010	0,002

свойств таких сплавов с УМЗ структурой ведутся довольно широко, однако изучению их триботехнических свойств посвящено ограниченное число работ [9, 10].

В связи с вышесказанным в настоящей работе были исследованы закономерности изнашивания титановых сплавов ПТ-3В и ВТ6 с ультрамелкозернистой и крупнозернистой структурой в условиях трения с граничной смазкой.

#### Материалы и методики исследований

В табл. 1 показан химический состав исследуемых сплавов по сертификату.

Для получения крупногабаритных заготовок из сплавов ПТ-3В и ВТ6 с ультрамелкозернистой структурой использовали разработанные в Институте проблем сверхпластичности металлов (г. Уфа) в рамках Госконтракта № 02.447.11.2002 оригинальные технологические режимы с использованием метода *abc*-прессования. Для исследования триботехнических свойств были отобраны заготовки, технологические режимы получения которых обеспечивали формирование в них структуры с разным размером зерен и различной степенью неравновесности структуры.

В табл. 2 приведены использованные в настоящей работе обозначения исследованных титановых сплавов в зависимости от технологии их получения. Крупнозернистые (КЗ) сплавы ПТ-3В и ВТ6 в состоянии заводской поставки были в виде прутков горячейковки диаметром 170 мм. В табл. 2 эти материалы обозначены как КЗ ПТ-3В и КЗ ВТ6.

Сплав УМЗ ПТ-3В I был получен путем *abc*-прессования крупногабаритных заготовок без пресс-формы в интервале температур 1173–773 К. Каждый температурный этап деформации включал многократное проведение операций осадки со сменой оси заготовки, степень осадки при каждом прессовании составляла около 50 %. На конечной стадии заданная степень истинной деформации была  $e \approx 7,4$ .

Сплав УМЗ ВТ6 I получен путем *abc*-прессования крупногабаритных заготовок без пресс-формы по указанному выше режиму, но в интервале температур 1173–873 К.

Дополнительно проводилась изотермическая протяжка заготовок на пруток диаметром 80 мм при температуре 873 К (дробная осадка по образующей с постепенным поворотом заготовки вокруг продольной оси на 30° до получения конечного диаметра прутка). На конечной стадии заданная степень истинной деформации была  $e \approx 7,7$ .

**Таблица 2.** Технологические схемы получения материалов для исследования**Table 2.** Process flowsheets of obtaining materials

Обозначение Name	Технологическая схема получения Process flowsheets of obtaining
ПТ-3В	
КЗ ПТ-3В	Заводская поставка/Plant supply
УМЗ ПТ-3В I	<i>abc</i> -прессование/ <i>abc</i> -pressing (1173–773 К, $e \approx 7,4$ )
ВТ6	
КЗ ВТ6	Заводская поставка/Plant supply
УМЗ ВТ6 I	<i>abc</i> -прессование/ <i>abc</i> -pressing (1173–873К, $e \approx 7,3$ ) + протяжка/spreading (873 К, $e \approx 0,4$ )
УМЗ ВТ6 I	<i>abc</i> -прессование/ <i>abc</i> -pressing (1173–873К, $e \approx 7,3$ ) + раскатка/spreading (773 К, $e \approx 1,2$ )

Сплав УМЗ ВТ6 II был получен по двухэтапной схеме. На первом этапе проводили *abc*-прессование по тому же режиму, как и для УМЗ ВТ6 I, а затем производилась раскатка на кольцо внешним диаметром 300 мм, внутренним диаметром 200 мм, толщиной 80 мм при температуре 773 К. На конечной стадии заданная степень истинной деформации была  $e \approx 7,5 \dots 8,5$ .

Микроструктурные исследования проводили с использованием оборудования ЦКП «НАНОТЕХ» ИФПМ СО РАН: оптического микроскопа Axiovert-200M, просвечивающего электронного микроскопа ЭМ-125К, растрового электронного микроскопа EVO 50 с возможностью микрорентгеноспектрального анализа и с приставкой Nordlys для исследований методом дифракции обратно рассеянных электронов. Механические испытания на растяжение выполнены на машине Instron.

Средний размер зерен определяли методом секущей по микрофотографиям оптической и просвечивающей электронной микроскопии.

Степень неравновесности оценивали по методике, описанной в работах [11, 12]. В работе [12] на примере титана ВТ1–0, в котором была сформирована ультрамелкозернистая структура методами ИПД по различным режимам, было показано, что в зависимости от режима ИПД формируется структура с различной степенью неравновесности. Степень неравновесности была измерена с помощью оригинальной методики, основанной на методе дифракции обратнорассеянных электронов, и оценивалась коэффициентом детектирования  $K_{det}$ , рассчитанным при помощи данной методики для всех исследуемых материалов. Максимальное значение этого коэффициента (100 %) соответствует идеальной кристаллической решетке, а чем меньше значение коэффициента, тем более неравновесна

структура. Также в работе было показано, что для титана ВТ1–0 с ультрамелкозернистой структурой нет явно выраженной взаимосвязи сопротивления изнашиванию, как со средним размером зерен, так и с их механическими свойствами. Однако прослеживается четкая корреляция сопротивления изнашиванию с величиной коэффициента детектирования  $K_{det}$ , характеризующего неравновесность структуры: чем больше неравновесность структуры, тем меньшим сопротивлением изнашиванию обладает материал.

Триботехнические испытания образцов проводили по схеме диск–палец в режиме граничной смазки при скорости скольжения 3 м/с и нагрузке 25 Н на машине трения, которая позволяет одновременно испытывать три образца, движущихся по одной и той же дорожке по поверхности контртела. В качестве смазки применяли промышленное масло И-20. Образцы для исследований в виде параллелепипедов размерами 4×4×40 мм вырезали из массивных заготовок на электроискровом станке. Контртело было изготовлено из закаленной стали ШХ15. Перед испытаниями поверхности трения образцов и контртела шлифовали до зеркального блеска, а образцы после этого дополнительно подвергали электролитической полировке для снятия наклепанного слоя. Измерения потери массы образцов в процессе испытаний на износ проводили путем их взвешивания на аналитических весах с точностью  $10^{-4}$  г. Результаты взвешивания усредняли по трем одновременно испытанным образцам.

Конструкция испытательной машины позволяет останавливать испытания в любой точке пути для проведения взвешивания, и при повторной установке образцов на машину процесс изнашивания происходил без дополнительной приработки. Это позволило получить экспериментальные зависимости потери массы образцов от пути трения. Путь трения не ограничивали фиксированной величиной, испытания прекращали после того, как стабилизировалась скорость изнашивания, либо после того, как происходило схватывание образца с контртелом.

### Экспериментальные результаты

Для удобства сопоставления данные по параметрам структуры, полученные методами дифракции обратнорассеянных электронов и просвечивающей микроскопии, и механическим свойствам приведены в сводной таблице (рис. 1). В верхнем ряду приведены параметры структуры и механические свойства материалов, а также коэффициент детектирования, характеризующий степень неравновесности структуры. Во втором ряду приведены микрофотографии (рис. 1, а–д), полученные методом просвечивающей электронной микроскопии. В нижней ряду приведены карты качества картин дифракции (рис. 1, а'–д'), полученные методом дифракции обратнорассеянных электронов.

Из представленных на рис. 1 карт качества картин дифракции видно, что для образцов с крупнозернистой структурой (КЗ ПТ-3В и КЗ ВТ6) детектирована вся заданная площадь (рис. 1, а', в'), что свидетельствует о равновесности структуры. Коэффициенты детектирования  $K_{det}$  составляют соответственно 98 и 97 %.

На рис. 1, б' представлена карта качества картин дифракции УМЗ ПТ-3В I (*abc*-прессование с конечной температурой 773 К). Из рисунка видно, что хорошее качество картин дифракции (наиболее светлые области) наблюдается только в центре зёрен – чем дальше от центра зерна, тем темнее точки. Коэффициент детектирования  $K_{det}$  для данной карты очень низкий и составляет 23 % (рис. 1, а), то есть микроструктура сплава сильно неравновесна. По всей видимости, при использованном режиме *abc*-прессования не успевают в полной мере протекать процессы возврата, о чём косвенно свидетельствует и высокая плотность дислокаций.

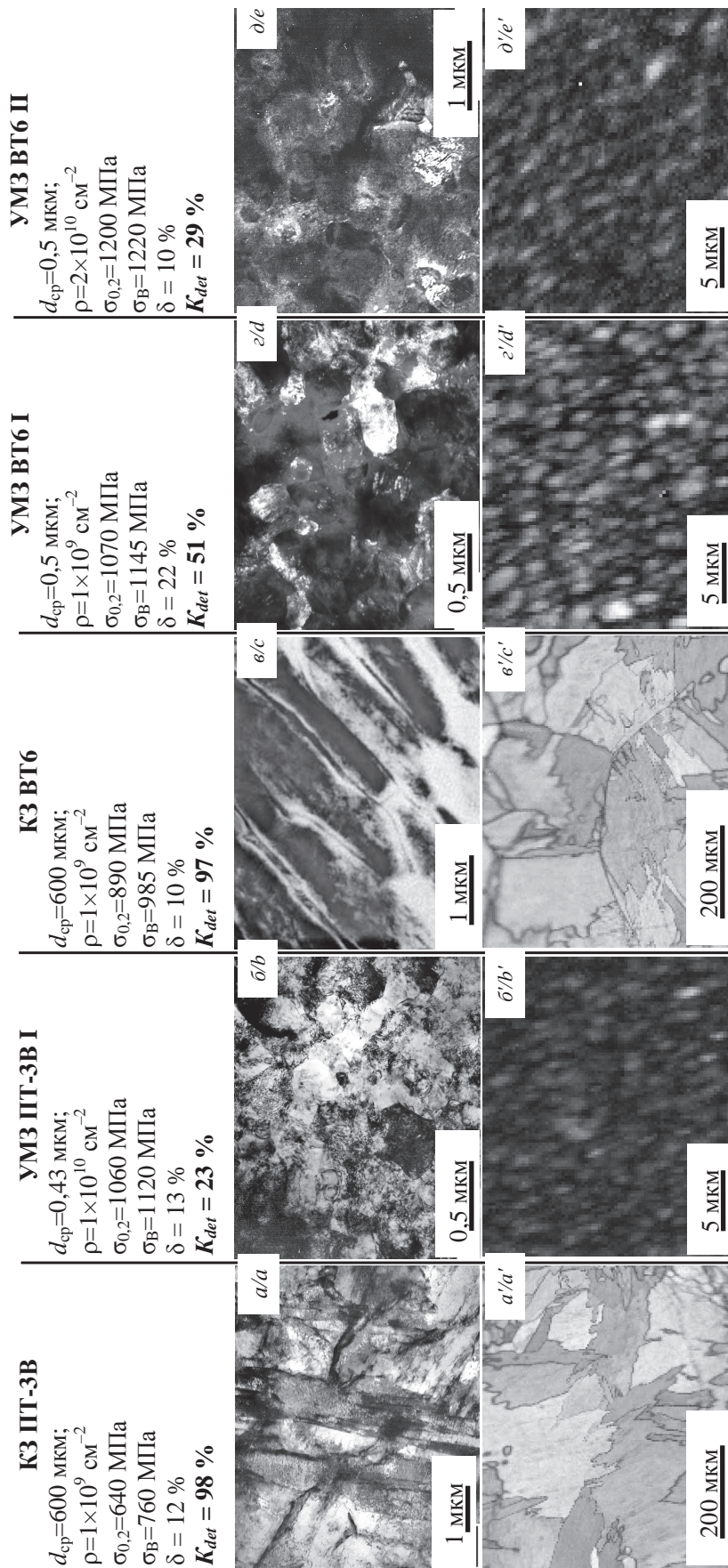
На рис. 1, г' представлена карта качества картин дифракции УМЗ ВТ6 I (*abc*-прессование с конечной температурой 873 К). Из рисунка видно, что практически во всём объеме зёрен наблюдается хорошее качество картин дифракции. Тёмный цвет, то есть низкое качество картин дифракции наблюдается только в областях границ зерен, но их ширина намного меньше размеров зёрен. Коэффициент детектирования  $K_{det}$  для данной карты сравнительно высок и составляет 51 % (рис. 1, г).

На рис. 1, д' представлена карта качества картин дифракции УМЗ ВТ6 II (*abc*-прессование с дополнительной прокаткой при 773 К). Из рисунка видно, что структура практически не изменилась по сравнению с УМЗ ВТ6 I. Так же как и для УМЗ ВТ6 I, относительно высокая яркость точек наблюдается только в центре зёрен, однако тёмные области границ зёрен шире. Коэффициент детектирования  $K_{det}$  для данной карты заметно ниже и составляет 29 % (рис. 1, д).

Таким образом, для сплавов ПТ-3В и ВТ6 с ультрамелкозернистой структурой, полученной по различным технологическим режимам, наблюдается следующая закономерность: чем ниже конечная температура обработки при получении ультрамелкозернистой структуры, тем хуже качество картин дифракции и ниже коэффициент детектирования  $K_{det}$ , то есть структура более неравновесная.

Зависимости потери массы образцов сплавов ПТ-3В КЗ и ВТ6 КЗ от времени испытания близки к линейным (рис. 2, а), что характерно для адгезионного механизма изнашивания. Видно, что с увеличением концентрации легирующих добавок в сплавах интенсивность изнашивания увеличивается (рис. 2, в). Это также отражается в морфологии поверхности трения контртела. При трении сплавов ПТ-3В КЗ и ВТ6 КЗ происходит перенос материала образцов на поверхность контртела, причём чем выше интенсивность изнашивания, тем визуально больше слой, образующийся из перенесённого материала (рис. 3, а, б).





**Рис. 1.** Средний размер зерен  $d_{cp}$ , скалярная плотность дислокаций  $\rho$ , предел прочности  $\sigma_B$ , условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , деформация при разрушении  $\delta$ , коэффициент детектирования  $K_{det}$  электронномикроскопические изображения микроstructures (а, б, в, г, д) и соответствующие карты качества картин дифракции обратнорассеянных электронов (а', б', в', г', д') для образцов КЗ ПТ-3В (первый столбец), УМЗ ПТ-3В I (второй столбец), УМЗ ПТ-3В II (третий столбец), КЗ ВТ6 (четвертый столбец), УМЗ ВТ6 I (пятый столбец), (обозначения образцов соответствуют приведенным в табл. 2)

**Fig. 1.** Average size of grains  $d_{cp}$ , scalar density of dislocations  $\rho$ , maximum strength  $\sigma_B$ , conventional yield strength  $\sigma_{0,2}$ , fracture strain  $\delta$ , detection coefficient  $K_{det}$ , electron-microscopic images of microstructure (a, b, c, d, e) and corresponding quality performance charts of diffraction patterns of back scattered electrons (a', b', c', d', e') for the samples of КЗ ПТ-3В (first column), УМЗ ПТ-3В I (second column), УМЗ ПТ-3В II (third column), КЗ ВТ6 (fourth column), УМЗ ВТ6 I (fifth column) (sample notations are the same as in Table 2)

Поверхность трения образцов сплавов ПТ-3В КЗ и ВТ6 КЗ имеет бороздчатую структуру, которая образуется в результате пропахивания поверхности трения твердыми частицами или неровностями контртела [13] (рис 3, а', б'). Также на поверхности трения образцов видны следы схватывания в виде областей материала, смещённых по направлению движения контртела. Микрорентгеноспектральный анализ поверхности трения образцов сплава КЗ ПТ-3В и КЗ ВТ6 обнаруживает углерод и железо в областях схватывания (рис. 3, табл. 3), то есть элементы материала контртела.

**Таблица 3.** Элементный состав на поверхности трения образцов сплавов ПТ-3В и ВТ6 в точках, отмеченных знаком «+» на рис. 3

**Table 3.** Ultimate composition on the surface of PT-3V and VT6 alloy samples in points marked by «+» in Fig. 3

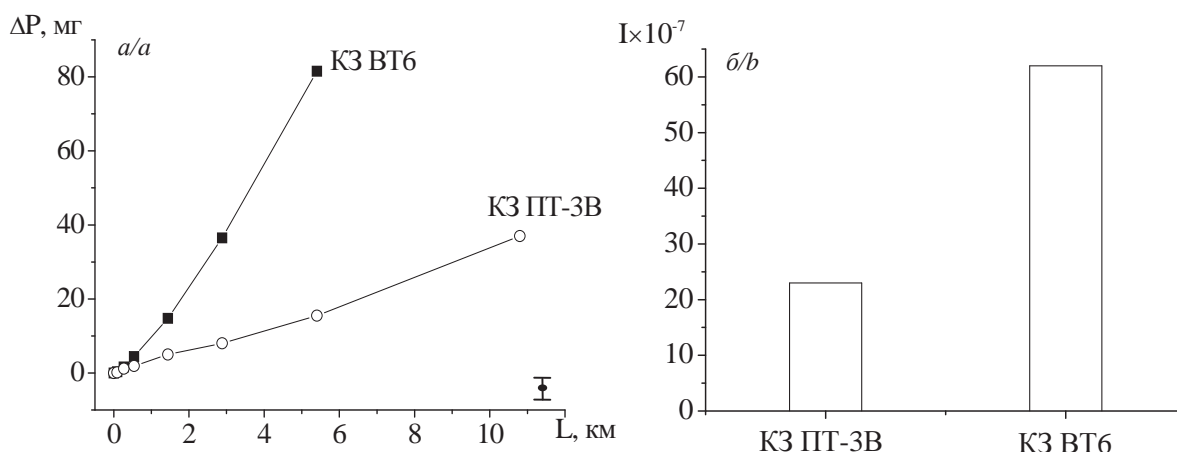
Элементы Elements	КЗ ПТ-3В			КЗ ВТ6		
	1	2	3	1	2	3
C	12,29	–	10,36	10,44	–	13,28
Al	4,31	6,8	4,19	8,25	7,96	7,28
Ti	78,9	91,13	83,37	76,87	86,49	74,65
V	1,27	2,07	1,76	4,11	5,55	4,43
Fe	3,23	–	0,32	0,32	–	0,35

При трении сплавов КЗ ПТ-3В и КЗ ВТ6 происходит не только перенос материала образцов на контртело, но и образование большого количества частиц изнашивания. Частицы изнашивания имеют слоистую структуру, плоскую, чешуйчатую форму, примерно одинаковую толщину (20 мкм) и острые края, характерные для хрупкого разрушения (рис. 4, а, б). Так как толщина частиц изнашивания превышает 0,2 мкм, электронно-микроскопические исследования проводились только на краях частиц и на областях вблизи трещин. Микроструктура данных областей представлена в ос-

новном бездислокационными зернами  $\alpha$ -Ti, размер которых варьируется от 10 до 200 нм (рис. 4, в). Иногда встречаются частицы износа, края которых содержат мелкодисперсную фазу. По результатам расшифровки картин микродифракции эта фаза может быть идентифицирована как оксиды или оксикарбиды титана (рис. 4, г). Микрорентгеноспектральный анализ показал также присутствие железа на некоторых частицах изнашивания.

Графики зависимостей потери веса образцов сплавов ПТ-3В и ВТ6 после формирования в них ультрамелкозернистой структуры от пути трения приведены на рис. 5, а, в. В зависимости от технологических параметров формирования ультрамелкозернистой структуры в сплавах ПТ-3В и ВТ6 по-разному изменилась интенсивность изнашивания (рис. 5, б, г) по сравнению с крупнозернистыми сплавами. Для сплавов УМЗ ПТ-3В I и УМЗ ВТ6 I интенсивность изнашивания возросла. Для УМЗ ВТ6 II, напротив, уменьшилась по сравнению с крупнозернистым материалом.

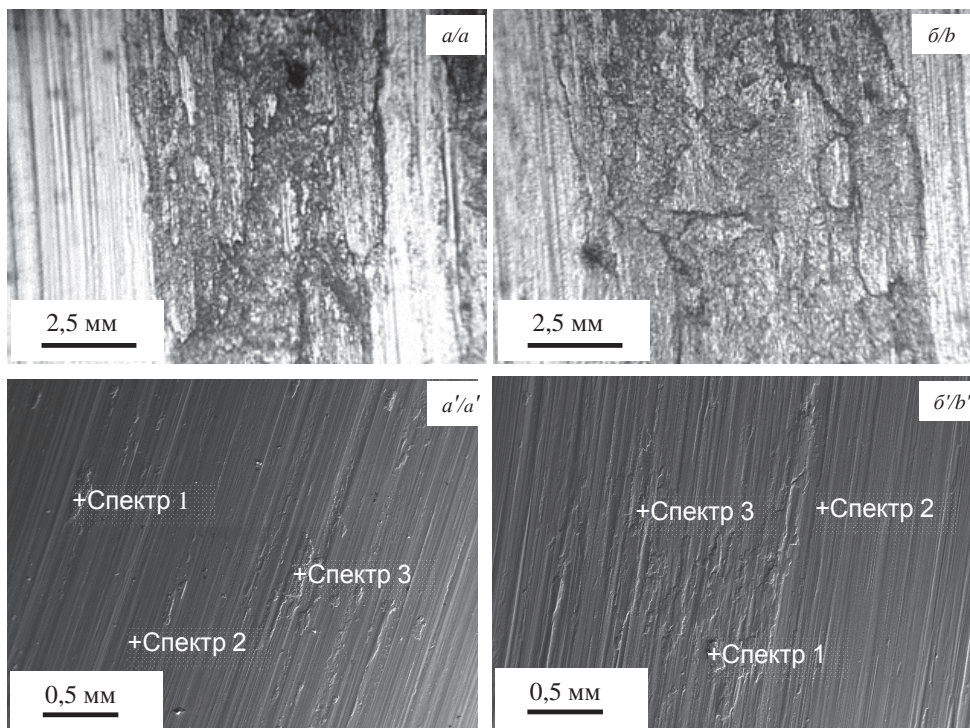
Исследования морфологии поверхностей трения образцов сплавов ПТ-3В и ВТ6 с ультрамелкозернистой структурой не выявили заметных различий по сравнению с морфологией поверхности трения образцов сплавов с крупнозернистой структурой. По-видимому, это обусловлено тем, что механизм изнашивания во всех случаях одинаков, адгезионный. Для материалов с ультрамелкозернистой структурой также наблюдается перенос материала с образцов на контртело с образованием на последнем слоя из перенесённого материала. В процессе трения образцов с ультрамелкозернистой структурой формируется значительное количество частиц изнашивания, по морфологии и элементному составу аналогичных частицам изнашивания, образующимся при трении образцов с крупнозернистой структурой.



**Рис. 2.** Зависимости потери веса образцов титановых сплавов с крупнозернистой структурой от пути трения (а) и соответствующие интенсивности изнашивания (б)

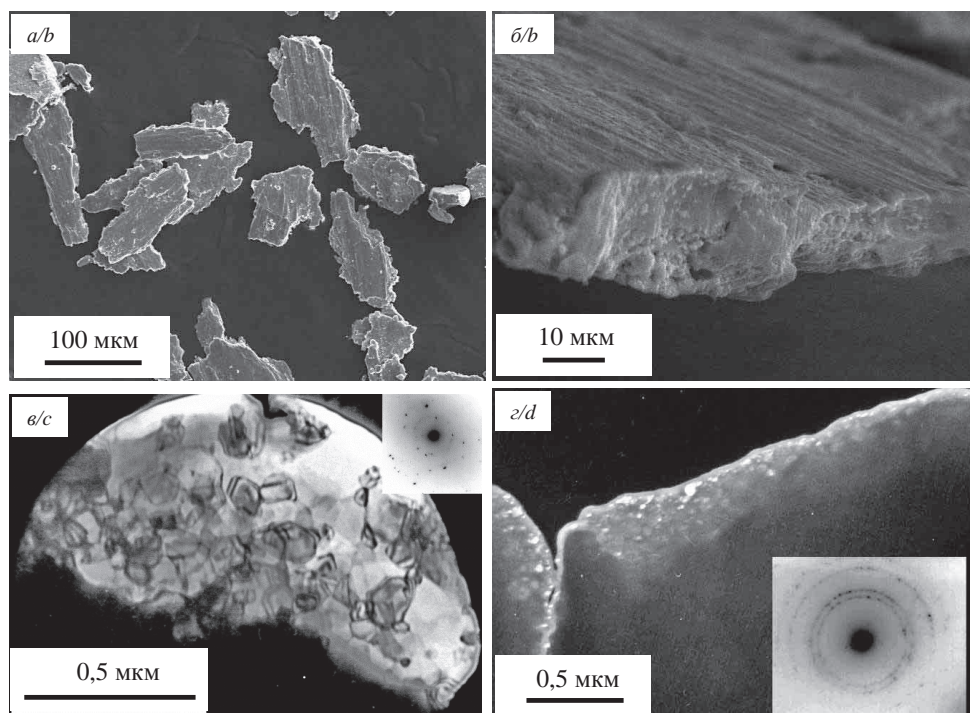
**Fig. 2.** Dependence of weight loss of titanium alloy samples with coarse structure on sliding distance (а) and proper wear intensities (б)





**Рис. 3.** Поверхности трения контртела (верхний ряд фотографий) и образцов сплавов КЗ ПТ-3В и КЗ ВТ6 (нижний ряд фотографий): а, а') ПТ-3В; б, б') ВТ6. Знаком «+» отмечены точки, в которых проводили микрорентгеноспектральный анализ

**Fig. 3.** Opposite body friction surface (upper row of photos) and samples of KZ PT-3V and KZ VT6 alloys (lower row of photos); а, а') PT-3V; б, б') VT6. Points, where the X-ray microanalysis has been carried out, are marked by «+»



**Рис. 4.** Частицы изнашивания титанового сплава КЗ ВТ6: а, б) изображения, полученные на растровом электронном микроскопе; в) светлопольные изображения микроструктуры частиц износа сплава КЗ ВТ6, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии; г) темнопольное изображение микроструктуры частицы износа сплава КЗ ВТ6 в рефлексе типа [111] (первое кольцо) и микродифракционная картина

**Fig. 4.** Wear fragments of titanium alloy KZ VT6: а, б) photos obtained on scanning electron microscope; в) bright-field images of KZ VT6 wear fragment microstructure obtained by transmission electron microscopy method; д) dark-field image of KZ VT6 wear fragment microstructure in overtone of the type [111] (first ring) and selected area diffraction pattern



**Обсуждение**

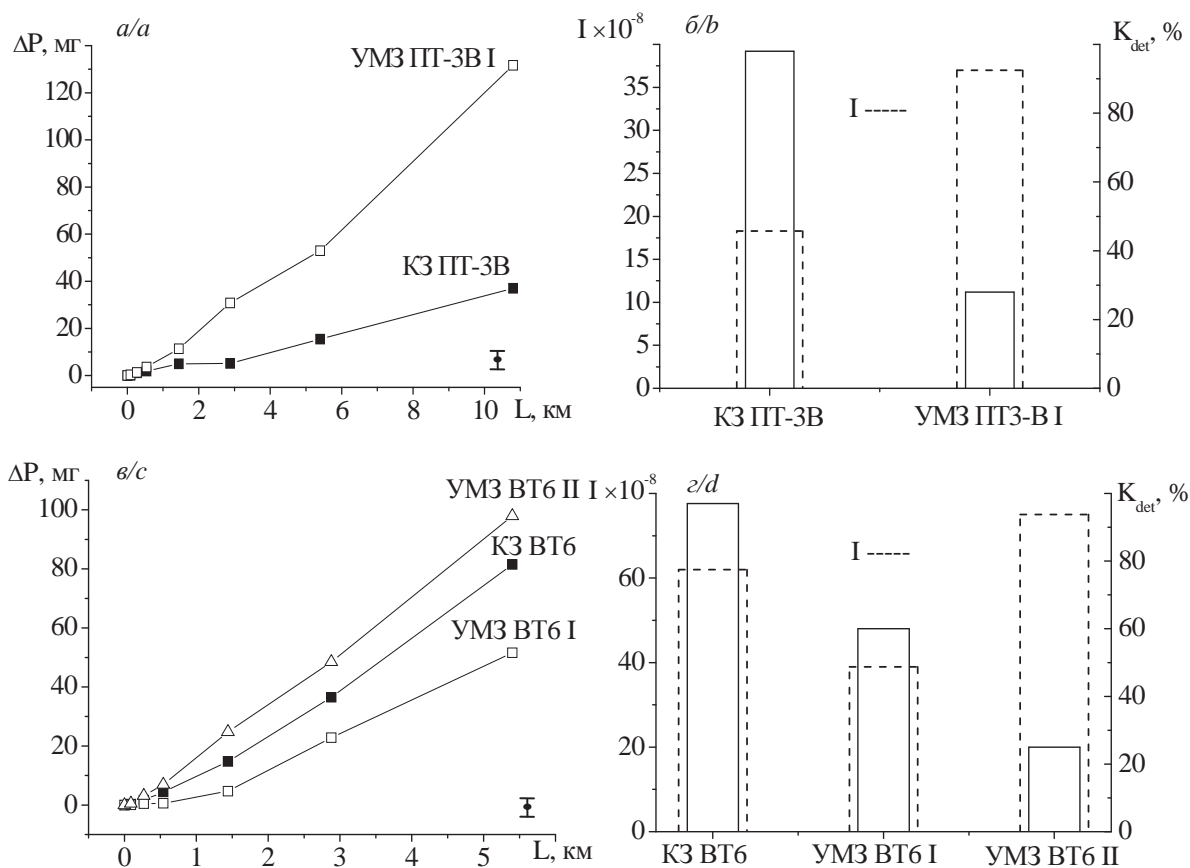
Одной из обнаруженных в настоящей работе особенностей изнашивания титановых сплавов ПТ-3В и ВТ6 является увеличение интенсивности изнашивания с увеличением содержания легирующих элементов (Al, V). По сравнению с интенсивностью изнашивания нелегированного титана ВТ1-0 при тех же условиях испытания [11] интенсивность изнашивания исследованных сплавов на порядок выше. Эта закономерность наблюдается как для крупнозернистых, так и для ультрамелкозернистых материалов. В литературе сведения о такой особенности отсутствуют. Таким образом, легирование титана алюминием и ванадием приводит к повышению интенсивности его адгезионного взаимодействия с контртелом. Механизм влияния легирования пока неясен, однако при практическом использовании титановых сплавов в узлах трения необходимо учитывать это влияние.

Результаты исследований морфологии слоя на контртеле, образующегося из перенесённого материала образцов, морфологии и структурно-фазового состояния частиц изнашивания позволяют сделать некоторые предположения о закономерностях формирования частиц изнашивания при тре-

нии сплавов ПТ-3В и ВТ6 в исследованных условиях. Прежде всего, еще раз подчеркнем, что формирование ультрамелкозернистой структуры не оказало влияния на форму и структуру частиц изнашивания. В слое на поверхности контртела иногда наблюдали участки с отслоившимся материалом, по форме и размерам соответствующие частицам изнашивания. То есть частицы образуются в результате разрушения слоя, образующегося на поверхности трения контртела.

Слоистая структура данного слоя образуется вследствие того, что в процессе трения в результате адгезионного взаимодействия происходит схватывание материала образцов с контртелом, и материал образцов, имеющий меньшую когезионную прочность, переходит на поверхность трения контртела и распространяется по ней в виде тонкого слоя толщиной около 1 мкм. При последующем контакте образца с данной областью контртела на этот слой опять переносится материал с образцов, формируя, таким образом, слоистую структуру.

В процессе переноса материал сильно деформируется, подвергается воздействию температуры и окружающей среды. Высокая степень деформации и большие температурные градиенты приводят к



**Рис. 5.** Зависимости потери веса образцов сплавов ПТ-3В и ВТ6 с крупнозернистой и ультрамелкозернистой структурой от пути трения (а, в); интенсивность изнашивания  $I$  (пунктирная линия) и величина коэффициента детектирования  $K_{det}$  (сплошная линия) (б, г)

**Fig. 5.** Dependence of weight loss of PT-3V and VT6 alloys samples with coarse and ultrafine-grained structure on sliding distance (a, c); wear intensity  $I$  (dotted line) and detecting coefficient  $K_{det}$  (solid line) (b, d)

сильному измельчению структуры и образованию мелкодисперсной оксидной либо оксикарибидной фазы. Это приводит к тому, что материал в слое становится хрупким и при определенной толщине за счет возникающих при деформации напряжений и под воздействием циклических нагрузок происходит разрушение слоя в виде частиц изнашивания.

Отметим, что на боковых шлифах крупнозернистых образцов, перпендикулярных поверхности трения, исходная форма зерен немного вытянута в слое глубиной около 30 мкм по направлению движения контртела, что свидетельствует о развитии заметной пластической деформации.

При анализе влияния на закономерности изнашивания параметров структуры и характеристик пластичности и прочности, прежде всего, можно отметить, что если в результате ИПД в исследованных сплавах формируется высоконеровесная УМЗ структура (что характеризуется низким значением коэффициента детектирования), то интенсивность изнашивания материалов с такой структурой возрастает по сравнению с крупнозернистым материалом. Действительно, для УМЗ ПТ-ЗВ I и УМЗ ВТ6 II, у которых коэффициенты детектирования составляют, соответственно, 23 и 29 %, наиболее высокие интенсивности изнашивания (рис. 5, б, г). В этих материалах наблюдается и высокая скалярная плотность дислокаций, что также может быть признаком неравновесности структуры.

При анализе нужно принимать во внимание, что коэффициент детектирования для УМЗ материалов будет всегда ниже, чем для крупнозернистого, из-за увеличения протяженности границ зерен. Поэтому корректно сравнивать коэффициенты детектирования только для материала, у которого после ТМО по различным режимам размер зерен отличается незначительно. Так, для УМЗ ВТ6 I и УМЗ ВТ6 II размер зерен одинаков, но коэффициенты детектирования и интенсивности изнашивания значительно различаются. При этом наблюдается четкая корреляция – чем меньше коэффициент детектирования (выше неравновесность), тем больше интенсивность изнашивания.

Если прогнозировать изменение интенсивности изнашивания при формировании УМЗ структуры только по коэффициенту детектирования, то всег-

да должно было бы быть увеличение интенсивности изнашивания. Однако для УМЗ ВТ6 I наблюдается обратная зависимость – его интенсивность изнашивания уменьшилась по сравнению с крупнозернистым материалом, несмотря на то, что коэффициент детектирования уменьшился до 51 %. По-видимому, при таком снижении коэффициента детектирования на изнашивание оказывает влияние не только степень неравновесности материала, но и другие факторы, например более высокая прочность.

Таким образом, если в результате ТМО в материале формируется высоконеровесная УМЗ структура, то именно неравновесность структуры оказывает определяющее влияние на его сопротивление изнашиванию. Если же технологический режим обеспечивает формирование более равновесной УМЗ структуры, то другие факторы, в частности изменение прочностных характеристик, начинают играть более существенную роль.

#### Выводы

1. Формирование в сплавах ПТ-ЗВ и ВТ6 ультрамелкозернистой структуры с использованием методов интенсивной пластической деформации не изменяет адгезионного механизма изнашивания этих сплавов при трении по контртелу в условиях граничной смазки.
2. Изнашивание сплавов ПТ-ЗВ и ВТ6 как с крупнозернистой, так и с ультрамелкозернистой структурой происходит в результате адгезионного переноса материала образцов на контртело с формированием на нем слоя и циклического разрушения этого слоя с образованием частиц изнашивания.
3. Интенсивность изнашивания исследованных сплавов при формировании в них ультрамелкозернистой структуры может как возрасти, так и уменьшиться. При формировании высоконеровесной структуры именно неравновесность структуры оказывает определяющее влияние на его сопротивление изнашиванию. Если же при формировании ультрамелкозернистой структуры успевают проходить релаксационные процессы, то ее неравновесность значительно меньше, и в этом случае на интенсивность изнашивания оказывает влияние изменение механических характеристик материала.
5. Валиев Р.З., Александров И.А. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
6. Новые материалы / под науч. ред. Ю.С. Карабасова. – М.: МИСИС, 2002. – 736 с.
7. Evolution of misorientation distribution during warm «abc» forging of commercial-purity titanium / S.Yu. Mironov, G.A. Salishchev, M.M. Myshlyaev, R. Pippan // Materials Science and Engineering: A-structural materials properties microstructure and processing. – 2006. – Т. 418. – № 1–2. – С. 257–267.
8. Эволюция структуры и механических свойств наноструктурного титана при термомеханических обработках / О.А. Кашин,

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. – М.: ВИАЛ – МАТИ, 2009. – 520 с.
2. Титановые сплавы в машиностроении / Б.Б. Чечулин, С.С. Ушков, И.Н. Разуваева, В.Н. Гольдфайн. – Л.: Машиностроение. ЛО, 1977. – 248 с.
3. Цвиккер У. Титан и его сплавы. – М.: Металлургия, 1979. – 512 с.
4. Вульф Б.К. Термическая обработка титановых сплавов. – М: Изд-во «Металлургия», 1969. – 376 с.

- Е.Ф. Дударев, Ю.Р. Колобов, Г.П. Грабовецкая, Г.П. Почивалова, Г.П. Бакач, Ю.П. Шаркеев, Е.В. Легостаева, Н.В. Гирсова, Р.З. Валиев // *Материаловедение*. – 2003. – № 8. – С. 25–30.
9. Столяров В.В., Шустер Л.Ш., Чертовских С.В. Трибологическое поведение ультрамелкозернистых титановых сплавов // *Трение и смазка в машинах и механизмах*. – 2006. – № 10. – С. 11–19.
10. Чертовских С.В., Шустер Л.Ш., Столяров В.В. Триботехнические свойства титана и его сплавов с ультрамелкозернистой структурой, полученной интенсивной пластической деформацией // *Авиационно-технологические системы: Межвуз. сб. науч. тр. Под общ. ред. М.А. Анферова*. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 2004. – С. 319–329.
11. Закономерности и механизмы изнашивания титана VT1–0 с крупнозернистой и ультрамелкозернистой структурами /
- О.А. Кашин, К.В. Круковский, Б.П. Гриценко, Н.В. Гирсова, А.И. Лотков // *Деформация и разрушение материалов*. – 2012. – № 1. – С. 25–32.
12. Круковский К.В., Кашин О.А., Лотков А.И. Использование метода дифракции обратнорассеянных электронов для количественной оценки неравновесности микроструктуры ультрамелкозернистых металлов и сплавов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2012. – Т. 78. – № 8. – С. 27–33.
13. Гаркунов Д.Н. *Триботехника*. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.

Поступила 08.02.2014 г.

UDC 539.621

## THE REGULARITIES OF WEAR OF TITANIUM ALLOYS PT-3V AND VT6 WITH COARSE-GRAINED AND ULTRAFINE-GRAINED STRUCTURE

**Konstantin V. Krukovskiy,**

Cand. Sc., Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 2/4, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: kvk@ispms.tsc.ru

**Oleg A. Kashin,**

Dr. Sc., Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 2/4, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: okashin@ispms.tsc.ru

**Natalya V. Girsova,**

Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 2/4, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: girsova@ispms.tsc.ru

*Relevance of the work is caused by the need to improve the tribological characteristics of titanium alloys in order to expand their application.*

**The main aim of the research** is to study the regularities of wear of titanium alloys PT-3V and VT6 with coarse and ultrafine grained structure in friction with boundary lubrication; to identify the most significant parameters of ultrafine grained structure that influence wear resistance of alloys PT-3V and VT6; to determine the most optimal regimes of abc-pressing, ensuring the formation of ultrafine-grained structure with parameters increasing the wear resistance of alloys PT-3V and VT6.

**The methods used in the study:** X-ray structural and phase analysis with radiation  $CoK_{\alpha}$ , optical metallography, methods of scanning and electron microscopy, electron microprobe analysis method, electron backscatter diffraction method (EBSD) using software CHAN-NEL 5.

**The results:** the formation in alloys PT-3V and VT6 with ultrafine-grained structure by the methods of severe plastic deformation does not alter the adhesive wear mechanism of these alloys. The wear of alloys PT-3V and VT6 with coarse-grained and ultrafine-grained structure is the result of an adhesive transfer of samples material to a counterbody and formation of a large number of wear particles. When forming a highly nonequilibrium structure it is the nonequilibrium of the structure which has a decisive influence on its wear resistance.

### **Key words:**

*Titanium alloys, wear regularities, ultrafine-grained structure, nonequilibrium of structure, backscatter electron diffraction.*

## REFERENCES

1. Ilin A.A., Kolachov B.A., Polkin I.S. *Titanovye splavy. Sostav, struktura, svoystva. Spravochnik* [Titanium alloys. The composition, structure and properties. Handbook]. Moscow, VILS-MATI Publ., 2009. 520 p.
2. Chechulin B.B., Ushkov S.S., Razueva I.N., Goldfayn V.N. *Titanovye splavy v mashinostroenii* [Titanium alloys in mechanical engineering]. Leningrad, Mashinostroenie publ., 1977. 248 p.
3. Tsviker U. *Titan i ego splavy* [Titanium and its alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 512 p.
4. Vulf B.K. *Termicheskaya obrabotka titanovykh splavov* [Heat treatment of titanium alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1969. 376 p.
5. Valiev R.Z., Aleksandrov I.A. *Obemnye nanostrukturnye metallicheskie materialy: poluchenie, struktura i svoystva* [Bulk nanostructured metallic materials: preparation, structure and properties]. Moscow, Akademkniga Publ., 2007. 398 p.
6. Karabasov Yu.S. *Novye materialy* [New materials]. Moscow, MIS Publ., 2002. 736 p.
7. Mironov S.Yu., Salishchev G.A., Myshlyaev M.M., Pippan R. Evolution of misorientation distribution during warm 'abc' forging of commercial-purity titanium. *Materials Science and Engineering: A-structural materials properties microstructure and processing*, 2006, vol. 418, no. 1–2, pp. 257–267.
8. Kashin O.A., Dudarev E.F., Kolobov Yu.R., Grabovetskaya G.P., Pochivalova G.P., Bakach G.P., Sharkeev Yu.P., Legostayeva E.V., Girsova N.V., Valiev R.Z. Evolutsiya struktury i mekhanicheskikh svoystv nanostrukturnogo titana pri termomekhanicheskikh obrabotkakh [Evolution of structure and mechanical properties of nanostructured titanium at thermomechanical treatments]. *Materialovedenie*, 2003, no. 8, pp. 25–30.
9. Stolyarov V.V., Shuster L.Sh., Chertovskikh S.V. Tribotekhnicheskoe povedenie ultramelkozernistykh titanovykh splavov [Tribological behavior of ultrafine titanium alloys]. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizмах*, 2006, no. 10, pp. 11–19.
10. Chertovskikh S.V., Shuster L.Sh., Stolyarov V.V. tribotekhnicheskie svoystva titana I ego splavov s ultramelkozernistoy strukturoy, poluchennoy intensivnoy plasticheskoy deformatsiyey. [Tribological properties of titanium and its alloys with ultrafine structure obtained by severe plastic deformation]. «Aviatsionno-tehnicheskie sistemy» Meghvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov pod. red. Anferova M.A. Ufa, UGATU, 2004, pp. 319–329.
11. Krukovskiy K.V., Kashin O.A., Lotkov A.I. Ispolzovanie metoda difraktsii obratnorasseyannykh elektronov dlya kolichestvennoy otsenki neravnovesnosti ultramelkozernistykh metallov i splavov [Application of a method of backscattered electron diffraction to quantify non-equilibrium microstructure of ultrafine-grained metals and alloys]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2012, vol. 78, no. 8, pp. 27–33.
12. Kashin O.A., Krukovskiy K.V., Gritsenko B.P., Girsova N.V., Lotkov A.I. Zakonomernosti i mekhanizmy iznashivaniya titana VT1–0 s krupnozernistoy i ultramelkozernistoy strukturami [Regularities and mechanisms of wear titanium VT1–0 with coarse and ultrafine structures]. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2012, no. 1, pp. 25–32.
13. Garkunov D.N. *Tribotekhnika* [Tribotechnics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 424 p.

Received: 08 February 2014.



УДК 535:628.373.8, 535:548.0; 539.293; 621.382; 535.015

## МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ ДИОДНЫХ ЛАЗЕРОВ

**Парашук Валентин Владимирович,**

канд. физ.-мат. наук, доцент, ведущ. науч. сотр. Института физики  
им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, 220072, Минск, пр. Независимости, 68.  
E-mail: v.parashchuk@ifanbel.bas-net.by, v\_shchuka@rambler.ru

**Гуделев Валерий Георгиевич,**

канд. физ.-мат. наук, ведущ. науч. сотр. Института физики  
им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, 220072 Минск, пр. Независимости, 68.  
E-mail: v.gudelev@dragon.bas-net.by

**Актуальность** работы обусловлена необходимостью конструирования новых перспективных оптических приборов, в частности диодных лазеров с заданным пространственным распределением диаграммы направленности излучения, предназначенных для использования в акустооптике, системах оптической связи, обработки и хранения информации и т. д.

**Цель исследования:** разработка нового эффективного метода формирования однородного или заданного пространственного распределения диаграммы направленности излучения диодных лазеров, основанного на использовании явления множественного лучеотражения (лучерасщепления) в анизотропных средах.

**Методы исследования:** экспериментальное исследование распределения интенсивности для лучей, выходящих из одиночной четырехлучеотражающей призмы и системы таких призм; изучение особенностей эффекта множественного лучеотражения в зависимости от геометрии и условий опыта на примере кристаллов кальцита, характеризующегося средней величиной двулучепреломления (с достаточным угловым разрешением) и сравнение результатов с литературными данными; выяснение возможности использования данного явления для повышения эффективности формирования пространственно-однородного лазерного излучения, существенного упрощения и расширения функциональных возможностей преобразования (коррекции) поперечного распределения интенсивности излучения и совершенствования на этой основе выходных характеристик диодных лазеров; анализ поляризационно-амплитудных характеристик эффекта, однородности или требуемой конфигурации диаграммы направленности излучения диодного лазера в зависимости от параметров исходного пучка и геометрии опыта, установление оптимальных условий повышения эффективности разрабатываемого метода.

**Результаты.** Установлено, что степень однородности формируемого светового профиля пропорциональна количеству генерируемых системой пучков – в случае 16-и лучевой геометрии достигнута наибольшая степень однородности пространственного распределения и максимальная интенсивность выходного излучения. Геометрия двухмерной световой матрицы, образуемой при использовании многолучевого отражения, зависит как от взаимной ориентации призм, так и от направления лучей. Предложен вариант системы призм, обеспечивающий формирование матричных световых полей различной конфигурации, которыми можно эффективно управлять посредством изменения поляризационных и других характеристик исходного пучка. Предложенный способ по сравнению с аналогами характеризуется простотой использования и экономичностью, не требует применения сложных внутрирезонаторных схем и связанных с ними юстировочных процессов, позволяет осуществлять эффективную коррекцию различных нерегулярностей волновой поверхности, в том числе обусловленных многомодовостью излучения и трудноустраняемых иными способами. В исследуемых кристаллах обнаружено дополнительное (поперечное) смещение отраженных лучей, аналогичное наблюдавшемуся в других соединениях и обуславливающее повышение эффективности преобразования светового пучка. Показано, что в условиях данного метода возможно как ослабление, так и усиление световых пучков, имеющие практическое значение.

### **Ключевые слова:**

Диодный лазер, диаграмма направленности излучения, множественное лучеотражение (лучерасщепление), эффективность.

### **Введение**

В последнее время диодные лазеры получили широкое применение в различных областях науки и техники – медицине, акустооптике, информатике (вычислительной технике), в военных целях, космических исследованиях и т. д. – благодаря известным преимуществам: компактности, высокой эффективности и простоте управления и использования. Однако имеются и недостатки, в ряде случаев серьезно затрудняющие их применение, в частности наличие относительно широкой и несимметричной диаграммы направленности излучения, характеризующейся мелкой структурой дальнего поля даже в случае одномодового режима. Предыдущие исследования авторов были направлены на улучшение ряда базовых характеристик мощных

диодных лазеров – повышение их эффективности, выходной мощности, оптимизацию тепловых режимов с использованием современных теплопередающих материалов, в том числе алмазов [1–3]. В настоящей работе показано, что применение так называемого явления множественного лучеотражения в анизотропных средах позволяет существенно улучшить пространственные характеристики (однородность картины дальнего поля излучения) диодных лазеров и расширить их функциональные возможности. Основное внимание в работе авторы уделяют практическому применению указанного явления (по которому в литературе имеется мало сведений), не претендуя на выяснение его механизма. О предварительных результатах авторов по данному вопросу ранее сообщалось в [4].

Известно явление двойного лучеотражения – разновидности двойного лучепреломления, заключающееся в разделении луча на два – обыкновенный и необыкновенный – при полном внутреннем отражении в кристалле [5, 6]. В работе [7] впервые сообщалось, что кристалл (оптическую призму) можно вырезать особым способом, при котором один падающий луч при отражении от наклонной грани внутри кристалла возбуждает 4 луча – 2 обыкновенных и 2 необыкновенных, идущих в разных направлениях, – явление четырехлучеотражения (четверного лучеотражения). В ряде последующих работ обоснован механизм эффекта [8–17]. Считается, что это происходит вследствие несовпадения плоскостей главного сечения для падающего и отраженного лучей и эффекта сноса необыкновенных лучей за счет двулучепреломления. Однако до сих пор не выявлены все особенности и закономерности четырехлучеотражения во многих кристаллах и окончательно не ясен механизм указанного явления [18, 19], в связи с чем соответствующие исследования актуальны. Модификация данного метода с использованием нескольких призм позволяет сформировать многолучевое отражение и довести количество выходных пучков до 16-и и более [18–22]. Примечательно, что в рассматриваемой системе возможен и обратный процесс – суммирование (совмещение) нескольких лучей в один пучок [18, 19, 23]. Представляют интерес также свойства систем призм из различных материалов – положительных и отрицательных в отношении смещения лучей [18–23].

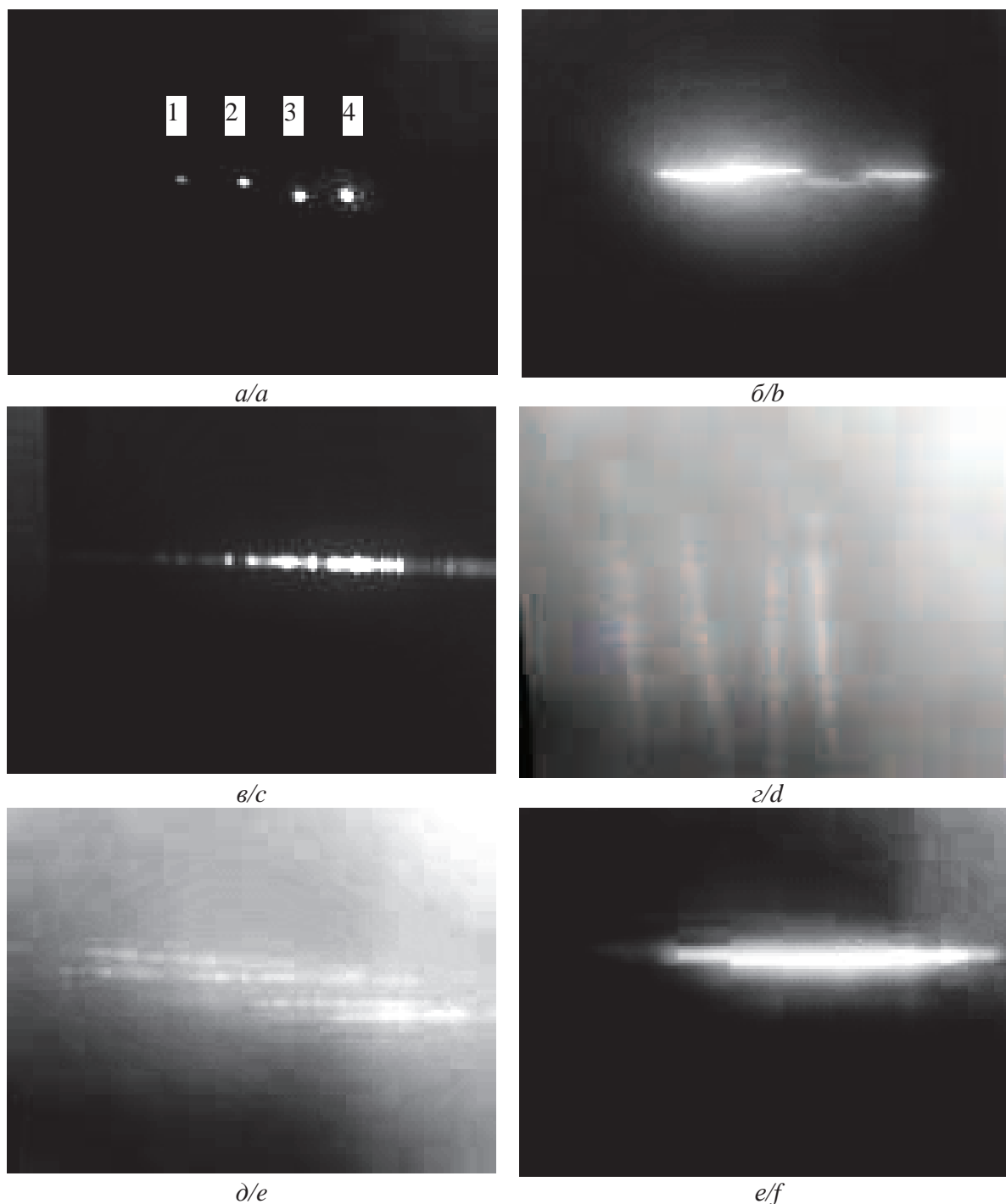
#### Свойства четырехлучеотражения в кристаллах $\text{CaCO}_3$ и его применение

Эффект четверного лучеотражения наблюдался в одно- и двухосных кристаллах, таких как иодат лития  $\text{LiIO}_3$ , парателлурилит  $\text{TeO}_2$ , ниобат лития  $\text{LiNbO}_3$  и др., в том числе исследуемых нами кристаллах кальцита  $\text{CaCO}_3$  (исландский шпат). Однако в литературе имеются неполные сведения о свойствах множественного лучеотражения в указанном соединении. В настоящей работе использовались призмы, изготовленные по аналогии с данными для кристаллов иодата лития, в которых этот эффект изучен в достаточной степени ([7–10] и др.). Основные параметры призмы: входная и выходная (рабочие) грани нормальны друг к другу, наклонная грань относительно них составляет угол  $\sim 45^\circ$ , величина двулучепреломления равна  $\Delta n = n_e - n_o \approx -0,17$ . Рассмотрены два случая ориентации оптической оси кристалла – с расположением ее в плоскости входной (выходной) грани под углом  $\alpha \approx 45^\circ$  или  $135^\circ$  к боковой поверхности призмы. Источником излучения служил диодный лазер (модуль) типа МЛМ ЛЕМТ с длиной световой волны  $\lambda = 630\text{--}675$  нм и выходной мощностью  $P_{\text{вых}} \leq 5$  мВт, работающий в непрерывном режиме. Выходное излучение было поляризовано и сфокусировано в виде полоски  $\sim 1 \times 5$  мм с расходимостью  $\sim 0,5$  мрад (квазипараллельный пучок).

На рис. 1, а представлена картина распределения интенсивности четырех лучей на экране, расположенном за призмой в нашем случае, в случае исходного (не расфокусированного) пучка света. Для разрешения и наблюдения поперечной структуры пучка использовалась его расфокусировка цилиндрическими линзами с  $F \sim 50$  мм (рис. 1, б) и  $F \sim 1$  мм (стеклянный стержень  $d = 3$  мм) (рис. 1, в–е) в двух случаях: в меридиональной (перпендикулярно активному слою лазера) (рис. 1, б, в, д, е) и азимутальной плоскостях. При этом стеклянный стержень располагался соответственно параллельно световому полюсу, или ортогонально ему. В первом случае, представляющем наибольший интерес (основные закономерности эффекта изучены на примере данной геометрии опыта), поперечная структура пучка достаточно сложна и носит преимущественно линейчатый характер. Структура излучения в другой геометрии (в плоскости активного слоя) аналогична вышеописанной. Данная неоднородность коррелирует с наибольшей расходимостью несфокусированного пучка диодного лазера  $\sim 30\text{--}40^\circ$  (перпендикулярно активному слою) и трудно поддается устранению или уменьшению обычными (оптическими) способами.

Для этой цели требуется применение, в частности, специальных оптических преобразователей-транспарантов, киноформных элементов, сложных голографических или аподизационных внутрирезонаторных методов (например, [24, 25]). Среди внутрирезонаторных способов коррекции волновых фронтов следует отметить метод получения негауссовых световых пучков с равномерным пространственным распределением интенсивности, основанный на выполнении одного из отражателей обобщенного конфокального резонатора в виде маски с дискретно расположенными фазосдвигающими неоднородностями [25]. Данный метод требует создания сложной маски-отражателя и использования специфической геометрии резонатора. В более сложном внутрирезонаторном методе аподизации излучения полупроводникового лазера использован преобразователь на основе двухосного кристалла КТР, ориентированного вдоль бинормали [25].

Условно наиболее «близким» к заявляемому по технической сущности является способ генерации профилированных лазерных пучков с использованием «мягкой» аподизирующей диафрагмы на основе комбинации двулучепреломляющий элемент – оптическое стекло – поляризатор [26]. В этом способе оптическая ось нелинейно-оптического элемента, выполненного в виде кварцевой линзы, нормальна к направлению распространения излучения и ориентирована под углом  $\alpha = 0\text{--}45^\circ$  относительно направления поляризации падающего луча. В процессе аподизации, т. е. перекрытия диафрагмой части дифракционного изображения, осуществляется коррекция волнового фронта, позволяющая создавать безаберрационные пучки с однородным по сечению распределе-



**Рис. 1.** Четверное лучеотражение в кристаллах кальцита и формирование однородной картины дальнего поля излучения диодного лазера. Лучи (взаимодействия): 1 – ое, 2 – оо, 3 – ее, 4 – ео; 1 и 3 – необыкновенные, 2 и 4 – обыкновенные лучи

**Fig. 1.** Fourfold beam-reflection in calcite crystals and formation of uniform pattern of the far field of diode laser radiation

нием интенсивности излучения. Однако при этом также значительно уменьшается диаметр пучка, что приводит к существенному падению энергии генерации и необходимости оптимизации параметров аподизирующей диафрагмы.

Следует отметить, что в действительности близких к разрабатываемому способам не существует и

приводимое выше сравнение носит условный характер. При этом простота и экономичность изложенного ниже метода очевидны, так как номинально в нем требуется применение всего одной призмы без сложных юстировок.

Сущность предлагаемого метода поясняется рис. 1–5. При повороте плоскости поляризации ла-

зерного пучка относительно входной грани призмы (путем поворота излучателя вместе с линзой) происходит соответствующее вращение и сближение по вертикали четырех расфокусированных треков лучей (рис. 1, *з, д*) и их наложение (совмещение), чем достигается заметное выравнивание распределения интенсивности суммарного трека (рис. 1, *е*).

Обнаруженный эффект выравнивания поперечного распределения интенсивности лазерного пучка становится возможным также вследствие того обстоятельства, что составляющие треки последовательно смещены по горизонтали друг относительно друга (рис. 1, *д*) и при их совмещении происходит эффективное заполнение несветящихся областей светящимися одновременно от нескольких треков.

Обращает внимание наличие в кристаллах  $\text{CaCO}_3$  дополнительного (поперечного) смещения отраженных лучей (рис. 1, *а, б, д*), т. е. имеет место смещение первого и второго типов, аналогичное наблюдавшемуся в других соединениях. При этом отраженные лучи смещаются в двух взаимно перпендикулярных плоскостях и каждое из них вносит свой вклад в повышение эффективности преобразования луча: как отмечалось выше, поперечная структура лазерного пучка носит преимущественно линейчатый характер вдоль расфокусированного полоска (одной из координат), однако в целом она двумерна.

Анализ поляризационных характеристик (рис. 2) показывает, что распределение интенсивности лучей в рассматриваемой системе зависит от ориентации оптической оси © призмы и геометрии опыта. Так, в случае, когда оптическая ось находится в плоскости входной грани призмы под углом  $\alpha=135^\circ$  к плоскости боковой грани, зависимость интенсивности лучей 1, 2 от угла поворота плоскости поляризации ( $\alpha_1$ ) соответствует кривой 1, а интенсивности лучей 3, 4 – кривой 2 (рис. 2, *а*). Когда ось С находится при прежних условиях в плоскости выходной грани, поведение лучей аналогично для групп лучей 1, 3 и 2, 4.

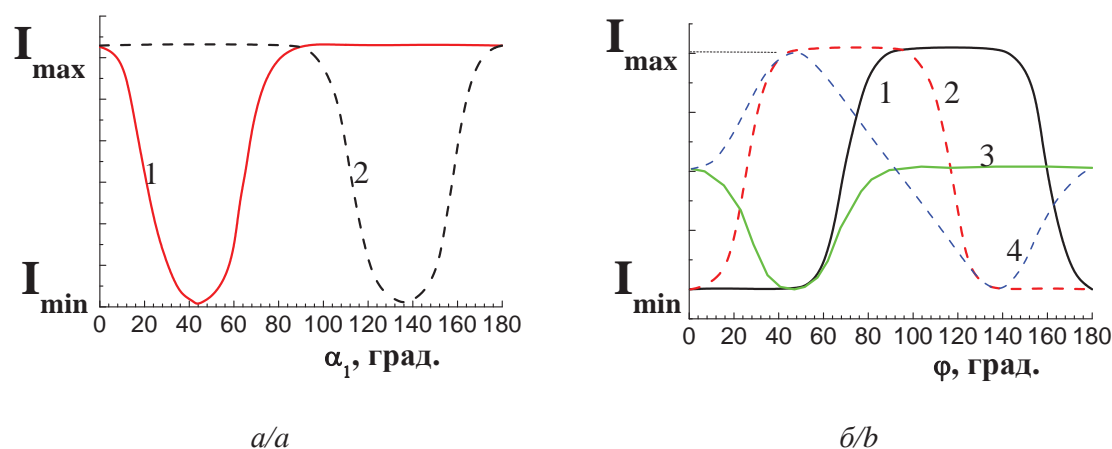


Рис. 2. Зависимость интенсивности системы отраженных лучей при четырехлучеотражении в кристаллах  $\text{CaCO}_3$  от ориентации вектора  $\mathbf{E}$  (а) и степени поляризации излучения (б)

Fig. 2. Dependence of intensity of reflected beam system at four-beam-reflecting in  $\text{CaCO}_3$  crystals on  $\mathbf{E}$  vector orientation (a) and on radiation polarization level (b)

Изучена зависимость интенсивности отраженных лучей от степени поляризации падающего лазерного излучения (угла вращения поляризатора  $\varphi$ ) (рис. 2, *б*). В случае, когда все четыре отраженных от наклонной грани призмы луча характеризуются примерно равной интенсивностью, поведение лучей 1, 2 описывается кривой 1, а поведение лучей 3, 4 – кривой 2 на рис. 2, *б*. Если одна из указанных пар лучей погашена частично или полностью вследствие вращения плоскости поляризации (изменения угла  $\alpha_1$ ) излучения лазера, то соответствующие зависимости представлены кривыми 3 и 4. В последнем случае наблюдается как ослабление, так и усиление исходных пучков (кривая 4) в области углов  $\varphi \sim 45^\circ$ , что может быть использовано на практике.

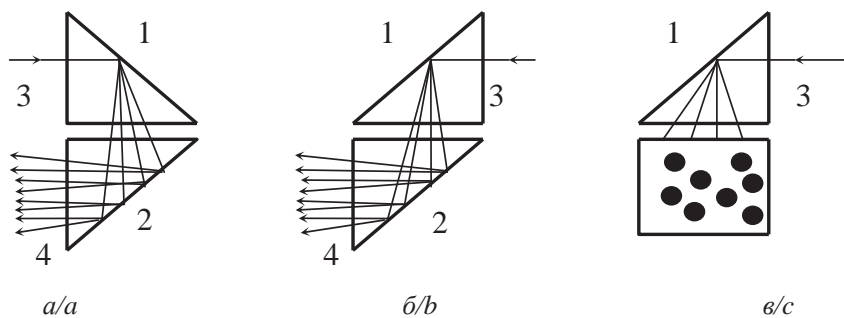
Следует отметить, что описанное здесь поведение поляризационных характеристик (рис. 2) отличается от случая кристаллов  $\text{LiIO}_3$  [10], что может быть обусловлено различием кристаллографической симметрии сравниваемых соединений: кристаллы иодата лития характеризуются гексагональной сингонией точечной симметрии, а кристаллы кальцита – тригональной. Кроме того, эффект чувствителен к параметрам используемых источников.

#### Особенности формирования многолучевого отражения

Исследовалась система двух призм, изготовленных из кристаллов кальцита, для трех вариантов их расположения. В одном варианте из системы выходит 8 лучей, в другом – 16, в третьем (промежуточном) формируется двухмерная матрица (рис. 3). Использовалась система, составленная из одинаковых кристаллов. Оптическая ось кристаллов расположена в плоскостях граней 3 и 4 под углом  $45^\circ$  к плоскости рисунка, при этом указанные грани могут быть взаимно параллельны или перпендикулярны.

В случае когда оптические оси призм параллельны, четыре луча, выходящие из первой призмы, вхо-





**Рис. 3.** Основные варианты расположения системы призм полного внутреннего отражения и ход лучей в призмах при множественном лучеотражении: а) обратный ход; б) прямой ход

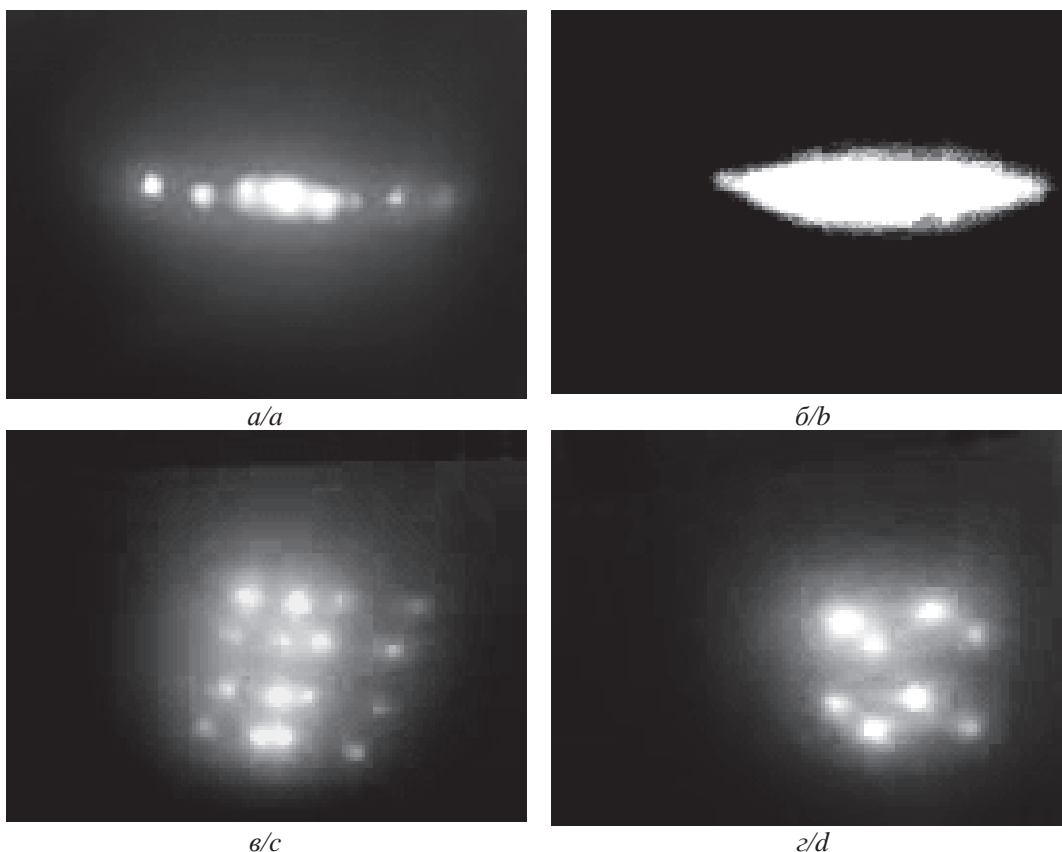
**Fig. 3.** Basic variants of position of complete inner reflection prism system and beam direction in prisms at multiple beam reflection: a) back stroke; b) forward stroke

дят во вторую без удвоения и удваиваются только при отражении от наклонной грани второй призмы. В таком случае из системы выходит 8 лучей (рис. 3, б). Если оптические оси призм, составляющих систему, перпендикулярны, то лучи удваиваются при входе во вторую призму и при отражении от ее наклонной грани [18–22]. В результате этого из второй призмы выходит 16 лучей (рис. 3, а), которые разбиваются на семь групп (рис. 5, а) в соответствии с известными литературными данными (рис. 4).



**Рис. 4.** Схема пространственного распределения 16 лучей на экране, расположенном за системой призм, в случае обратного хода лучей [21, 22] 1 и 2 – типы лучей с ортогональными поляризациями

**Fig. 4.** Diagram of spatial distribution of 16 beams on the screen behind the prism system. In the case of back stroke of 1, 2 beams (kinds of beams with cross polarization)



**Рис. 5.** Эффект множественного лучеотражения в кристаллах  $\text{CaCO}_3$  (а) и его использование для эффективной коррекции (увеличения однородности) поперечного распределения интенсивности лазерного пучка (б) и для создания матричного светового поля различной конфигурации (в, г)

**Fig. 5.** Effect of multiple beam reflection in  $\text{CaCO}_3$  crystals (a) and its application for effective correction (homogeneity increase) of lateral distribution of laser beam intensity (b) and for development of light field with different configuration (c, d)

В каждой группе имеются лучи двух типов с взаимно перпендикулярными поляризациями. Распределение интенсивностей указанных групп лучей зависит от направления поляризации падающего излучения относительно направления оптической оси первой призмы.

В случае множественного лучеотражения (рис. 5, б), как и ожидалось, достигнута большая эффективность выравнивания светового поля по сечению системы пучков, чем при 4-х лучеотражении (рис. 1, е). Кроме того, оказалось, что при пропускании световых пучков последовательно через систему двух призм, повернутых основаниями на  $90^\circ$  (промежуточный вариант), возможно формирование матричных световых полей различной конфигурации (рис. 5, в, г), которыми можно эффективно управлять посредством изменения поляризационных и других характеристик исходного пучка. В данном случае грани призм, в которых находятся оптические оси, располагались параллельно (рис. 5, в) либо перпендикулярно друг другу (рис. 5, г).

#### Заключение

Таким образом, в случае многолучевого отражения в анизотропном кристалле можно реализовать не только режим своеобразного переключения, т. е. управления интенсивностью и взаимным расположением отраженных лучей, но также осуществлять эффективную коррекцию пространственного распределения световых полей и синтезировать их заданную конфигурацию. В результате варьирования условий падения излучения на кристалл происходит изменение углов отражения лучей, обусловленных различными типами взаимодействий. В системе, состоящей из двух и более призм, можно менять число лучей и их интенсивность за счет взаимного расположения призм и изменения поляризации входного излучения. Величину углов выходящих из призмы расщепленных

лучей можно плавно варьировать и тем самым эффективно регулировать степень заполнения (однородности) картины дальнего поля излучения диодного лазера, а также локально управлять состоянием поляризации его излучения. Кроме того, степень однородности формируемого светового профиля пропорциональна количеству генерируемых системой пучков: в частном случае 16-лучевой геометрии достигнута наибольшая степень однородности пространственного распределения и максимальная интенсивность выходного излучения. Геометрия образуемой при использовании многолучевого отражения двухмерной матрицы зависит как от взаимной ориентации призм, так и от направления лучей. Предлагаемый способ по сравнению с аналогами характеризуется простотой использования и экономичностью, не требует применения сложных внутрирезонаторных схем и связанных с ними юстировочных процессов, позволяет осуществлять эффективную коррекцию различных нерегулярностей волновой поверхности, в том числе обусловленных многомодовостью излучения и трудноустраняемых иными способами.

Рассмотренный эффект можно использовать в квантовой электронике, при конструировании новых оптических приборов, в частности, в системах оптической связи для разделения одного оптического канала на несколько, в системах обработки и хранения оптической информации (дефлекторы, сплиттерные модули и регистры) и для других аналогичных целей. Использование данного явления позволяет также эффективно формировать из точечного источника (случай одиночного лазерного диода) протяженного квазилинейного излучателя, что важно, например, для целей акустооптики, а в случае лазерной диодной линейки – существенно улучшить однородность картины дальнего поля и расширить функциональные возможности управления характеристиками лазеров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оптимизация тепловых режимов диодных лазеров / В.В. Паращук, А.К. Беляева, В.В. Баранов, Е.В. Телеш, Vu Doan Mien, Vu Van Luc, Pham Van Truong // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 4. – С. 137–141.
2. Parashchuk V.V., Ryabtsev G.I., Belyaeva A.K., Bezyazychnaya T.V., Baranov V.V., Telesh E.V., Vu Doan Mien, Vu Van Luc, Pham Van Truong. Improving the efficiency of high-power diode lasers using diamond heat sinks // Quantum Electronics. – 2010. – V. 40. – № 4. – P. 301–304.
3. Parashchuk V.V., Vu Doan Mien. Effect of thermal processes on critical operation conditions of high-power laser diodes // Quantum Electronics. – 2013. – V. 43. – № 10. – P. 907–913.
4. Паращук В.В., Гуделев В.Г. Нелинейно-оптический метод управления пространственными характеристиками излучения диодных лазеров // Полупроводниковые лазеры и системы на их основе: Сборник статей IX Белорусско-Российского семинара. – Минск, 2013. – С. 206–209.
5. Кизель В.А. Отражение света. – М.: Наука, 1973. – 352 с.
6. Строганов В.И., Самарин В.И. Полное внутреннее отражение необыкновенных лучей // Кристаллография. – 1995. – Т. 20. – № 3. – С. 652–653.
7. Алексеева Л.В., Повх И.В., Строганов В.И. Особенности полного внутреннего отражения в оптических кристаллах // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25. – № 1. – С. 46–51.
8. Алексеева Л.В., Кидяров Б.И., Пасько П.Г., Повх И.В., Строганов В.И. Четырехлучевое расщепление в оптических кристаллах // Оптический журнал. – 2002. – Т. 69. – № 6. – С. 79–81.
9. Карась К.Г. Расщепление световых лучей в оптических кристаллах: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Хабаровск, 2004. – 97 с.
10. Филиппова И.С., Пикуль О.Ю., Строганов В.И. Зависимость интенсивности отраженных в кристалле лучей от угла падения и поляризации излучения // Оптика-2005: Труды IV Междунар. конф. – С.-Петербург, 2005. – С. 340–341.
11. Филиппова И.С., Кравцова Н.А., Строганов В.И., Алексеева Л.В., Соколовский Р.И. Снос необыкновенных лучей при четырехлучевом расщеплении // Оптика-2005: Труды IV Междунар. конф. – С.-Петербург, 2005. – С. 342–343.
12. Повх И.В. Многолучевое отражение световых волн в анизотропных кристаллах: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Хабаровск, 2001. – 103 с.
13. Смышляева М.М. Оптические явления в анизотропных и композитных материалах и возможности их применения в волоконно-оптических системах передачи: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Хабаровск, 2003. – 115 с.

14. Независимое проявление сноса и преломления необыкновенных лучей в анизотропных кристаллах / В.И. Строганов, Л.В. Алексеева, М.Н. Литвинова, В.А. Лебедев, И.А. Гаранькова // Вестник ТОГУ. Физ.-мат. науки. – 2012. – Т. 24. – № 1. – С. 61–64.
15. Four-ray splitting in optical crystals / L.V. Alekseeva, I.V. Povkh, V.I. Stroganov, B.I. Kidyarov, P.G. Pas'ko // Journal of Optical Technology. – 2002. – V. 69. – № 6. – P. 441–442.
16. Propagation of an extraordinary beam through a plane-parallel crystal plate / L.V. Alekseeva, I.V. Povkh, M.N. Litvinova, V.I. Stroganov, I.A. Garankova // Russian Physics Journal. – 2010. – V. 53. – № 5. – P. 539–540.
17. Additional beams in optically uniaxial crystals / M.N. Litvinova, V.I. Stroganov, V.I. Doronin, P.G. Pas'ko // Russian Physics Journal. – 2007. – V. 50. – № 7. – P. 687–690.
18. Кузнецов В.А. Оптические свойства лучерасщепляющих призм на основе одноосных кристаллов: дис.... канд. физ.-мат. наук. – Хабаровск, 2009. – 110 с.
19. Crystal-based device for combining light beams / V. Kuznetsov, D. Faleiev, E. Savin, V. Lebedev // Optics Letters. – 2009. – V. 34. – № 18. – P. 2856–2857.
20. Wang C.C., Racette G.W. Calcite prisms as high-power laser beam combiners // Applied Optics. – 1965. – V. 4. – № 6. – P. 759–761.
21. Множественное отражение световых лучей в системе двух призм / И.С. Филиппова, Л.В. Алексеева, И.В. Повх, В.И. Строганов // Оптика-2005: Труды IV Междунар. конф. – С.-Петербург, 2005. – С. 192–193.
22. Оптическая система из двух призм с анизотропными свойствами / И.С. Филиппова, Л.В. Алексеева, И.В. Повх, В.И. Строганов // Известия вузов. Приборостроение. – 2008. – Т. 51. – № 1. – С. 69–70.
23. A nonreciprocal optical element / L.V. Alekseeva, I.V. Povkh, V.I. Stroganov, B.I. Kidyarov, P.G. Pas'ko // Journal of Optical Technology. – 2003. – V. 70. – № 7. – P. 525–526.
24. Волноводный CO<sub>2</sub>-лазер с квазиоднородным распределением интенсивности выходного излучения / С.А. Власенко, О.В. Гурин, А.В. Дегтярев, В.А. Маслов, В.А. Свич, А.Н. Топков // Квантовая электроника. – 2013. – Т. 43. – № 5. – С. 472–476.
25. Аподизация излучения полупроводникового лазера преобразователем на основе полупроводникового лазера / А.А. Рыжевич, С.В. Солоневич, Н.А. Хило, Н.С. Казак // Полупроводниковые лазеры и системы на их основе: Сборник статей IX Белорусско-Российского семинара. – Минск, 2013. – С. 210–213.
26. Малевич Н.А., Малевич П.Н., Конойко А.И. Внутррезонаторная генерация профилированных и спиральных лазерных пучков // Лазерная физика и оптические технологии: Труды VIII Междунар. науч. конф. – Минск, 2010. – Т. 1. – С. 16–20.

Поступила 10.01.2014 г.

UDC 535:628.373.8, 535:548.0; 539.293; 621.382; 535.015

## METHOD FOR CONTROLLING SPATIAL CHARACTERISTICS OF DIODE LASERS RADIATION

**Valentin V. Parashchuk,**

Cand. Sc., Stepanov Institute of Physics of NASB, 68, Nezavisimosti Avenue, Minsk, 220072, Belarus. E-mail: v.parashchuk@ifanbel.bas-net.by

**Valeriy G. Gudelev,**

Cand. Sc., Stepanov Institute of Physics of NASB, 68, Nezavisimosti Avenue, Minsk, 220072, Belarus. E-mail: v.gudelev@ifanbel.bas-net.by

*The urgency of the discussed issue is caused by necessity of designing new perspective optical devices, in particular diode lasers with the given spatial distribution of radiation directivity diagram intended for being used in acousto-optics, systems of optical communication, information processing and storage, etc.*

*The main aim of the study is to develop a new effective method of forming homogeneous or given spatial distribution of the directivity diagram of diode lasers radiation based on application of multiple-beam-reflection (beam-splitting) phenomenon in anisotropic environments.*

*The methods used in the study: experimental research of intensity distribution for the beams leaving a single four-beam-reflecting prism and the system of such prisms; studying the features of the multiple-beam-reflection effect depending on geometry and test conditions by the example of calcite crystals with average size of birefringence (with sufficient angular resolution) and comparison of the results with the literary data; finding-out of an opportunity of applying the phenomenon for increasing the efficiency of formation of the spatial-homogeneous laser radiation, essential simplifying and expanding functionalities of transformation (correction) of cross-section radiation intensity distribution and perfection of diode laser output characteristics on this basis; analysis of polarization-amplitude characteristics of the effect, uniformity or required configuration of the directivity diagram of diode lasers radiation depending on initial beam parameters and test geometry, set of optimum conditions for increasing the efficiency of the developed method.*

*The results: It was ascertained that the uniformity degree of a formed light profile is proportional to quantity of beams generated by the system – in the case of 16-beam geometry the greatest degree of uniformity of spatial distribution and the maximal intensity of output radiation were achieved. The geometry of a two-dimensional light matrix formed when applying multiple-beam-reflection depends both on mutual orientation of prisms, and on beams direction. The authors have proposed the variant of prism system providing the formation of matrix light fields of various configurations. The fields can be operated effectively changing polarizing and other characteristics of the initial beam. The method proposed in comparison with analogues is characterized by simplicity in use and profitability; does not demand application of complicated intraresonator schema and adjusting processes connected with them; allows correcting effectively various irregularities of a wave surface, including those which are difficult to be removed by the other ways and caused by radiation multiple-mode. In the crystals researched the additional (transversal) shift of the reflected beams was observed. The similar shift was observed in another matters and caused the increase of efficiency of light beam transformation. It is shown, that both attenuation and intensification in the context of the method. It is of practical value.*

### Key words:

Diode laser, radiation directivity diagram, multiple-beam-reflection (beam-splitting), efficiency.

## REFERENCES

1. Parashchuk V.V., Belyaeva A.K., Baranov V.V., Telesh E.V., Vu Doan Mien, Vu Van Luc, Pham Van Truong. Optimizatsiya teplovikh rezhimov diodnykh lazerov [Optimization of diode laser thermal conditions]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 4, pp. 137–141.
2. Parashchuk V.V., Ryabtsev G.I., Belyaeva A.K., Bezyazychnaya T.V., Baranov V.V., Telesh E.V., Vu Doan Mien, Vu Van Luc, Pham Van Truong. Improving the efficiency of high-power diode lasers using diamond heat sinks. *Quantum Electronics*, 2010, vol. 40, no. 4, pp. 301–304.
3. Parashchuk V.V., Vu Doan Mien. Effect of thermal processes on critical operation conditions of high-power laser diodes. *Quantum Electronics*, 2013, vol. 43, no. 10, pp. 907–913.
4. Parashchuk V.V., Gudelev V.G. Nonlinear-optics method of spatial characteristics control of diode lasers radiation. *Book of papers of 9<sup>th</sup> Belarusian–Russian Workshop. Semiconductor Lasers and Systems*. Minsk, 2013, pp. 206–209.
5. Kizel V.A. *Otrazhenie sveta* [Light reflection]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 352 p.
6. Stroganov V.I., Samarin V.I. Polnoe vnutrennee otobrazhenie neobyknoennykh luchey [Full internal reflection of extraordinary beams]. *Kristallografiya*, 1995, vol. 20, no. 3, pp. 652–653.
7. Alekseeva L.V., Povkh I.V., Stroganov V.I. Osobennosti polnogo vnutrennego otrazheniya v opticheskikh kristallakh [Features of full internal reflection in optical crystals]. *Pisma v ZhTF – Technical Physics Letters*, 1999, vol. 25, no. 1, pp. 46–51.
8. Alekseeva L.V., Kidyrov B.I., Pasko P.G., Povkh I.V., Stroganov V.I. Chetyrekhлучевое rasshcheplenie v opticheskikh kristallakh [Four-ray-splitting in optical crystals]. *Opticheskiy Zhurnal – Journal of Optical Technology*, 2002, vol. 69, no. 6, pp. 79–81.
9. Karas K.G. *Rasshcheplenie svetovykh luchey v opticheskikh kristallakh*. Kand. Diss. [Splitting of light rays in optical crystals. Cand. Diss.]. Khabarovsk, 2004. 97 p.
10. Filippova I.S., Pikul O.Yu., Stroganov V.I. Zavisimost intensivnosti otrazhennykh v krystalle luchey ot ugla padeniya i polarizatsii izlucheniya [Dependence of intensity of the beams reflected in a crystal on a angle of slope and polarization of radiation]. *Trudy IV Mezhdunarodnoy Konferentsii «Optika-2005»* [Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. Optics-2005]. S.-Peterburg, 2005. pp. 340–341.
11. Filippova I.S., Kravtsova N.A., Stroganov V.I., Alekseeva L.V., Sokolovskii R.I. Snos neobyknoennykh luchey pri chetyrekhлучевом rasshcheplenii [Shift of an extraordinary beams at the four-ray-splitting]. *Trudy IV Mezhdunarodnoy Konferentsii «Optika-2005»* [Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. Optics-2005]. S.-Peterburg, 2005, pp. 342–343.
12. Povkh I.V. *Mnogoluchevое otrazhenie svetovykh voln v anizotropnykh kristallakh*. Kand. Diss. [Multiple-ray-reflection of light rays in anisotropic crystals. Cand. Diss.]. Khabarovsk, 2001. 103 p.
13. Smyshlyaeva M.M. *Opticheskie yavleniya v anizotropnykh i kompozitnykh materialakh i vozmozhnosti ikh primeneniya v volokonno-opticheskikh sistemakh peredachi*. Kand. Diss. [The optical phenomena in anisotropic and composite materials and opportunity of their application in optical fibre systems of transfer. Cand. Diss.]. Khabarovsk, 2003. 115 p.
14. Stroganov V.I., Alekseeva L.V., Litvinova M.N., Lebedev V.A., Garankova I.A. Nezavisimoe proyavlenie snosa i prelomleniya neobyknoennykh luchey v anizotropnykh kristallakh [Independent display of shift and refraction of extraordinary beams in anisotropic crystals]. *Vestnik TOGU. Fiz.-matem. nauki*, 2012, vol. 24, no. 1, pp. 61–64.
15. Alekseeva L.V., Povkh I.V., Stroganov V.I., Kidyarov B.I., Pasko P.G. Four-ray splitting in optical crystals. *Journal of Optical Technology*, 2002, vol. 69, no. 6, pp. 441–442.
16. Alekseeva L.V., Povkh I.V., Litvinova M.N., Stroganov V.I., Garankova I.A. Propagation of an extraordinary beam through a plane-parallel crystal plate. *Russian Physics Journal*, 2010, vol. 53, no. 5, pp. 539–540.
17. Litvinova M.N., Stroganov V.I., Doronin V.I., Pasko P.G. Additional beams in optically uniaxial crystals. *Physics Journal*, 2007, vol. 50, no. 7, pp. 687–690.
18. Kuznetsov V.A. *Opticheskie svoystva lucherasshcheplyayushchikh prizm na osnove odnoosnykh kristallov*. Kand. Diss. [Optical properties of ray-splitting prisms on a basis single-axis crystals. Cand. Diss.]. Khabarovsk, 2009. 110 p.
19. Kuznetsov V., Faleiev D., Savin E., Lebedev V. Crystal-based device for combining light beams. *Optics Letters*, 2009, vol. 34, no. 18, pp. 2856–2857.
20. Wang C.C., Racette G.W. Calcite prisms as high-power laser beam combiners. *Applied Optics*, 1965, vol. 4, no. 6, pp. 759–761.
21. Filippova I.S., Alekseeva L.V., Povkh I.V., Stroganov V.I. Mnozhestvennoe otrazhenie svetovykh luchey v sisteme dvukh prizm [Multiple reflection of light beams in system of two prisms]. *Trudy IV Mezhdunarodnoy Konferentsii «Optika-2005»* [Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. Optics-2005]. S.-Peterburg, 2005. pp. 192–193.
22. Filippova I.S., Alekseeva L.V., Povkh I.V., Stroganov V.I. Opticheskaya sistema iz dvukh prizm s anizotropnyimi svoystvami [Optical system of two prisms with anisotropic properties]. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*, 2008, vol. 51, no. 1, pp. 69–70.
23. Alekseeva L.V., Povkh I.V., Stroganov V.I., Kidyarov B.I., Pasko P.G. Nevzaimnye opticheskiye elementy [Nonreciprocal optical elements]. *Opticheskiy Zhurnal – Journal of Optical Technology*, 2003, vol. 70, no. 7, pp. 525–526.
24. Vlasenko S.A., Gurin O.V., Degtyarev A.V., Maslov V.A., Svits V.A., Topkov A.N. Waveguide CO<sub>2</sub>-laser with quasihomogeneous distribution of intensity of output radiation. *Quantum Electronics*, 2013, vol. 43, no. 5, pp. 472–476.
25. Ryzhevich A.A., Solonevich S.V., Khilo N.A., Kazak N.S. Apodization of radiations of the semiconductor laser by the converter on the basis of the semiconductor laser. *Book of papers of 9<sup>th</sup> Belarusian–Russian Workshop. Semiconductor Lasers and Systems*. Minsk, 2013. pp. 210–213.
26. Malevich N.A., Malevich P.N., Konoyko A.I. Vnutrirezonnaya generatsiya profilirovannykh i spiralnykh lasernykh puchkov [Intraresonator generation of profiled and spiral laser beams]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy Nauchnoy Konferentsii «Lasernaya fizika i opticheskiye tekhnologii»* [Proc. 8<sup>th</sup> Int. Sci. Conf. Laser Physics and Optic Theknology]. Minsk, 2010. Vol. 1, pp. 16–20.

Received: 10 January 2014.



УДК 539.214:539.382.2

## ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ СТРУКТУРЫ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 В СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ ПРИ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

**Раточка Илья Васильевич,**

канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения СО РАН», Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4. E-mail: ivr@ispms.tsc.ru

**Лыкова Ольга Николаевна,**

вед. техн. ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения СО РАН», Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4. E-mail: lon8@yandex.ru

**Грабовецкая Галина Петровна,**

д-р физ.-мат. наук, ведущ. науч. сотр. ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения СО РАН», Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4. E-mail: grabg@ispms.tsc.ru

*Работа выполнена с целью установления взаимосвязи между эволюцией структуры и особенностями деформационного поведения сплава ВТ6 в субмикрокристаллическом состоянии при сверхпластической деформации. Субмикрокристаллическое состояние в исследуемом сплаве получали с помощью метода всестороннего прессования со сменой оси деформации и постепенным понижением температуры в интервале 823–1073 К. Изучение деформационного поведения субмикрокристаллического состояния сплава ВТ6 проводили при растяжении в вакууме  $10^{-2}$  Па с начальной скоростью деформации  $6,9 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  в интервале температур 773–1073 К. Исследования исходной и после деформации образцов на 40, 60 и 200 % субмикрокристаллической структуры сплава проводили с использованием метода просвечивающей электронной микроскопии. Установлено, что формирование субмикрокристаллической структуры приводит к снижению начала температурного интервала реализации сверхпластического течения в исследуемом сплаве с 1173 до 873 К. Показано, что при повышении температуры сверхпластической деформации образцов субмикрокристаллического сплава ВТ6 от 873 до 973 К на кривых растяжения в координатах «истинное напряжение – истинная деформация» появляются протяженные участки деформационного упрочнения. Эволюция структуры при сверхпластической деформации субмикрокристаллического сплава ВТ6 зависит от температуры испытаний, и при температуре 973 К наблюдается изменение характера гистограммы распределения элементов зеренно-субзернной структуры по размерам от однодального к бимодальному. Показано, что деформационное упрочнение исследуемого сплава при сверхпластическом течении обусловлено формированием в нем бимодальной структуры и ростом объемной доли относительно крупных зерен в процессе деформации.*

### **Ключевые слова:**

*Титановый сплав, субмикрокристаллическая структура, сверхпластическая деформация, кривые течения, эволюция структуры, размер зерна.*

### **Введение**

В последнее время активно исследуются поликристаллические металлы и сплавы с субмикронной и нанокристаллической (СМК и НК) структурой, полученные методами интенсивной пластической деформации. Интерес к таким материалам связан, в первую очередь, с тем, что они обладают уникальными физико-механическими свойствами, существенно отличающимися от свойств крупнозернистых аналогов [1–5]. В частности, при определенных условиях, СМК и НК материалы проявляют низкотемпературную и/или высокоскоростную сверхпластичность. Проведенные исследования показали, что механическое поведение таких материалов, так же как и мелкозернистых, при сверхпластической деформации определяется преимущественно размером зерна, структурно-фазовым состоянием, а также высокой степенью неравномерности границ зерен и, как следствие, увеличе-

нием их диффузионной проницаемости [1–3, 6–10]. С другой стороны, сверхпластическое течение СМК и НК материалов имеет целый ряд особенностей. Так, например, при сверхпластической деформации таких сплавов на кривых «напряжение–деформация» часто наблюдаются протяженные участки деформационного упрочнения [1, 11–15]. В то же время для «обычных» мелкозернистых сверхпластичных материалов характерна слабая зависимость напряжения течения от степени деформации [16, 17]. Однако до настоящего времени эффект деформационного упрочнения при сверхпластической деформации СМК и НК материалов не получил удовлетворительного объяснения. В связи с этим дальнейшие экспериментальные исследования особенностей развития механизмов сверхпластической деформации и эволюции структуры в таких материалах представляются актуальными.

### Материал и методика исследований

В работе использовали промышленный сплав ВТ6 в субмикроструктурном состоянии. Указанное состояние получали методом всестороннего прессования [18] в интервале температур 823–1073 К. Испытания на растяжение образцов в виде двойной лопатки с размерами рабочей базы 5·1,7·0,8 мм<sup>3</sup> проводили на установке ПВ-3012 М, оснащенной тензометрической системой измерения нагрузки с автоматической записью кривых течения в координатах нагрузка–время в вакууме 10<sup>-2</sup> Па с начальной скоростью деформации 6,9·10<sup>-3</sup> с<sup>-1</sup> в интервале температур от 773 до 1073 К. Образцы вырезали электроискровым способом. Перед испытанием с поверхности образцов удаляли слой толщиной около 100 мкм механической шлифовкой и последующей электролитической полировкой. Структурные исследования проводили с использованием просвечивающего электронного микроскопа ЭМ-125 К. Фольги для электронной микроскопии готовили стандартным методом на установке для струйной полировки «Микрон-103», с применением электролита следующего состава: 20 % HClO<sub>4</sub>+80 % CH<sub>3</sub>CO<sub>2</sub>H. Размеры элементов зеренно-субзеренной структуры определяли по темнопольному изображению (после всестороннего прессования) и по светлопольному изображению (после сверхпластической деформации). Выборка составляла не менее 200 зерен.

### Экспериментальные результаты

На рис. 1 представлена типичная структура, формирующаяся в сплаве ВТ6 после всестороннего прессования. Исследования, выполненные с использованием электронной микроскопии, показали, что средний размер элементов зеренно-субзеренной структуры составляет около 0,25 мкм (рис. 1, б).

На электронномикроскопических снимках внутри зерен, как правило, наблюдается сложный деформационный контраст. Отдельные дислокации не выявляются. Кольцевые микродифракции, при малом размере селекторной диафрагмы (площадь диафрагмы ~1,8 мкм<sup>2</sup>), свидетельствуют о большой доле высокоугловых границ зерен. Как было показано авторами [19], формирование такой структуры приводит к реализации сверхпластического течения сплава при достаточно низких температурах (873–973 К). При этом относительное удлинение образцов может составлять 500–700 %, в зависимости от условий деформации.

На рис. 2 представлены типичные кривые растяжения субмикроструктурного сплава ВТ6 в координатах «истинное напряжение – истинная деформация». Особенностью этих кривых является наличие при определенных температурно-скоростных условиях участков длительного деформационного упрочнения (рис. 2, кривая 2). Как уже было отмечено выше, такой характер кривых течения часто наблюдается при сверхпластической деформации субмикро- и нанокристаллических ме-

таллов и сплавов [1, 11–15]. Для выяснения физической природы указанной особенности развития сверхпластической деформации в субмикроструктурном состоянии в настоящей работе были проведены электронномикроскопические исследования эволюции структуры после различных степеней деформации в зависимости от температуры.

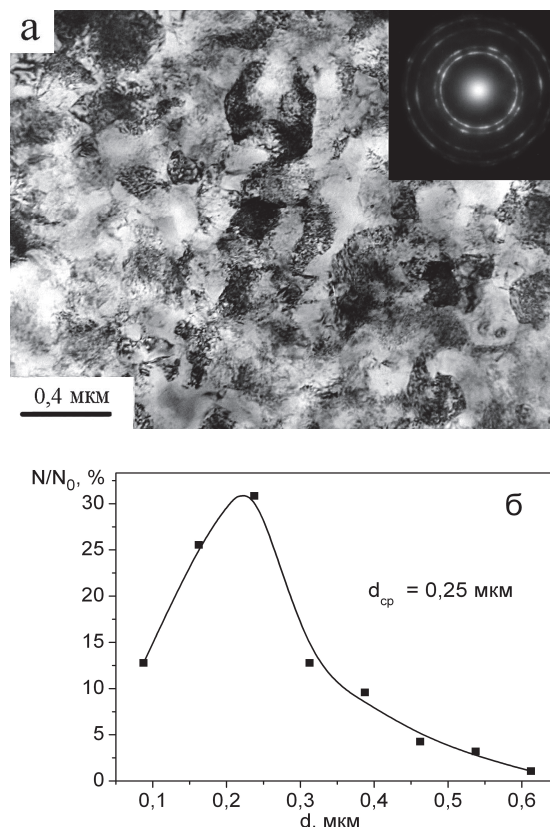


Рис. 1. Микроструктура (а) и гистограмма распределения зеренно-субзеренной структуры по размерам (б) сплава ВТ6 в субмикроструктурном состоянии

Fig. 1. Microstructure (a) and size distribution histogram of grain-subgrain structure (b) of VT6 alloy in submicrocrystalline state

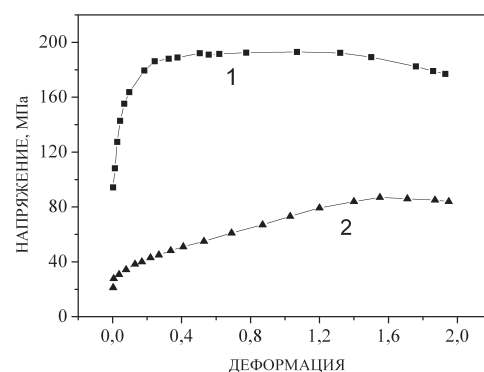
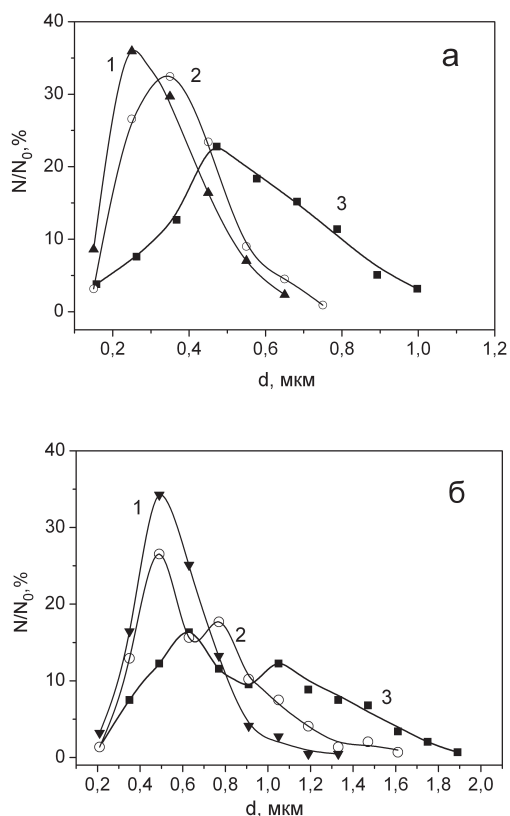


Рис. 2. Зависимость истинного напряжения течения от степени деформации образцов сплава ВТ6 при температурах 873 и 973 К (кривые 1 и 2, соответственно)

Fig. 2. Dependence of flow real stress on deformation degree of VT6 alloy samples at 873 and 973 K (curves 1, 2 correspondingly)



**Рис. 3.** Гистограммы распределения зеренно-субзеренной структуры по размерам после сверхпластической деформации при температурах 873 (а) и 973 (б) К: 1 – 40, 2 – 60, 3 – 200 %

**Fig. 3.** Size distribution histograms of grain-subgrain structure after superplastic deformation at 873 (a) and 973 (b) K: 1 – 40, 2 – 60, 3 – 200 %

На рис. 3 представлены гистограммы распределения зеренно-субзеренной структуры по размерам после деформации при 873 К. Видно, что с увеличением степени деформации гистограммы остаются качественно подобными. Во всем исследованном интервале они остаются одномодальными, наблюдается только постепенное увеличение среднего размера зерна (рис. 3, сравнение кривых 1–3). В то же время характер роста зерен в процессе деформации при 973 К имеет качественно иной характер. Так, если после 40 % деформации гистограмма распределения зеренно-субзеренной структуры по размерам сохраняет одномодальный характер, лишь наблюдается появление небольшого «хвоста» (рис. 4, кривая 1), то при дальнейшей деформации образцов рассматриваемые гистограммы приобретают бимодальный вид (рис. 4, кривые 2 и 3). Таким образом, характер эволюции структуры качественно меняется в зависимости от температуры сверхпластического течения сплава ВТ6 и коррелирует с изменением характера деформационных кривых. Известно [16, 17], что при сверхпластической деформации напряжение течения ( $\sigma$ ) пропорционально размеру зерна  $\sigma \sim d^a$ , где  $a=0,7...2$ , причем наиболее часто  $a=1$ . Следовательно, можно предполагать, что отмеченные вы-

ше особенности в росте зерен могут быть причиной наблюдаемого деформационного упрочнения сплава ВТ6 в процессе сверхпластического течения.

В литературе имеются данные о том, что наличие разнотерности в исходной структуре мелкозернистых сверхпластических сплавов оказывает существенное влияние на их механические свойства в условиях сверхпластического течения. Так, например, в [16] рассматривался алюминиевый сплав О1420 в трех состояниях: с равноосной мелкозернистой структурой –  $d=6$  мкм, с крупнозернистой –  $d=75$  мкм и смешанной структурой, в которой наряду с крупными вытянутыми зернами имеют место равноосные мелкие зерна с  $d=6$  мкм. Площадь фракций мелких и крупных зерен в этом состоянии находилась в соотношении 1:1. В указанной работе показано, что при наличии смешанной структуры сплав проявляет признаки сверхпластического состояния. Однако при этом его напряжение течения увеличивается по сравнению с напряжением течения для однородного мелкозернистого сплава и уменьшается по сравнению с напряжением для крупнозернистого. В работе [20] была предложена модель, позволяющая рассчитать механические свойства сверхпластического сплава с учетом объемной доли зерен с разным размером, принимая их вклад в сверхпластическую деформацию аддитивным. При этом было показано [20], что напряжение течения в рамках данной модели можно оценить по формуле:

$$\sigma = \sum f_i \sigma_i, \quad (1)$$

где  $f_i$  – объемная доля зерен среднего размера  $d_i$ ;  $\sigma_i$  – соответствующее напряжение течения. Сравнение результатов, рассчитанных по указанной модели, показало хорошее совпадение с экспериментальными результатами, полученными на сплавах Ti-6Al-4V и Al7475 [20].

Как видно из приведенной выше формулы, увеличение, например, объемной доли крупных зерен в процессе деформации, при прочих равных условиях, приведет к соответствующему росту величины напряжения течения. Для проверки данного предположения в настоящей работе были проведены оценки объемных долей крупных и мелких зерен после различных степеней деформации, что дает возможность сравнить экспериментальные и расчетные величины напряжения течения.

Для проведения таких оценок рассмотрим более детально эволюцию структуры сплава ВТ6 в процессе деформации при 973 К и ее взаимосвязь с напряжением течения сплава. Очевидно, что при 40 % деформации (начальный этап стадии деформационного упрочнения) величина напряжения течения определяется элементами зерно-субзеренной структуры, размеры которых менее 1 мкм, т. е. объемная доля таких элементов более 80 % (рис. 3, кривая 1). Назовем для определенности такие элементы «мелкими». Величина напряжения течения образцов сплава с «мелкими» элементами, как видно из рис. 2, составляет ~50 МПа. В то же



время при деформации 200 % (напряжение течения сплава начинает слабо зависеть от степени деформации) величина напряжения будет определяться в основном элементами с размерами более 1 мкм, т. к. их объемная доля около 90 % (рис. 3, кривая 3) (назовем такие элементы «крупными»). Величина напряжения течения в этом случае составляет ~80 МПа (рис. 2). Согласно сделанному выше предположению, величина напряжения течения сплава во всех промежуточных точках между 40 и 200 % будет определяться соотношением объемных долей «мелких» и «крупных» элементов. В нашем случае известно распределение элементов зеренно-субзерной структуры по размерам при 60 % деформации, что дает возможность сравнить экспериментальную и расчетную (из формулы (1)) величины напряжения течения. Из гистограммы распределения элементов по размерам при деформации 60 % (рис. 3, кривая 2) можно провести оценку объемной доли «мелких»  $f_1$  и «крупных»  $f_2$  элементов в рассматриваемых условиях. Проведенные расчеты показывают, что объемные доли  $f_1$  и  $f_2$  составляют 0,45 и 0,55, соответственно. Подставляя полученные значения  $f_1$  и  $f_2$  и

соответствующие им напряжения в формулу (1) находим, что напряжение течения при деформации на 60 % при 973 К должно быть около 66 МПа. Сравнивая расчетные данные с экспериментальными результатами (60 МПа – рис. 2, кривая 2), получаем хорошее соответствие.

#### Заключение

Проведенные исследования показали, что эволюция структуры при сверхпластической деформации титанового сплава ВТ6 существенно зависит от температуры испытаний. Деформация сплава при 973 К приводит к изменению характера гистограммы распределения элементов зеренно-субзерной структуры по размерам от одномодального к бимодальному. При этом установлено, что деформационное упрочнение исследуемого сплава ВТ6 при сверхпластическом течении обусловлено формированием в нем бимодальной структуры и ростом объемной доли относительно крупных элементов структуры в процессе деформации.

*Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований СО РАН на 2013–2016 гг. III.23.2.2.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, подвергнутые интенсивной пластической деформации. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
2. Зернограничная диффузия и свойства наноструктурных материалов / Ю.Р. Колобов, Р.З. Валиев, Г.П. Грабовецкая и др. – Новосибирск: Наука, 2001. – 232 с.
3. Кайбышев О.А., Утяшев Ф.З. Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов. – М.: Наука, 2002. – 438 с.
4. Meyers M.A., Mishra A., Benson D.J. Mechanical properties of nanocrystalline materials // Progress in materials science. – 2006 – V. 51. – P. 427–556.
5. Корзникова Г.Ф., Миронов С.Ю., Корзникова Е.А. Повышение пластичности в магнетитовом сплаве 25Х15К после деформации на наковальных Бриджмена // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т. 16. – № 5. – С. 79–85.
6. Грабовецкая Г.П., Мельникова Е.Н., Чернов И.П. Структурно-фазовое состояние и механические свойства субмикроструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V, полученного с использованием обратимого легирования водородом // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 2. – С. 111–116.
7. Влияние насыщения водородом и облучения ионизирующим излучением на структуру и механические свойства субмикроструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V / Н.Н. Никитенков, Е.Н. Кудрявцева, И.П. Чернов и др. // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313. – № 2. – С. 105–110.
8. Naydenkin E.V., Ratochka I.V., Grabovetskaya G.P. The Aspects of Practical Application of Ultrafine-Grained Titanium Alloys Produced Severe Plastic Deformation // Materials Science Forum. – 2011. – V. 667–669. – P. 1183–1188.
9. Влияние наноструктурирования поверхностного слоя алюминий-литиевого сплава 1424 на механизмы деформации, технологические характеристики и усталостную долговечность. Повышение пластичности и технологических характеристик / В.Е. Панин, Е.Н. Каблов, Ю.И. Почивалов, С.В. Панин, Н.И. Колобнев // Физическая мезомеханика. – 2012. – Т. 15. – № 6. – С. 107–111.
10. Липницкий А.Г., Неласов И.В., Колобов Ю.Р. Молекулярно-динамическое исследование зернограничной самодиффузии в ГПУ- и ОЦК-фазах нанокристаллического титана // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т. 16. – № 1. – С. 67–73.
11. Высокоскоростная сверхпластичность промышленных алюминиевых сплавов 1421 и 1460 / А.М. Шаммазов, Н.К. Цевев, Р.З. Валиев и др. // ФММ. – 2000. – Т. 89. – № 3. – С. 107–111.
12. Characteristics of superplasticity in an ultrafine-grained aluminum alloy processed by ECA pressing / R.K. Islamgaliev, N.F. Yunusova, R.Z. Valiev, N.K. Tsenev, V.N. Perevezentsev, T.G. Langdon. // Scripta Materialia. – 2003. – V. 49. – № 5. – P. 467–472.
13. Enhanced superplasticity in a Ti-6Al-4V alloy processed by severe plastic deformation / A.V. Sergueeva, V.V. Stolyarov, R.Z. Valiev, A.K. Mukherjee // Scripta Materialia. – 2000. – V. 43. – № 9. – P. 819–824.
14. Влияние легирования водородом на деформационное поведение и локализацию пластической деформации на макромасштабном уровне субмикроструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V / Г.П. Грабовецкая, Е.Н. Мельникова, Ю.Р. Колобов, И.П. Чернов // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9. – Спец. вып. – С. 107–110.
15. The effect of equal-channel angular pressing on structure-phase changes and superplastic properties of Al-Mg-Li alloy / E.V. Naidenkin, E.F. Dudarev, Yu.R. Kolobov, G.P. Bakach, T.G. Langdon // Materials science forum. – 2006. – V. 503–504. – P. 983–988.
16. Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – 264 с.
17. Новиков И.И., Портной В.К. Сверхпластичность сплавов с ультрамелким зерном. – М.: Металлургия, 1981. – 168 с.
18. Способ получения титановых сплавов с субмикроструктурной структурой деформированием с обеспечением интенсивной пластической деформации: пат. РФ № 2388566, 2010.
19. Раточка И.В., Лыкова О.Н., Гераськина А.Ю. Особенности сверхпластической деформации титанового сплава ВТ6 с субмикроструктурной структурой // Деформация и разрушение материалов. – 2009. – № 4. – С. 37–39.
20. Grosh A.K., Raj R. Grain size distribution effects in superplasticity // Acta Metallurgica. – 1981. – V. 29. – P. 607–616.

*Поступила 16.01.2014 г.*



UDC 539.214:539.382.2

## FEATURES OF EVOLUTION OF Ti-6Al-4V SUBMICROCRYSTALLINE TITANIUM ALLOY STRUCTURE UNDER SUPERPLASTIC DEFORMATION

Ilya V. Ratochka,

Cand. Sc., Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS,  
2/4, Akademicheskii Avenue, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: ivr@ispms.tsc.ru

Olga N. Lykova,

Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Russia,  
2/4, Akademicheskii Avenue, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: lon8@yandex.ru

Galina P. Grabovetskaya,

Dr. Sc., Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS,  
2/4, Akademicheskii Avenue, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: grabg@ispms.tsc.ru

The aim of the study is to determine the correlation between the structure evolution and features of submicrocrystalline VT6 alloy deformation behavior under superplastic deformation. In the alloy was obtained by the multi-directional pressing method changing the deformation axis and gradual decrease of deformation temperature in the interval of 823–1073 K. Deformation behavior of VT6 alloy submicrocrystalline state was studied under tensile tests of  $10^{-2}$  Pa in vacuum with the initial stretching rate of  $6,9 \cdot 10^{-3}$  sec $^{-1}$  and in the temperature range of 773–1073 K. The TEM method has been used to investigate the alloy structure in the initial state as well as in the submicrocrystalline state after the elongation of 40, 60 and 200 %. Submicrocrystalline structure formation in the alloy is found to lead to decreasing the temperature interval of superplastic flow beginning from 1173 to 873 K. It was shown that the increase in temperature of superplastic deformation of submicrocrystalline VT6 alloy samples from 873 to 973 K results in appearance of strain hardening stage in the stress-strain curves in the coordinates of the «true stress – true strain». Structure evolution of the submicrocrystalline VT6 alloy during superplastic deformation depends on the test temperature. At 973 K one can observe the change in the character of size distribution histogram of grain-subgrain structure elements from unimodal to bimodal. The strain hardening of the alloy under superplastic flow is caused by bimodal structure formation in it and growth in volume fraction of relatively large grains at deformation.

### Key words:

Titanium alloy, submicrocrystalline structure, superplastic deformation, «stress-strain» curves, structure evolution, grain size.

The research is financially supported by the fundamental research program of SB RAS for 2013–2016 III.23.2.2.

### REFERENCES

1. Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. *Nanostrukturnye materialy, podvergnutyie intensivnoy plasticheskoy deformatsii* [Bulk Nanostructured Materials from Severe Plastic Deformation]. Moscow, Logos Publ., 2000. 272 p.
2. Kolobov Yu.R., Valiev R.Z., Grabovetskaya G.P. *Zernogranichnaya diffuziya i svoystva nanostrukturnykh materialov* [Grain Boundary Diffusion and Properties of Nanostructured Materials]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2001. 232 p.
3. Kaybyshev O.A., Utyashev F.Z. *Sverkhplastichnost, izmelchenie struktury i obrabotka trudnodeformiruemyykh splavov* [Superplasticity, Structure Refinement and Treatment of Hard-to-Deform Alloys]. Moscow, Nauka Publ., 2002. 438 p.
4. Meyers M.A., Mishra A., Benson D.J. Mechanical properties of nanocrystalline materials. *Progress in materials science*, 2006, vol. 51, pp. 427–556.
5. Korznikova G.F., Mironov S.Yu., Korznikova E.A. Povyshenie plastichnosti v magnitotverdom splave 25KX15K posle deformatsii na nakovalnyakh Bridzhmena [Plasticity enhancement in 25Cr15Co hard magnetic alloy deformed on Bridgman anvils]. *Fizicheskaya mezomekhanika – Physical Mesomechanics*, 2013, vol. 16, no. 5, pp. 79–85.
6. Grabovetskaya G.P., Melnikova E.N., Chernov I.P. Strukturno-fazovoe sostoyanie i mekhanicheskie svoystva submikrokristallicheskogo titanovogo splava Ti-6Al-4V, poluchennogo s ispolzovaniem obratimogo legirovaniya vodorodom [Structural-phase state and mechanical properties of submicrocrystalline titanium alloy Ti-6Al-4V obtained with use of reversible hydrogen alloying]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 2, pp. 111–116.
7. Nikitenkov N.N., Kudryavceva E.N., Chernov I.P. Vliyanie nasysheniya vodorodom i oblucheniya ioniziruyushhim izlucheniem na strukturu i mekhanicheskie svoystva submikrokristallicheskogo titanovogo splava Ti-6Al-4V [Hydrogen saturation effect and irradiation by ionizing radiation on structure and mechanical properties of submicrocrystalline alloy Ti-6Al-4V]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 313, no. 2, pp. 105–110.
8. Naydenkin E.V., Ratochka I.V., Grabovetskaya G.P. The Aspects of Practical Application of Ultrafine-Grained Titanium Alloys Produced Severe Plastic Deformation. *Materials Science Forum*, 2011, vol. 667–669, pp. 1183–1188.
9. Panin V.E., Kablov E.N., Pochivalov Yu.I., Panin S.V., Kolobov N.I. Vliyanie nanostrukturirovaniya poverkhnostnogo sloya alyuminiy-litievogo splava 1424 na mekhanizmy deformatsii, tekhnologicheskoe kharakteristiki i ustalostnyuyu dolgovechnost. Povyshenie plastichnosti i tekhnologicheskikh kharakteristik [Effect of surface nanostructuring on deformation mechanisms and fatigue life of Al-Li alloy 1424. Enhancement of plasticity and technological characteristics]. *Fizicheskaya mezomekhanika – Physical Mesomechanics*, 2012, vol. 15, no. 6, pp. 107–111.
10. Lipnitskiy A.G., Nelasov I.V., Kolobov Yu.R. Molekulyarno-dinamicheskoe issledovanie zernogranichnoy samodiffuzii v GPU- i OTSK-fazakh nanokristallicheskogo titana [Molecular dynamics study of grain boundary self-diffusion in HCP and BCC nanocrystalline titanium]. *Fizicheskaya mezomekhanika – Physical Mesomechanics*, 2013, vol. 16, no. 1, pp. 67–73.

11. Shammazov A.M., Tsenev N.K., Valiev R.Z. Vysokoskorostnaya sverkhplastichnost promyshlennykh alyuminiyevykh splavov 1421 i 1460 [High-strain-rate superplasticity of commercial grade 1421 and 1460 aluminum alloys]. *FMM – Physics of Metals and Metallography*, 2000, vol. 89, no. 3, pp. 107–111.
12. Islamgaliev R.K., Yunusova N.F., Valiev R.Z. Tsenev N.K., Perevezentsev V.N., Langdon T.G. Characteristics of superplasticity in an ultrafine-grained aluminum alloy processed by ECA pressing. *Scripta Materialia*, 2003, vol. 49, no. 5, pp. 467–472.
13. Sergueeva A.V., Stolyarov V.V., Valiev R.Z., Mukherjee A.K. Enhanced superplasticity in a Ti-6Al-4V alloy processed by severe plastic deformation. *Scripta Materialia*, 2000, vol. 43, no. 9, pp. 819–824.
14. Grabovetskaya G.P., Melnikova E.N., Kolobov Yu.R., Chernov I.P. Vliyanie legirovaniya vodorodom na deformatsionnoe povedenie i lokalizatsiyu plasticheskoy deformatsii na makromasshtabnom urovne submikrokristallicheskogo titanovogo splava Ti-6Al-4V [Effect of hydrogenation on strain-induced behavior and plastic deformation localization of submicrocrystalline titanium alloy Ti-6Al-4V at the macrolevel]. *Fizicheskaya mezomekhanika – Physical Mesomechanics*, 2006, vol. 9, Spec. Iss., pp. 107–110.
15. Naidenkin E.V., Dudarev E.F., Kolobov Yu.R., Bakach G.P., Langdon T.G. The effect of equal-channel angular pressing on structure-phase changes and superplastic properties of Al-Mg-Li alloy. *Materials science forum*, 2006, vol. 503–504, pp. 983–988.
16. Kaybyshev O.A. *Sverkhplastichnost promyshlennykh splavov* [Superplasticity of Commercial Alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1984. 264 p.
17. Novikov I.I., Portnoy V.K. *Sverkhplastichnost splavov s ultramelkim zernom* [Superplasticity in Ultrafine-Grained Alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 168 p.
18. Vinokurov V.A., Ratochka I.V., Naidenkin E.V., Mishin I.P., Rozhintseva N.V. *Sposob polucheniya titanovykh splavov s submikrokristallicheskoy strukturoy deformirovaniem s obespecheniem intensivnoy plasticheskoydeformatsii* [Method to produce titanium alloys with submicrocrystalline strain structure allowing intensive plastic strain]. Patent RF no. 2388566, 2010.
19. Ratochka I.V., Lykova O.N., Geraskina A.Yu. Osobennosti sverkhplasticheskoy deformatsii titanovogo splava VT6 s submikrokristallicheskoy strukturoy [Characteristic features of superplastic flow development in submicrocrystalline VT6 alloy]. *Deformatsiya i razrushenie materialov – Russian Metallurgy (Metally)*, 2009, no. 4, pp. 37–39.
20. Grosh A.K., Raj R. Grain size distribution effects in superplasticity. *Acta Metallurgica*, 1981, vol. 29, pp. 607–616.

Received: 16 January 2014.

УДК 537.855

## АНТИСТАТИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВЫХ КРАСОК, ОБРАБОТАННЫХ В ПЛАНЕТАРНОЙ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ

**Языков Сергей Юрьевич,**

инженер-технолог Открытого акционерного общества  
«Научно-производственный центр «Полус»», 634041, г. Томск,  
пр. Кирова, 56 б. E-mail: yazikov.sergey@gmail.com

**Даммер Владислав Христианович,**

канд. техн. наук, начальник отдела 28 Открытого акционерного общества  
«Научно-производственный центр «Полус»», 634041, г. Томск,  
пр. Кирова, 56 б. E-mail: yazikov.sergey@gmail.com

**Панин Сергей Викторович,**

д-р техн. наук, профессор кафедры материаловедение в машиностроении  
ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический  
университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30; заместитель  
директора по научной работе Института физики прочности  
и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Томск, пр. Академический, 2/4. E-mail: svp@ispms.tsc.ru

**Овечкин Борис Борисович,**

канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедение в машиностроении  
ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический  
университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.  
E-mail: ovechkinb@tpu.ru

*Авторы исследовали возможность придания покрытию на основе порошковой краски свойства электропроводности за счет обработки в планетарной шаровой мельнице. При варьировании времени механообработки, а также содержания наполнителя исследовали свойства порошковых смесей, а также структуру и свойства покрытий, функциональность которых достигнута введением в порошковую краску электропроводящего наполнителя и последующей их совместной обработкой в планетарной мельнице. Важной задачей являлось оптимизировать структуру и свойства покрытий при сохранении исходных физико-механических свойств порошковой краски и придании ей принципиально новых функциональных качеств. Обработку порошковых смесей проводили с помощью планетарной мельницы МП 4/0,5 (ООО Техноцентр, г. Рыбинск) при суммарной частоте вращения стаканов 800 об/мин. Технический углерод и порошковая краска в необходимых количествах загружались в планетарную мельницу, где происходила их совместная механическая обработка в течение 20...80 мин с шагом по времени 10 мин. Влияние времени механической обработки на свойства порошковой смеси оценивали по данным измерения насыпной плотности. В результате комплекса испытаний, имитирующих различные атмосферные и механические воздействия, установлено, что разработанное покрытие с содержанием технического углерода 12,5 % и времени механообработки порошковой смеси в планетарной мельнице 40 минут обеспечивает формирование пленки покрытия толщиной 70 мкм, обладающего удовлетворительными функциональными и защитными свойствами. Показано, что предложенный способ формирования покрытий на деталях из магниевых сплавов, сочетающий введение электропроводящего наполнителя, обработку порошковой смеси в планетарной шаровой мельнице и электростатическое напыление, может использоваться для снятия статического электричества с корпусов аппаратуры космических аппаратов, работающих в условиях открытого космоса.*

### **Ключевые слова:**

*Порошковая краска, технический углерод, электропроводимость, планетарная шаровая мельница, защитное покрытие.*

### **Цель работы**

Прогресс в современных отраслях техники (авиационной, ракетно-космической, электронной, автомобильной и др.) при соблюдении требований жесткой экономии энергоресурсов невозможен без применения в конструкциях наиболее легких, прочных и технологичных материалов [1–3]. Для сплавов на металлической основе это означает, в первую очередь, активное внедрение таких конструкционных материалов, как магниевые сплавы.

Эффективность защиты изделий с помощью лакокрасочных материалов традиционно оценивается сроком эксплуатации, в течение которого такое покрытие сохраняет заданный комплекс своих характеристик: противокоррозионные свойства, износостойкость, стойкость к химическим реагентам, декоративный вид и пр. Поэтому решающим фактором при выборе той или иной системы покрытия при выборе той или иной системы защиты окрашенный объект в конкретных условиях эксплуатации в течение требуемого периода времени. Окра-

шивание порошковыми лакокрасочными материалами представляет собой одну из наиболее продвинутых технологий получения покрытий, отвечающих современным требованиям [4, 5]. В последнее время практически нет отрасли промышленности, где бы ни нашла применения эта технология [6].

Для работы в сложных внешних условиях (открытый космос, трубопроводы, работающие при значительных перепадах температур, и пр.), помимо выполнения защитной функции, покрытия зачастую должны обеспечивать выполнение функциональных свойств, одним из которых может быть электропроводность. Решение такой проблемы может быть достигнуто за счет введения в покрытие порошков-наполнителей, придающих порошковым краскам такое свойство [7, 8]. Это позволит использовать их, в частности, для снятия статического электричества с корпусов аппаратуры космических аппаратов, работающих в условиях открытого космоса [9, 10]. Таким образом, разработка составов и методов формирования защитных функциональных покрытий подобного класса с использованием модифицированных (наполненных) порошковых красок и порошковых технологий весьма актуально [11, 12].

Существуют несколько способов введения наполнителей (пигментов) в краски, например экструзия, бондирование, сухое смешение и др. [13]. Первый из них состоит в смешении всех компонентов краски, включая токопроводящий наполнитель, и дальнейшем прохождении порошковой смеси через экструдер. Метод бондирования заключается в термическом скреплении частиц наполнителя с частицами краски, когда порошковую краску нагревают, а затем добавляют наполнитель для придания специальных функциональных свойств. Метод сухого смешения наиболее прост, доступен и экономичен. Он позволяет равномерно распределить токопроводящий наполнитель в полимерном связующем за счет того, что частицы наполнителя обволакивают полимер. Это обуславливает увеличение текучести, уменьшение слеживания и окомкования, а получаемая смесь хорошо заряжается при коронной зарядке и не сепарируется в процессе хранения. Однако наполнитель, выступая в роли прослойки, мешает слиянию расплавленных частиц при пленкообразовании, в результате чего может происходить растрескивание получаемого покрытия. Поэтому рекомендуется использовать его в содержании не выше 23 мас. % [14].

Поскольку проводником электрического тока в полимерной композиции являются именно и только частицы наполнителя, для решения такой задачи наиболее широко применяются технический углерод (ТУ), графит, углеродное волокно, порошки металлов, металлические усы [15] и пр. Однако проводящие покрытия с весьма высоким содержанием металлических порошков имеют очень высокую насыпную плотность, и поэтому их трудно нанести на подложку [16]. Одним из возможных пу-

тей решения данной проблемы является использование электропроводящих частиц технического углерода (ООО «Омсктехуглерод»), в частности марок П-267Э, П-268Э, удельное объемное сопротивление которых составляет 0,103...0,136 Ом·см. Их применение наиболее эффективно по причине невысокой стоимости, широкой доступности по сравнению с углеродными волокнами [17]. Кроме того, такой наполнитель не приводит к деградации полимера, как в случае использования металлических порошков [18].

Из литературных данных [15] известно, что содержание 10...15 % технического углерода в полимерной матрице уже достаточно для того, чтобы придать покрытию антистатические свойства. Однако для получения покрытий, проводящих электрический ток, концентрация углерода должна быть увеличена до 20...40 мас. %, что обусловлено необходимостью обеспечения непосредственного контакта между частицами наполнителя или доведения расстояния между ними до нескольких ангстрем [19].

В настоящей работе эффект придания покрытию свойства электропроводности достигался обработкой в быстроходном смесителе [20], в качестве которого использована планетарная шаровая мельница (ПШМ).

В ходе исследования ставились следующие цели:

- разработать и исследовать свойства порошковых смесей, а также структуру и свойства покрытий, электропроводность которых достигнута введением в порошковую краску электропроводящего наполнителя и последующей их совместной обработкой в планетарной мельнице;
- оптимизировать структуру и свойства покрытий при сохранении исходных физико-механических свойств порошковой краски и придании им принципиально новых функциональных качеств.

#### Методы исследования

В качестве полимерного связующего выбрана порошковая краска ОХТЭК-1 (ООО «Технос-Охтэк», Россия), имеющая высокие антикоррозионные и физико-механические свойства. Наполнителем, обеспечивающим необходимую электропроводность, являлся технический углерод марок П267Э, П-268Э. Объектом исследования служила антистатическая порошковая композиция, нанесенная на подложки, изготовленные из магниевых сплавов МА20, МЛ12, МА2–1, МЛ5.

Обработку порошковых смесей проводили с помощью планетарной мельницы МП 4/0,5 (ООО Техноцентр, г. Рыбинск) при суммарной частоте вращения стаканов 800 об/мин. Технический углерод и порошковая краска в необходимых количествах загружались в планетарную мельницу, где происходила их совместная механическая обработка (МО) в течение 20...80 мин с шагом по времени 10 мин. Влияние времени механической обработки на свойства порошковой смеси оценивали



по данным измерения насыпной плотности. Для просева готовой порошковой композиции с целью удаления образовавшихся в процессе обработки крупных агломератов частиц (рис. 1) использовалось вибросито с ячейей 160 мкм.

Далее проводили ситовый анализ смесей. Для напыления использовали фракцию дисперсностью менее 50 мкм. Изготовленные композиции наносили электростатическим способом с помощью установки «Старт-50» на образцы из магниевых сплавов с оксихроматным подслоем (покрытием). Предварительно с поверхности подложек химическим способом удаляли окисную пленку. Также в качестве подложек для получения сколов и последующего фрактографического анализа покрытий использовали образцы высокоуглеродистой стали. В процессе последующего запекания при температуре 180 °С в течение 15 мин были сформированы покрытия толщиной 50...80 мкм.



Рис. 1. Микроскопическое изображение электропроводящей смеси (МО 40 мин после выдержки в печи полимеризации в течение 3 мин)

Fig. 1. SEM-micrograph of electrically conductive blend (mechanical treatment during 40 min after exposure in a curing oven during 3 min)

Структуру и свойства покрытий исследовали методом растровой электронной микроскопии на приборе Quanta 200 3D. Для анализа морфологии делали поперечный скол покрытий, нанесенных на стальную подложку.

Коррозионные испытания проводили в климатических камерах по режиму УХЛ2 (метод 13 ГОСТ 9.401–91). Климатические испытания проводили следующим образом. Образцы с покрытиями помещали в камеру влажности «Фаэtron» и выдерживали при температуре  $40 \pm 2$  °С и относительной влажности  $98 \pm 2$  % в течение 10 суток. Испытания на воздействие росы или инея с последующим его оттаиванием проводили во влагокамерах «Фаэtron» при относительной влажности  $95 \pm 3$  % по следующим режимам: 2 ч при температуре минус 15 °С, затем 2 ч при температуре +15 °С, что составляло один цикл. Всего образцы были подвергнуты 5 циклам испытаний. Термовакуумные испытания проводили при давлении в камере  $1,3 \cdot 10^{-3}$  Па по таким же режимам.

## Результаты

Структура и свойства порошковых смесей

Целью совместной обработки порошковой краски и технического углерода в планетарной шаровой мельнице является решение проблемы введения максимального количества частиц токопроводящего наполнителя (технического углерода П-267Э, П-268Э) при сохранении удовлетворительных механических свойств покрытия (прежде всего, адгезии). Содержание частиц наполнителя в смеси составляло 10; 12,5; 15 и 20 мас. %. При этом время обработки в планетарной мельнице варьировали, вследствие чего изменялась насыпная плотность исследуемых порошковых смесей (рис. 2, а). Видно, что в результате обработки порошковой смеси в течение 30 минут существенно возросла насыпная плотность от 0,43 до 0,57 г/см<sup>3</sup>. При последующем увеличении времени воздействия насыпная плотность повышалась в значительно меньшей степени (до ~0,6 г/см<sup>3</sup>), что, впрочем, не намного выше, чем при обработке во временном интервале 30–50 минут.

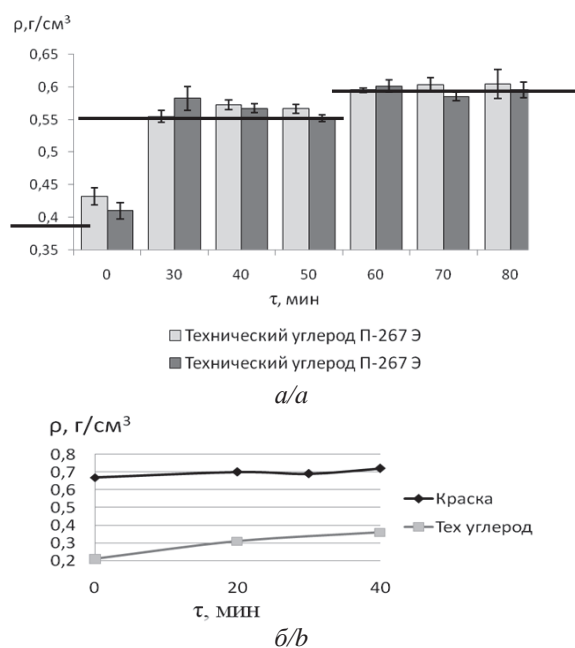


Рис. 2. Зависимость насыпной плотности смеси ПК+ТУ (а) и отдельно краски и ТУ (б) от времени обработки

Fig. 2. Dependence of packing density of «powder paint + Carbon black» mixture (a) and powder paint and Carbon black (b) separately on processing time

Таким образом, для обработки порошковой смеси в планетарной шаровой мельнице можно выделить два интервала времени (30–50 и 60–80 минут), обеспечивающих получение порошков с характерной «средней» насыпной плотностью. На основании данного результата было также выявлено наличие «порогового» значения времени обработки. По нашему мнению, это связано с тем, что происходит уменьшение размеров обрабатываемых

частиц вследствие интенсивных ударно-сдвиговых деформаций.

Заметных отличий между порошковыми смесями, полученными с использованием двух различных марок технического углерода П-267Э от П-268Э, учитывая погрешность измерений, в этом и последующих экспериментах выявлено не было. По этой причине все дальнейшие исследования проводили с использованием в качестве наполнителя только технического углерода марки П267.

На рис. 2, б приведены зависимости насыпной плотности порошковой краски и ТУ при обработке в планетарной мельнице в диапазоне времени 0...40 минут. Видно, что порошковая краска изначально имеет достаточно высокую насыпную плотность ( $>0,65$  г/см<sup>3</sup>), поэтому логичным представляется результат, что этот показатель не очень заметно возрастает по мере увеличения времени последующей механической обработки, достигая 0,72 г/см<sup>3</sup> при 40 минутах воздействия. С другой стороны, технический углерод имеет очень низкую насыпную плотность (0,2 г/см<sup>3</sup>), поэтому при времени обработки в планетарной мельнице 40 минут данная величина возрастает почти в 2 раза (0,37 г/см<sup>3</sup>).

Приведенные данные являются весьма важными для понимания результатов ситового анализа порошковых смесей после обработки в планетарной шаровой мельнице (рис. 3). По представленным на рис. 3 данным можно сделать следующие обобщения:

- 1) Увеличение времени механообработки от 40 до 70 мин не сопровождается существенным изменением размера частиц, что, в целом, согласуется с результатами, представленными на рис. 2.
- 2) В результате МО наблюдается возникновение частиц размером больше 100 мкм, которые отсутствовали в исходных компонентах смеси. Причиной их появления, наиболее вероятно, является агломерирование частиц краски и наполнителя.

3) В результате обработки порошковой смеси в ПШМ количество частиц ТУ размером 71–100 мкм уменьшилось более чем в 8 раз.

4) Дисперсность основной фракции порошковой смеси (около 65 %) – менее 50 мкм, что практически не меняется при увеличении времени МО от 40 до 70 минут.

Таким образом, основным эффектом, наблюдаемым при обработке порошковых смесей, является измельчение частиц ТУ, а количество фракции, пригодной для электростатического напыления, составляет порядка 65 %. Кроме того, повышение времени обработки порошковой смеси выше 40 минут является нецелесообразным, по указанным выше причинам.

Для характеристики порошковой смеси перед ее последующим электростатическим напылением проведены ее исследования на растровом электронном микроскопе (рис. 4). Прежде всего, следует отметить, что исходная порошковая краска является неэлектропроводящей, поэтому наблюдать ее в колонне РЭМ без напыления тонкого проводящего слоя (с целью обеспечения его электропроводности, что является неотъемлемым условием его наблюдения в электронном микроскопе) не представляется возможным. После совместной обработки смеси краски и техуглерода в нанесении проводящей пленки необходимости не возникало, что связано именно с обретением свойств электропроводности.

На рис. 4 показаны частицы смеси после их просеивания через сито с ячейей  $< 71$  мкм. Видно, что порошковая смесь содержит агрегаты округлой формы со средним размером 70...50 мкм. Напомним, что высокий контраст на микрофотографиях свидетельствует об отсутствии накопления заряда на частицах порошковой смеси, что подтверждает придание смеси свойств электропроводности. Дополнительно были проведены измерения электросопротивления порошковой смеси до на-

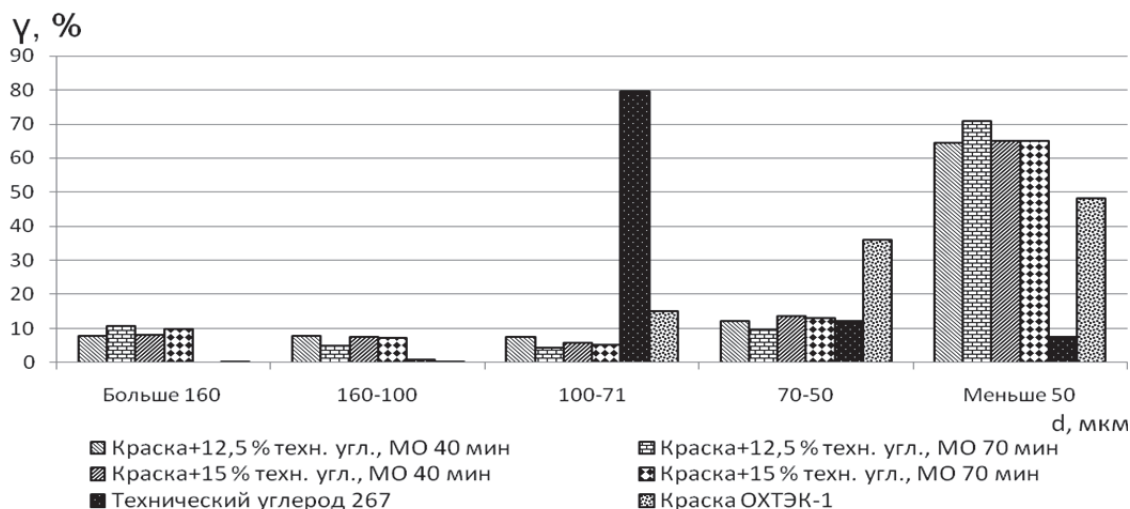


Рис. 3. Распределение частиц порошковых смесей по размеру на основе данных ситового анализа

Fig. 3. Size distribution of powder paint particles based on sieving test data

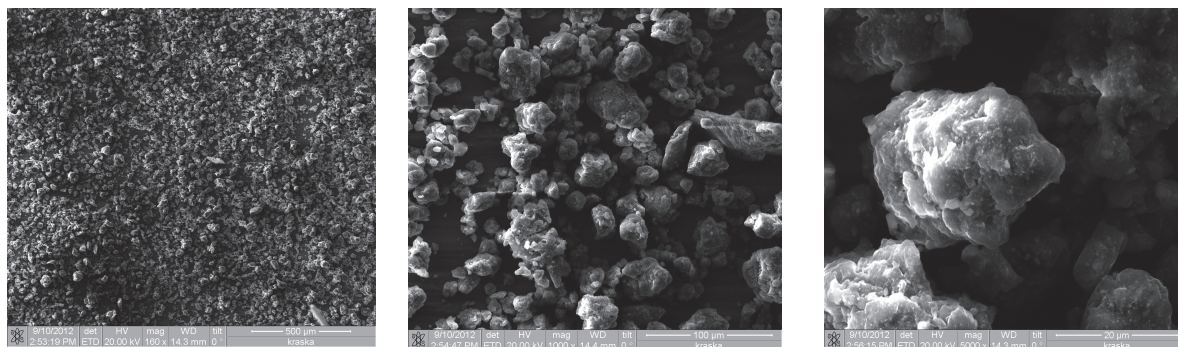


Рис. 4. Электронно-микроскопические изображения, полученные при различных увеличениях, смеси порошковой краски и 15 мас. % ТУ, подвергнутой механообработке в течение 40 минут

Fig. 4. Scanning electron microscope micrographs obtained at different magnification for the mixture of powder paint and 15 wt. % of carbon black which was mechanically treated during 40 minutes

пыления, показавшие, что его величина составляет единицы МОм. По нашему мнению это связано с тем, что близкого контакта между порошинками в свободно насыпанном состоянии нет. С другой стороны, сопротивление порошка технического углерода не превышало единиц Ом. Таким образом, последующее сравнение свойств напыленных покрытий проводили с учетом представленных данных о насыпной плотности и электросопротивлении порошковых смесей.

#### Структура и свойства покрытий

Из приготовленных и обработанных в ПШМ порошковых смесей были отсеяны три фракции (71...100 мкм, 50...71 мкм и менее 50 мкм), которые напыляли на подложки из магния и высокоуглеродистой стали. Степень придания покрытиям функциональных свойств оценивали путем измерения удельного объемного электрического сопротивления (УОЭС, рис. 5). Анализ полученных результатов показал, что:

- при любом содержании ТУ (в использованном в работе диапазоне) снижение размера фракции приводит к уменьшению сопротивления, причем эта зависимость имеет нелинейный характер;
- увеличение времени обработки порошковой смеси от 0 до 70 мин значительно повышает величину сопротивления для всех трех приведенных на диаграмме размеров фракций. Причем покрытие, сформированное из смеси ПК и ТУ, не подвергавшейся обработке в ПШМ, имеет УОЭС порядка 2 Ом м, в то время как обработка в мельнице в течение 40 минут повышает этот параметр до 70 Ом м, а при 70 минутах МО – уже 470 Ом м (для фракции, содержащей 15 мас. % ТУ, рис. 5);
- повышение содержания ТУ в покрытии (порошковой смеси, использовавшейся для напыления) приводит к увеличению проводимости;
- уровень удельного сопротивления, являющийся приемлемым с точки зрения удовлетворительного выполнения антистатической функций покрытия, обеспечивается либо использо-

ванием самой мелкой фракции (менее 50 мкм), либо повышением содержания ТУ.

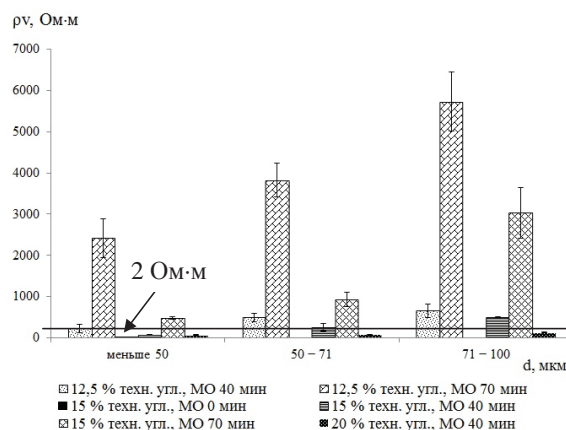


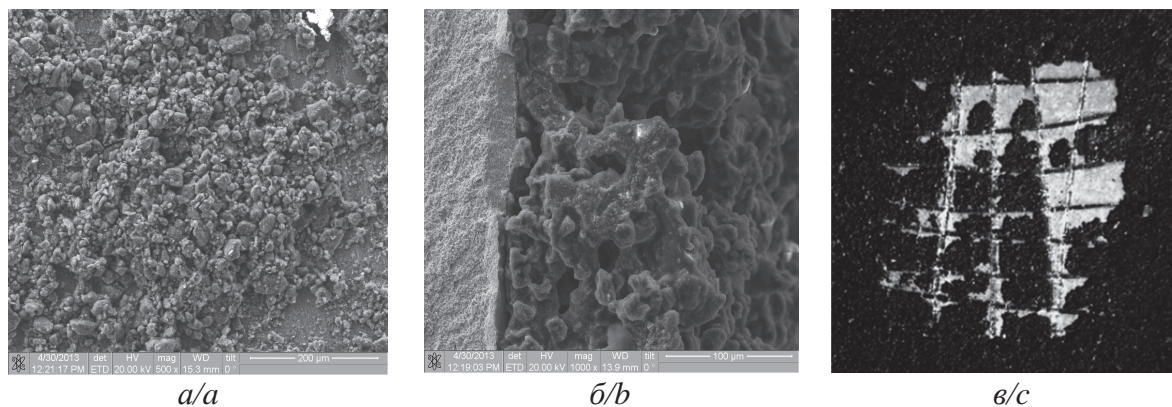
Рис. 5. Удельное объемное электрическое сопротивление покрытий

Fig. 5. Specific bulk resistance of coatings

Поскольку покрытие на основе смеси ПК и ТУ (не подвергнутое механообработке в ПШМ) обладает минимальным сопротивлением, казалось бы, следует использовать именно его для формирования антистатических покрытий. Однако измерение адгезии такого покрытия к подложке из высокоуглеродистой стали показало, что необработанная в планетарной мельнице порошковая смесь имеет неудовлетворительный уровень адгезии (рис. 6, в). Более того, такое покрытие характеризуется высокой пористостью, что также неприемлемо для выполнения защитных функций. Таким образом, порошковая смесь для нанесения защитного антистатического покрытия должна подвергаться МО, а содержание ТУ следует подбирать исходя из уровня электропроводности, и характера формирующейся структуры. С этой целью были проведены исследования покрытий с помощью растрового электронного микроскопа (рис. 7).

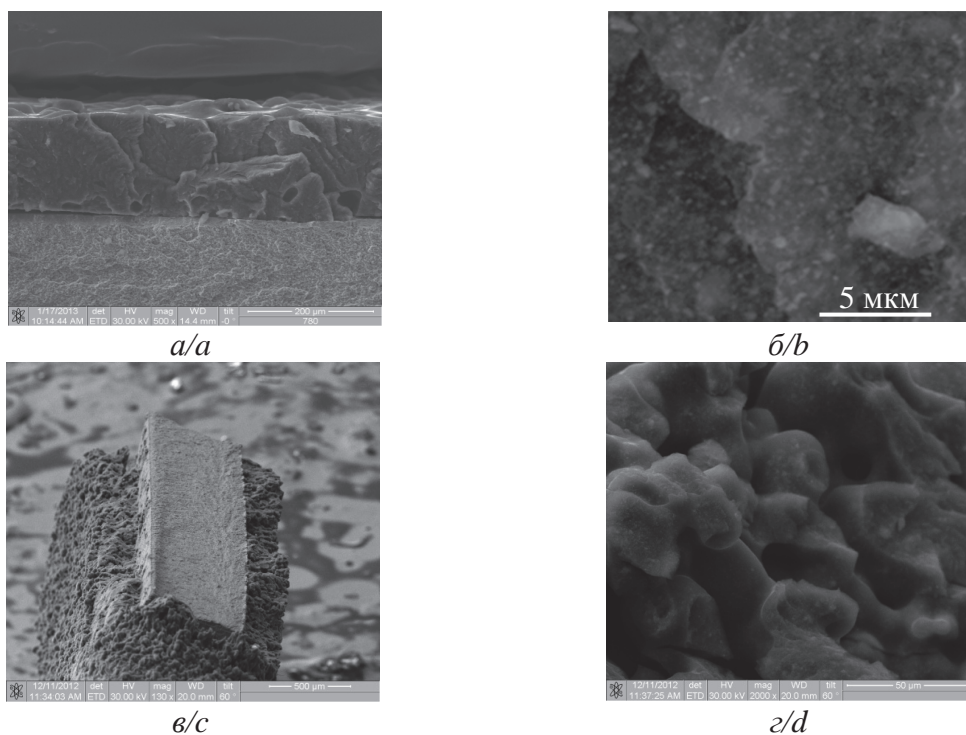
Несмотря на то, что увеличение содержания технического углерода в порошковой смеси (рис. 5) положительно влияет на электропроводность покрытий, повышение содержания ТУ сни-





**Рис. 6.** РЭМ-изображения: порошковой смеси до напыления (а) и скола покрытия (б); и внешнего вида фрагмента покрытия, подвергнувшегося измерению адгезии методом решетчатого надреза (в); содержание ТУ – 15 мас. %; смесь не подвергалась обработке в ПШМ

**Fig. 6.** SEM-micrographs of: powder mixture before spraying (a) and coating spall (b); and appearance of coating fragment which was subjected to adhesion testing by the cross-cut method (c); Carbon black weight fraction was 15 %; the mixture was not treated in the Planetary ball mill



**Рис. 7.** Микроизображение скола покрытия с содержанием технического углерода (%): а, б) 12,5; в, г) 20; а, в) общий вид; б, г) структура

**Fig. 7.** SEM-micrographs illustrating the spalling of coating containing carbon black: a, b) 12,5 wt. %; c, d) 20 wt. %; a, c) general view; b, d) structure

жает однородность покрытия и сопровождается повышением его пористости (рис. 7). Это может быть связано с тем, что наличие ТУ препятствует равномерному пленкообразованию (рис. 7, в, г). Таким образом, более однородной структурой, минимальной пористостью (рис. 7, а, в) при приемлемом уровне электропроводности обладает покрытие на основе порошковой смеси, содержащей 12,5 мас. % технического углерода.

Проведено сравнение средней толщины покрытий, сформированных из порошковых смесей, под-

вергнутой обработке в ПШМ в течение 40 и 70 минут. Показано, что при времени совместной механической обработки порошковой краски и технического углерода 40 мин толщина покрытия составляла 68...83 мкм, в то время как при времени 70 мин она уменьшалась до 40...52 мкм. Это подтверждает полученные выше результаты о том, что растекание по подложке более мелкодисперсного порошка приводит к снижению толщины покрытия.

Далее были проведены климатические испытания покрытий, нанесенных из смеси, содержащей



12,5 % ТУ и обработанной в ПШМ в течение 40 минут. Показано, что при соблюдении регламентированного режима напыления и толщине покрытия не менее 68 мкм признаков развития коррозии не наблюдалось. С другой стороны, дополнительно проведенные испытания магниевых образцов с покрытием, содержащим 20 мас. % ТУ, по той же программе, показали наличие в них признаков коррозии.

#### Выводы

1. В результате комплекса испытаний, имитирующих различные атмосферные и механические воздействия, установлено, что разработанное покрытие с содержанием технического углерода 12,5 % и времени механообработки порошковой смеси в планетарной мельнице

40 минут обеспечивает формирование пленки покрытия толщиной 70 мкм, обладающего удовлетворительными функциональными и защитными свойствами.

2. Предложенный способ формирования покрытий на деталях из магниевых сплавов, сочетающий введение электропроводящего наполнителя, обработку порошковой смеси в планетарной шаровой мельнице и электростатическое напыление, может использоваться для снятия статического электричества с корпусов аппаратуры космических аппаратов, работающих в условиях открытого космоса.

*Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 13-08-98068. Авторы выражают благодарность сотрудникам ИФПМ СО РАН Л.Р. Ивановой и М.А. Полтарину за помощь в подготовке порошковых смесей.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч.-техн. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»)*. – М.: ВИАМ, 2012. – С. 7–17.
2. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч.-техн. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»)*. – М.: ВИАМ, 2012. – С. 157–167.
3. Корнышева И.С., Волкова Е.Ф., Гончаренко Е.С., Мухина И.Ю. Перспективы применения магниевых и литейных алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч.-техн. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»)*. – М.: ВИАМ, 2012. – С. 212–222.
4. Howell D.M. Powder coatings: The technology, formulation and application of powder coatings. –New York, John Wiley and Sons, 2000. – 361 p.
5. Брок Т., Гротеклаус М., Мишке П. Европейское руководство по лакокрасочным материалам и покрытиям. – М.: ООО «Пэйнт-Медиа», 2007. – 548 с.
6. Streitberger H.J., Dossel K.F. Automotive Paints and Coatings. – Weinheim, WILEY, 2008. – 493 p.
7. Brown L.W., Raghavan S., McGinnis A., Leal J.A. Electrostatic powder coating of electrically non-conducting substrates. Patent US, no. 6,270.853, 2001.
8. Gottschling P., Stacyra Z., Strid M. Antistatic powder coating compositions and their use. Patent US, no. 6,743.379, 2004.
9. Эпоксидные порошковые композиции с силикатными наночастицами различной морфологии / Г.В. Ваганов, В.Е. Юдин, Л.Н. Машляковский, Н.З. Евтюков, В.Ю. Елоховский, Е.М. Иванькова // *Лакокрасочные материалы и их применение*. – 2011. – № 11. – С. 37–41.
10. Corrosion protection of carbon steel by epoxy resin containing organically modified clay / T.X. Hang, T.A. True, T.H. Nam et al. // *Surface and Coating Technology*. – 2007. – V. 201. – № 16–17. – P. 7408–7415.
11. Kowalczyk K. Epoxy coatings with modified montmorillonites // *Progress in Organic Coatings*. – 2008. – V. 62. – № 4. – P. 425–429.
12. Стокозенко В.Н. Нанотехнологии сегодня и завтра // *Промышленная окраска*. – 2006. – № 3. – С. 22–25.
13. Порошковые краски. Технология покрытий / пер. с англ. под ред. проф. А.Д. Яковлева. – СПб.: Химиздат, 2001. – 256 с.
14. Толмачева Д. Порошковые краски с металлическим эффектом. Особенности производства // *Промышленная окраска*. – 2011. – № 2. – С. 33–34.
15. Матковский П.Е. и др. Термопластичные композиционные материалы // *Энциклопедия инженера-химика*. – 2011. – № 6. – С. 49–57.
16. Промышленные полимерные композиционные материалы / под ред. М. Ричардсона; пер. с англ. под ред. П.Г. Бабаевского. – М.: Химия, 1980. – 472 с.
17. Кац Г.С., Милевски Д.В. Наполнители для полимерных композиционных материалов. – М.: Химия, 1981. – 736 с.
18. Щибря Н.Г. и др. Антистатические декоративные покрытия на основе порошкового покрытия // *Лакокрасочные материалы и их применение*. – 1996. – № 12. – С. 19–20.
19. Гуль В.Е., Шенфиль Л.З. Электропроводящие полимерные композиции. – М.: Химия, 1985. – 240 с.
20. Смесь для антистатического порошкового покрытия и покрытия на ее основе: пат. Рос. Федерация. № 2228939; заявл. 01.12.2000; опубл. 10.01.2004, Бюл. № 20. – 76 с.

*Поступила 06.03.2014 г.*

UDC 537.855

## ANTISTATIC COMPOSITE COATINGS FOR PROTECTING MAGNESIUM ALLOYS BASED ON POWDER PAINTS PROCESSED IN A PLANETARY BALL MILL

**Sergey Yu. Yazykov,**

Scientific production center «Polyus», 56 b, Kirov avenue, Tomsk, 634041, Russia. E-mail: yazykov.sergey@gmail.com

**Vladislav Kh. Dammer,**

Cand. Sc., Scientific production center «Polyus», 56 b, Kirov avenue, Tomsk, 634041, Russia. E-mail: yazykov.sergey@gmail.com

**Sergey V. Panin,**

Dr. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia; Institute of Strength Physics and Materials Sciences of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2/4, Akademicheskii avenue, Tomsk, 634055, Russia. E-mail: svp@ispms.tsc.ru

**Boris B. Ovechkin,**

Cand. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: ovechkin@tpu.ru

*The authors have studied possibility of providing electrical conductivity properties to the coating based on powder paints by processing in a planetary ball mill. Changing the duration the mechanical activation as well as the weight fraction of the filler, the properties of powder mixtures were investigated as well as a structure and properties of coatings which functionality is achieved by adding the conductive filler into powder paint and their subsequent joint treatment in planetary ball mill.*

**The main aim of the study** is to optimize the structure and properties of composite coatings while keeping initial physical and mechanical properties of powder paint and providing novel functional ones.

**The methods used in the study.** Processing of powder mixtures was carried out by employing planetary ball mill MP 4/0,5 (Techno-center Ltd., Rybinsk) with the total frequency of steel bowls rotation of 800 rpm. Carbon black and powder paint in necessary weight fractions were loaded into the bowls where their joint mechanical activation took place for 20...80 minutes with increment of the treatment time of 10 min. Mechanical activation time influence on powder mixture properties was evaluated by packing density measurement data.

**The results.** During the complex tests it was found that a designed mixture with the weight fraction of carbon black of 12,5 wt. % and the time of the mechanical activation in the planetary ball mill of 40 minutes provides the formation of a coating film with the thickness of 70 μm having satisfactory functional and protective properties. It is shown that the proposed method of deposition functional coating on the parts of magnesium alloys including adding of conductive filler, powder mixture treatment in the planetary ball mill and electrostatic spraying, may be used to sink static electricity from the spacecraft bodies operating in open space.

### Key words:

Powder coating, Carbon black, electroconductivity, Planetary ball mill, protective coating.

*The study was supported by RFBR grant № 13–08–98068. Authors appreciate L.R. Ivanova and M.A. Poltaranin, the employees of Institute of Strength Physics and Materials Sciences of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences for assistance in powder coating preparation.*

### REFERENCES

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tekhnologiy ikh pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of developing materials and technologies of their processing up to 2030]. *Aviatsyonnye materialy i tekhnologii: Yubileyny nauchno-tekhnicheskii sbornik (prilozhenie k zhurnaly Aviatsyonnye materialy i tekhnologii)* [Aircraft Materials and Technologies. Jubilee Scientific-technical collection of papers (supplement to the journal «Aviation Materials and Technologies»)]. Moscow, VIAM Publ., 2012. pp. 7–17.
2. Antipov V.V. Strategiya razvitiya titanovykh, magniemykh, berilievyykh i aluminievyykh spлавov [The strategy of developing titanium, magnesium, beryllium and aluminum alloys]. *Aviatsyonnye materialy i tekhnologii: Yubileyny nauchno-tekhnicheskii sbornik (prilozhenie k zhurnaly Aviatsyonnye materialy i tekhnologii)* [Aircraft Materials and Technologies. Jubilee Scientific-technical collection of papers (supplement to the journal «Aviation Materials and Technologies»)]. Moscow, VIAM Publ., 2012. pp. 157–167.
3. Kornysheva I.S., Volkova E.F., Goncharenko E.S., Mukhina I.Yu. Perspektivy primeneniya magniemykh i liteynykh aluminievyykh spлавov [Prospects of application of magnesium and aluminum casting alloys] *Aviatsyonnye materialy i tekhnologii: Yubileyny nauchno-tekhnicheskii sbornik (prilozhenie k zhurnaly Aviatsyonnye materialy i tekhnologii)* [Aircraft Materials and Technologies. Jubilee Scientific-technical collection of papers (supplement to the journal «Aviation Materials and Technologies»)]. Moscow, VIAM Publ., 2012. pp. 212–222.
4. Howell D.M. *Powder coatings: The technology, formulation and application of powder coatings*. New Yourk, John Wiley and Sons, 2000. 361 p.

5. Brock T., Groteklaus M., Mishke P. *Evropeyskoe rukovodstvo po lakokrasochnym materialam i pokrytiyam* [European Guidelines for paints and coatings]. Moscow, Paint- Media publ., 2007. 548 p.
6. Streitberger H.J., Dossel K.F. *Automotive Paints and Coatings*. Weinheim, WILEY, 2008. 493 p.
7. Brown L.W., Raghavan S., McGinnis A., Leal J.A. *Electrostatic powder coating of electrically non-conducting substrates*. Patent US, no. 6,270.853, 2001.
8. Gottschling P., Stacyra Z., Strid M. *Antistatic powder coating compositions and their use*. Patent US, no. 6,743.379, 2004.
9. Vaganov G.V., Yudin V.E., Mashlyakovskiy L.N., Evtyukov N.Z., Elokhevskii V.Yu., Ivankova E.M. Epoksidnye poroshkovye kompozitsii s silikatnymi nanochastitsami razlichnoy morfologii [Epoxy powder compositions with silicate nanoparticles with different morphologies]. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye – Painting materials and their application*, 2011, no. 11, pp. 37–41.
10. Hang T.X., True T.A., Nam T.H. Corrosion protection of carbon steel by epoxy resin containing organically modified clay. *Surface and Coating Technology*, 2007, vol. 201, no. 16–17, pp. 7408–7415
11. Kowalczyk K. Epoxy coatings with modified montmorillonites. *Progress in Organic Coatings*, 2008, Vol. 62, no. 4, pp. 425–429.
12. Stokozenko V.N. Nanotekhnologii segodnya i zavtra. [Nanotechnology today and tomorrow]. *Promyshlennaya okraska – Industrial painting*, 2006, no. 3, pp. 22–25.
13. *Poroshkovye kraski. Tekhnologiya pokrytiy* [Powder paints. Coating technology] Translated from English. Ed. prof. A.D. Yakovlev. St. Petersburg, Himizdat Publ., 2001. 256 p.
14. Tolmacheva D. Poroshkovye kraski s metallicheskim efektom. Osobennosti proizvodstva [Powder coatings with metallic effect. Features of production]. *Promyshlennaya okraska – Industrial painting*, 2011, no. 2, pp. 33–34.
15. Matkovskiy P.E. Termoplastichnye kompozitsionnye materialy [Thermoplastic composite materials]. *Entsiklopediya inzhenera khimika – Encyclopedia of Chemical Engineering*, 2011, no. 6, pp. 49–57.
16. *Promyshlennyye polimernyye kompozitsionnye materialy* [Industrial Polymer composites]. Ed. M. Richardson. Translated from English with edition of P.G. Babaevskii. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 472 p.
17. Kats G.S., Milewski D.B. *Napolniteli dlya polimernykh kompozitsionnykh materialov* [Fillers for polymeric composite materials]. Moscow, Khimiya Publ., 1981. 736 p.
18. Shchibrya N.G. Antistaticheskie dekorativnye pokrytiya na osnove poroshkovogo pokrytiya [Antistatic decorative coatings based on powder coating]. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye – Paint materials and their application*, 1996, no. 12, pp. 19–20.
19. Gul V.E., Shenfil L.Z. *Elektroprovodyashchie polimernyye kompozitsii* [Conductive polymeric compositions]. Moscow, Khimiya Publ., 1985. 240 p.
20. Gottshling P., Stachira Z. *Smes dlya antistaticheskogo poroshkovogo pokrytiya i pokrytiya na ee osnove* [Mixture for powder coating and antistatic coatings based on it]. Patent RF, no. 2228939, 2004.

Received: 06 March 2014.

УДК 621.325

## ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИК В ТЕХНОЛОГИИ НАНОГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР

**Марончук Игорь Игоревич,**

канд. техн. наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией прикладной физики и нанотехнологий в энергетике Севастопольского института ядерной энергии и промышленности, Россия, 299033, г. Севастополь, ул. Курчатова, 7. E-mail: igimar@mail.ru

**Марончук Игорь Евгеньевич,**

д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотр. научно-исследовательской лаборатории прикладной физики и нанотехнологий в энергетике Севастопольского института ядерной энергии и промышленности, Россия, 299033, г. Севастополь, ул. Курчатова, 7. E-mail: igimar@mail.ru

**Кулюткина Тамара Фатыховна,**

канд. техн. наук, доцент, ст. науч. сотр. научно-исследовательской лаборатории прикладной физики и нанотехнологий в энергетике Севастопольского института ядерной энергии и промышленности, Россия, 299033, г. Севастополь, ул. Курчатова, 7. E-mail: fizlab@simp.com.ua

Актуальность работы обусловлена необходимостью получения наногетероэпитаксиальных структур с квантовыми точками для разработки и создания производства высокоэффективных приборов полупроводниковой энергетики.

**Цель работы:** выяснение причины образования широкозонного полупроводникового материала из узкозонного при выращивании его в виде квантовых точек, а также исследование возможности применения фазового перехода металл-полупроводник для получения материала, который в виде квантовых точек соответствует узкозонному полупроводнику.

**Методы исследования:** выращивание наногетероэпитаксиальных структур с квантовыми точками осуществляли методом жидкофазной эпитаксии с импульсным охлаждением подложки; свойства полученных структур изучали исследованием спектров их фотолюминесценции снятых с образцов с помощью набора спектральной аппаратуры на базе двух монохроматоров МДР-41.

**Результаты:** Выявлено, что изменение ширины запрещенной зоны InAs в квантовой точке, по сравнению с объемным материалом InAs, обусловлено размерами квантовых точек, величина которых зависит от разности постоянных решеток матричного материала и материала квантовой точки. В наногетероэпитаксиальных структурах с квантовыми точками из металла (иттербия) реализуется фазовый переход металл-полупроводник. Ширина запрещенной зоны полупроводника, образующегося при этом, определяется температурой выращивания. Применение фазового перехода металл-полупроводник позволяет получать в одном технологическом процессе многослойные наногетероэпитаксиальные структуры с массивами квантовых точек, имеющими различные значения ширины запрещенной зоны.

### Ключевые слова:

Фазовый переход, металл-полупроводник, иттербий, жидкофазная эпитаксия, наногетероэпитаксиальные структуры, квантовые точки.

### Введение

Наногетероэпитаксиальные структуры (НГЭС) с квантовыми точками (КТ) открывают новые возможности в разработках и создании производства высокоэффективных приборов электроники и полупроводниковой энергетики. Так, например, использование НГЭС КТ для изготовления полупроводниковых лазеров позволяет уменьшить плотность их порогового тока с 400 до 10 А/см<sup>2</sup> [1]. Однако попытки создания высокоэффективных солнечных элементов на основе НГЭС КТ встретились с проблемой, обусловленной образованием напряженного «смачивающего» слоя между КТ, расположенными в одном массиве [2, 3].

Эта проблема выявилась при получении НГЭС КТ из газовой фазы в процессе прецизионных нанотехнологий, основанных на пиролизе металлоорганических соединений и гидридов (МОС-ги-

дريدной технологии) и в молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), которые нашли широкое применение не только в научно-исследовательских работах, но и в промышленном производстве при получении различных НГЭС с квантовыми ямами (КЯ) [4, 5]. В этих технологиях используют полупроводниковые материалы с одинаковыми постоянными решеток, но с различными значениями ширины запрещенной зоны [6].

К основным требованиям при получении НГЭС КТ относится использование материалов с различными значениями постоянной решетки для КТ и для спейсерных слоев (матричного материала) [7]. В начальной стадии формирования НГЭС КТ на поверхности матричного материала образуется псевдоаморфный слой материала КТ, а затем формируется массив монокристаллических КТ. Параллельно с формированием КТ, в промежутке между ни-



ми, образуется напряженный слой из материала КТ, который называется «смачивающим» слоем [8]. Наличие «смачивающего» слоя в солнечных элементах, созданных на основе НГЭС КТ, приводит к уменьшению эффективности преобразования солнечного излучения, что связывается с рекомбинацией носителей заряда в механически напряженных «смачивающих» слоях, расположенных между КТ [2].

НГЭС с «идеальными» квантовыми точками (ИКТ), между которыми отсутствует область напряженного «смачивающего» слоя, выращиваются при постоянной температуре в процессе жидкофазной эпитаксии методом импульсного охлаждения и нагревания подложки (ЖФЭ ИОНП) [9–12].

Особый интерес представляют НГЭС на основе широкозонных полупроводниковых соединений III-V с КТ узкозонного материала, утилизирующего ИК-диапазон спектра излучения. В качестве такого узкозонного материала принято использовать InAs, ширина запрещенной зоны которого  $E_g=0,36$  эВ при  $T=300$  К. Однако максимум фотолюминесценции (ФЛ) массивов КТ из InAs при  $T=300$  К в НГЭС на основе GaAs соответствует  $E_g=1,14$  эВ [13], а на основе GaP  $E_g=1,5$  эВ [14].

#### Постановка задачи

Целью работы является выяснение причины образования широкозонного полупроводникового материала из узкозонного при выращивании его в виде КТ, а также исследование возможности применения фазового перехода металл–полупроводник для получения материала, который в виде КТ соответствует узкозонному полупроводнику.

#### Основные материалы и результаты исследования

Выращивание НГЭС ИКТ осуществлялось из растворов кристаллизуемых материалов в расплаве олова при температуре 400...450 °С методом ЖФЭ ИОНП [9]. В качестве материалов кристаллических подложек, буферных и спейсерных слоев, зарастающих массивы КТ, использовался GaAs или GaP. Массивы КТ выращивались из InAs и из иттербия (Yb).

В табл. 1 приведены параметры кристаллизуемых материалов: ширина запрещенной зоны  $E_g$  и размер постоянных решеток  $a_2$  при комнатной температуре (300 К), линейные коэффициенты теплового расширения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  при температуре формирования НГЭС КТ 700 К и комнатной темпера-

туре (300 К) соответственно, рассчитанные значения постоянной решетки  $a_1$  при температуре формирования НГЭС КТ 700 К, абсолютные значения  $\Delta a=a_1-a_2$ , при температурах формирования НГЭС КТ 600, 700 и 800 К и относительные изменения  $\Delta a/a_2$  при 700 К.

Значения постоянной решетки  $a_1$  рассчитывали с использованием выражения:

$$a_1 = \frac{a_2}{\tilde{\alpha} \cdot (T_2 - T_1) + 1}, \quad (1)$$

где  $T_2$  – температура формирования НГЭС КТ,  $T_1$  – комнатная температура (в расчетах использовали значение 300 К);  $\tilde{\alpha}$  – среднее значение коэффициента теплового расширения;  $a_2$  – размер постоянных решеток при комнатной (300 К) температуре.

Выражение (1) было получено при помощи выражения:

$$\tilde{\alpha} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} = \frac{1}{a_1} \cdot \frac{\Delta a}{(T_2 - T_1)},$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты теплового расширения при температуре формирования НГЭС КТ и комнатной соответственно.

Основными характеристиками при формировании НГЭС ИКТ являются постоянные решеток и коэффициенты теплового расширения используемых материалов. Так, период нониуса совершенного строения  $P$ , сопрягающихся материалов [15], определяется выражением [16]:

$$P \cdot a = (P+1) \cdot b,$$

где  $a$  и  $b$  – постоянные решеток этих материалов.

При  $a=a_{1,\text{InAs}}$ ,  $b=a_{1,\text{GaAs}}$  или  $b=a_{1,\text{GaP}}$  (табл. 1) период нониуса совершенного строения в НГЭС на основе GaAs составляет 15 позиций GaAs и 14 позиций InAs, а в НГЭС на основе GaP соответственно 10 позиций GaP и 9 позиций InAs.

Так как постоянная решетки InAs больше постоянной решетки матричного материала (GaAs и GaP), зарождение КТ InAs происходит там, где имеется максимальное расстояние между атомами кристаллизуемого слоя, т. е. в середине периода нониуса совершенства. При этом размер области оптимальной для формирования КТ InAs больше на матричном материале GaAs, чем на GaP, и поэтому размер КТ InAs на GaAs больше, чем на GaP. Чем больше размер КТ, тем меньше его параметры отличаются от параметров объемного материала. Это относится и к размерам постоянной решетки КТ.

Таблица 1. Параметры кристаллизуемых материалов

Таблица 1. Параметры кристаллизуемых материалов

Материалы	$E_g$	$a_2$	$\alpha_2 \cdot 10^6$	$\alpha_1 \cdot 10^6$	$a_1$	$\Delta a$ при $T_2$			$\Delta a/a_2$
						при 700 К			
	(эВ)	(?)	(К <sup>-1</sup> )	(К <sup>-1</sup> )	(Å)	600 К	700 К	800 К	(%)
InAs	0,36	6,0584	4,41	5,82	6,0702	0,0055	0,0118	0,0156	0,195
GaAs	1,42	5,6531	5,82	7,2	5,6667	0,0098	0,0136	0,0187	0,24
GaP	2,26	5,4505	5,6	6,0	5,4632	0,0094	0,0127	0,0158	0,232
Yb	Металл $E_g=0$	5,483	24,4	31,6	5,5451	0,0442	0,0621	0,0844	1,12

Из табл. 1 следует, что при охлаждении в интервале температур  $\Delta T=300-700$  К постоянные решетки полупроводниковых материалов InAs, GaAs и GaP уменьшаются примерно на одну и ту же величину, соответственно, на 0,2, 0,23, 0,24 %. Это свидетельствует о том, что влияние теплового коэффициента расширения InAs, GaAs и GaP при формировании НГЭС ИКТ на их основе не является существенным, а наблюдаемое различие их спектров ФЛ обусловлено различием размеров постоянных решеток.

При выращивании КТ из Yb в НГЭС на основе GaAs период нониуса совершенства составил 45 позиций GaAs и 46 позиций Yb, а при выращивании КТ из Yb в НГЭС на основе GaP период нониуса совершенства составил 67 позиций GaP и 66 позиций Yb. Наблюдаемое различие размеров нониусов совершенства и количества позиций в этих структурах обусловлено тем, что величина постоянной решетки Yb больше величины постоянной решетки GaP, но меньше величины постоянной решетки GaAs.

Как следует из табл. 1, при снижении температуры в интервале  $\Delta T=300-700$  К наблюдается уменьшение постоянной решетки Yb в КТ более чем в 4,5 раза по сравнению с уменьшением постоянных решеток окружающих его материалов GaAs и GaP. Это приводит к образованию отрицательного давления в НГЭС, под действием которого в КТ Yb может осуществляться фазовый переход металл-полупроводник.

Как писал Н.Ф. Мотт: «...любой переход металл-изолятор... должен быть переходом от состояния, когда энергетические полосы перекрываются, к состояниям, когда перекрытия нет... При больших  $a$  вещество должно быть изолятором, а при малых  $a$  вещество будет металлом... Опыт показывает, что при плотностях ниже  $5 \text{ г/см}^3$  ртуть становится полупроводником... Ширина запрещенной зоны должна изменяться как  $(a-a_0)$ , где  $a_0$  – величина постоянной решетки после превращения,  $a$  – до превращения металла в полупроводник» [17]. В нашем случае рассматриваем  $a=a_1$  – постоянная решетки при 700 К, а  $a_0=a_2$  – постоянная решетки при 300 К.

Известно [18], что полупроводниковый кремний, имеющий при  $T=300$  К постоянную решетки  $a=5,4304 \text{ \AA}$  и ширину запрещенной зоны  $E_g=1,1$  эВ, под давлением 12...15 ГПа становится металлическим кремнием, который при  $T \leq 6,7$  К переходит в сверхпроводящее состояние. Это обусловлено тем, что при таких давлениях постоянная решетки кремния существенно уменьшается и величина его запрещенной зоны становится равной нулю.

Естественно, что если металл будет подвержен отрицательному давлению, то у него может образоваться запрещенная зона и он становится полупроводником или диэлектриком, в соответствии с фазовым переходом металл-полупроводник [17, 19]. При наличии отрицательного давления в металлических квантовых точках (МКТ) следует ожидать

образования полупроводниковых свойств. Так как МКТ имеют наноразмерную величину, то фазовый переход металл-полупроводник может реализоваться при отрицательных давлениях, величина которых будет существенно ниже, чем при фазовом переходе в объемных металлах.

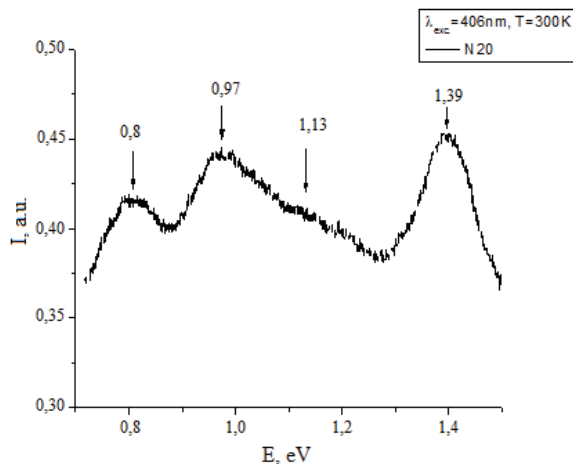


Рис. 1. НГЭС на основе GaAs с МКТ Yb

Fig. 1. Nanoheteroepitaxial structures based on GaAs with metal quantum dots Yb

На рис. 1 представлен спектр ФЛ  $p-n$  структуры НГЭС КТ, которая была выращена на подложке GaAs  $n$ -типа проводимости при температуре  $T_2=730$  К. Как в  $n$ -, так и в  $p$ -областях эта структура содержала 6 массивов КТ Yb, зарощенных спейсерными слоями InAs, и выращенный на поверхности подконтактного слоя GaAs  $p$ -типа проводимости массив КТ Yb. Максимумы ФЛ этой структуры соответствовали: при  $E=1,39$  эВ излучению GaAs, при  $E=1,13$  эВ и  $E=0,97$  эВ излучению спейсерных слоев InAs в  $n$ - и  $p$ -областях структуры, максимум при  $E=0,8$  эВ соответствует КТ Yb, который в результате фазового перехода из металла превратился в полупроводник с шириной запрещенной зоны  $E_g=0,8$  эВ.

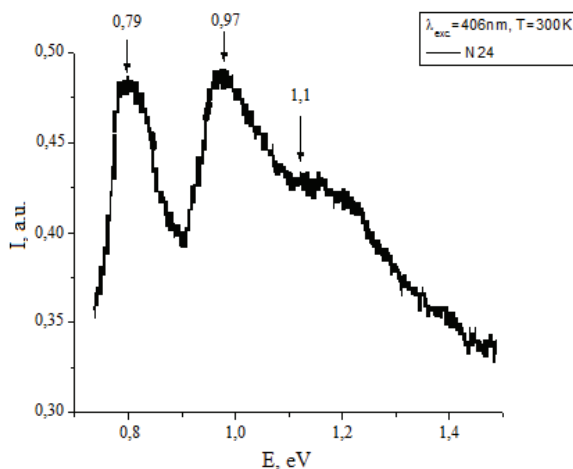


Рис. 2. НГЭС на основе GaP с МКТ Yb

Fig. 2. Nanoheteroepitaxial structures based on GaP with metal quantum dots Yb

На рис. 2 представлен спектр ФЛ *p-n* структуры НГЭС КТ, выращенной при температуре  $T_2=730$  К на подложке GaP, которая содержит, как в *n*-, так и в *p*-областях по 6 массивов КТ из InAs, зарощенных спейсерными слоями GaP, и подконтактный слой GaP *p*-типа проводимости, на поверхности которого выращен массив КТ из иттербия. Максимумы ФЛ этой структуры переместились примерно на 0,01 эВ в ИК-диапазон длин волн по сравнению с аналогичными максимумами в спектре структуры, выращенной на GaAs (рис. 1).

В соответствии с табл. 1 в НГЭС на основе GaAs, сформированной при  $T_2=700$  К и содержащей КТ из Yb, при охлаждении до  $T_1=300$  К, постоянная решетки КТ Yb сокращается на  $\Delta a_{Yb}=0,0621$  Å, а размер постоянной решетки спейсерного слоя GaAs при этом сокращается на  $\Delta a_{GaAs}=0,0136$  Å (табл. 1). Таким образом, постоянные решеток КТ из Yb и спейсерного слоя GaAs испытывают отрицательное давление, которому соответствует суммарная величина сокращений постоянных решеток Yb и GaAs:  $\Delta a_{Yb,GaAs}=\Delta a_{Yb}+\Delta a_{GaAs}=0,0757$  Å (табл. 2).

**Таблица 2.** Величины суммарных сокращений постоянных решеток

**Таблица 2.** Величины суммарных сокращений постоянных решеток

Температура (Т, К)	$\Delta a_{InAs}^+$	$\Delta a_{InAs}^+$	$\Delta a_{InAs,GaAs}^-$	$\Delta a_{Yb}^+$	$\Delta a_{Yb}^+$	$\Delta a_{Yb,GaAs}^-$
	$\Delta a_{GaAs}$	$\Delta a_{GaP}$	$\Delta a_{InAs,GaP}$	$\Delta a_{GaAs}$	$\Delta a_{GaP}$	$\Delta a_{Yb,GaP}$
(Å)						
600	0,0153	0,0149	0,0004	0,0540	0,0536	0,0004
700	0,0254	0,0245	0,001	0,0757	0,0748	0,001
800	0,0343	0,0314	0,003	0,1031	0,1002	0,003

Аналогично в НГЭС на основе GaP, сформированной при  $T_2=700$  К и содержащей КТ из Yb, при охлаждении до  $T_1=300$  К, постоянная решетки КТ Yb сокращается на  $\Delta a_{Yb}=0,0621$  Å, а размер постоянной решетки спейсерного слоя GaP на  $\Delta a_{GaP}=0,0127$  Å (табл. 1). Таким образом, постоянные решеток КТ Yb и спейсерного слоя GaP испытывают отрицательное давление, которому соответствует суммарная величина сокращений постоянных решеток  $\Delta a_{Yb,GaP}=0,0748$  Å. Разность величин сокращения постоянных решеток НГЭС, сформированных при 700 К на основе GaAs и GaP и содержащих КТ Yb, составляет  $\Delta a_{Yb,GaAs}-\Delta a_{Yb,GaP}=0,001$  Å (табл. 2).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асрян Л.В., Сурис Р.А. Теория пороговых характеристик полупроводниковых лазеров на квантовых точках // ФТП. – 2004. – Т. 38. – № 1. – С. 3–25.
2. Norman A. G., Hanna M. C., Dippe P. et al. InGaAs/GaAs QD superlattices: MOVPE growth, structural and optical characterization, and application in intermediate-band solar cells // Proceedings of the 31<sup>st</sup> IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition. – Lake Buena Vista, Florida, USA, January 3–7, 2005. – P. 43.

Максимумы ФЛ при  $E=0,8$  эВ и  $E=0,79$  эВ (рис. 1, 2), соответствуют излучению КТ Yb в НГЭС, выращенных при температуре  $T=730$  К. Однако отсутствие в литературе экспериментально определенных значений коэффициентов теплового расширения Yb, GaAs и GaP для температуры  $T=730$  К не позволяет получить точные значения сокращений постоянных решеток этих материалов в интервале температур  $\Delta T=300-730$  К. Оценка величины этих коэффициентов в соответствии [20] позволяет определить с точностью до 0,001 Å изменения постоянных решеток  $\Delta a_{Yb,GaAs}\approx 0,08$  Å и  $\Delta a_{Yb,GaP}\approx 0,079$  Å. Таким образом, разность постоянных решеток КТ Yb в НГЭС на основе GaAs и GaP соответствует разности величин энергии максимумов ФЛ в этих НГЭС, т. е. 0,001 Å~0,01 эВ

Аналогичное соответствие наблюдается для разности постоянных решеток КТ InAs в НГЭС на основе GaAs и GaP и энергий максимумов ФЛ для этих материалов, т. е. 0,001 Å~0,01 эВ.

Представленные в табл. 2 данные, рассчитанные для формирования НГЭС КТ при 600, 700 и 800 К, свидетельствуют о том, что путем изменения температуры можно получать КТ с различными размерами постоянной решетки, используя один и тот же материал. Изменение температуры в процессе выращивания методом ЖФЭ ИОНП позволяет получать массивы различных ИКТ не только в разных структурах, но и непосредственно в одной многослойной структуре.

#### Выводы

1. Изменение ширины запрещенной зоны InAs в КТ, по сравнению с объемным материалом InAs, обусловлено размерами КТ, величина которых зависит от разности постоянных решеток матричного материала и материала КТ.
2. В НГЭС с КТ из металла (иттербия) реализуется фазовый переход металл–полупроводник. Ширина запрещенной зоны полупроводника, образующегося при этом, определяется температурой выращивания.
3. Применение фазового перехода металл–полупроводник позволяет получать в одном технологическом процессе многослойные НГЭС с массивами КТ, имеющими различные значения ширины запрещенной зоны.
3. 40.8 % efficient inverted triple-junction solar cell with two independently metamorphic junctions / J.F. Geisz, D.J. Friedman, J.S. Ward, A. Duda, W.J. Olavarria, T.E. Moriarty, J.T. Kiehl, M.J. Romero, A.G. Norman, K.M. Jones // Appl. Phys. Lett. – 2008. – № 93. – P. 123505.
4. Фоточувствительность структур с квантовыми ямами, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии, при нормальном падении излучения / В.Б. Куликов, Г.Х. Аветисян, Л.М. Василевская, И.Д. Залевский, И.В. Будкин, А.А. Падалица // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38. – № 2. – С. 218–221.

5. Структуры GaAs с квантовыми точками InAs и As, полученные в едином процессе молекулярно-лучевой эпитаксии / В.Н. Неведомский, Н.А. Берг, В.В. Чалдышев, В.В. Преображенский, М.А. Путято, Б.Р. Семягин // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43. – № 12. – С. 1662–1666.
6. Ченга Л., Плога К. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры / пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 584 с.
7. Леденцов Н.Н. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры. Обзор // Физика и техника полупроводников. – 1998. – Т. 32. – № 4. – С. 385–410.
8. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // ФТП. – 1998. – Т. 32. – № 1. – С. 3–18.
9. Марончук И.Е., Марончук А.И., Найденкова М.В. Формирование квантовых точек в процессе жидкофазной эпитаксии методом импульсного охлаждения насыщенного раствора-расплава // Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2005. – № 12. – С. 97–101.
10. Epitaxial growth of structures with nano-dimensional features from liquid phase by pulse cooling of substrate: pat. US, no. 20070089668, 2007.
11. Спосіб вирощування епітаксійних наногетероструктур з масивами квантових точок: патент Укр. UA № 94699; замов. 20.09.2010; опуб. 10.06.2011, Бюл. № 11. – 5 с.
12. Марончук И.И. Получение наногетероэпитаксиальных структур с квантовыми точками для высокоэффективных солнечных элементов, исследование их свойств // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2013. – № 4 (193). – С. 149–155.
13. Predicted photoreflectance signatures on QD selective contacts for hot carrier solar cells / E. Cánovas, A. Martí, P.G. Linares, E. Antolín, D. Fuertes Marrón, C. Tablero, A. Luque // GCEP Proceedings of 23<sup>rd</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference. – Spain, 2008. – P. 33–36.
14. Maronchuk I.E., Berezovska N.I., Borkovska O.Yu. Nanoheteroepitaxial Structures for solar cells on basis GaP // Proceedings 24<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. – Germany, 2009. – P. 421–424
15. Дубровский В.Г. Теория формирования эпитаксиальных структур. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 350 с.
16. Ван дер Мерве Дж.Х. Несоответствие кристаллических решеток и связи на поверхности раздела между ориентированными пленками и подложками // Монокристаллические пленки. – М.: Мир, 1966. – С. 172.
17. Мотт Н.Ф. Переходы металл-изолятор. – М.: Наука, 1979. – 343 с.
18. Физическая энциклопедия / под ред. А.М. Прохорова. – М.: Советская энциклопедия, 1990. – Т. 2. – 703 с.
19. Бугаев А.А., Захарченя Б.П., Чудновский Ф.А. Фазовый переход металл-полупроводник и его применение. – Л.: Наука, 1979. – 183 с.
20. Новикова С.И. Тепловое расширение твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 290 с.

Поступила 12.05.2014 г.

UDC 621.325

## METAL–SEMICONDUCTOR PHASE TRANSITION IN NANOHETEROEPITAXIAL STRUCTURES TECHNOLOGY

**Igor I. Maronchuk,**

Cand. Sc., Sevastopol Institute of Nuclear Energy and Industry,  
7, Kurchatov street, Sevastopol, 299033, Russia. E-mail: igimar@mail.ru

**Igor E. Maronchuk,**

Dr. Sc., Sevastopol Institute of Nuclear Energy and Industry, 7, Kurchatov street,  
Sevastopol, 299033, Russia. E-mail: igimar@mail.ru

**Tamara F. Kulyutkina,**

Cand. Sc., Sevastopol Institute of Nuclear Energy and Industry,  
7, Kurchatov street, Sevastopol, 299033, Russia. E-mail: fizlab@simp.com.ua

*Relevance of the work is caused by the necessity of obtain nanoheteroepitaxial structures with quantum dots to design and to develop the production of semiconductor energy high-performance devices.*

**The main aim of the study** is to identify the reasons of forming wide-receiving semiconductor material of narrow-gap one when growing it in the form of quantum dots; to investigate the possibility of applying metal–semiconductor phase transition to obtain the material which in the form of quantum dots corresponds to narrow-gap semiconductor.

**The methods used in the study:** nanoheteroepitaxial structures with quantum dots were grown by liquid-phase epitaxy with pulse-cooled substrate; properties of the structures obtained were studied by investigation of their photoluminescence spectra taken from the samples using a set of spectral apparatus based on two monochromators MDR-41.

**The results:** The authors have revealed that the change in InAs bandgap in quantum dot is caused by a quantum dot size as compared with InAs bulk material. The dimension of the dots depends on difference between the lattice constants of the matrix material and quantum dot material. Metal–semiconductor interface phase transition is implemented in nanoheteroepitaxial structures with quantum dots of metal (Yb). The bandgap of the semiconductor formed at the time is determined by the growth temperature. Application of metal–semiconductor phase transition allows obtaining in one process multilayer nanoheteroepitaxial structures with the arrays of quantum dots with different values of the bandgap.

**Key words:**

Phase transition, metal–semiconductor, ytterbium, liquid phase epitaxy, nanoheteroepitaxial structures, quantum dots.



## REFERENCES

- Asryan L.V., Suris R.A. Teoriya porogovykh kharakteristik poluprovodnikovyykh lazerov na kvantovykh tochkakh [The theory of threshold characteristics of semiconductor lasers on quantum dots]. *FTP*, 2004, vol. 38, no. 1, pp. 3–25.
- Norman A. G., Hanna M. C., Dipko P. et al. InGaAs/GaAs QD superlattices: MOVPE growth, structural and optical characterization, and application in intermediate-band solar cells. *Proceedings of the 31<sup>st</sup> IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition*. Lake Buena Vista, Florida, USA, January 3–7, 2005. pp. 43.
- Geisz J.F., Friedman D.J., Ward J.S., Duda A., Olavarria W.J., Moriarty T.E., Kiehl J.T., Romero M.J., Norman A.G., Jones K.M. 40.8 % efficient inverted triple-junction solar cell with two independently metamorphic junctions. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, no. 93, pp. 123505.
- Kulikov V.B., Avetisyan G.Kh., Vasilevskaya L.M., Zalevskiy I.D., Budkin I.V., Padalitsa A.A. Fotochuvstvitel'nost' struktur s kvantovymi yamami, vyroshchennykh metodom MOS-gidritnoy epitaksii, pri normalnom padenii izlucheniya [Photosensitivity of structures with quantum holes grown up by MOCVD method at normal radiation fall]. *FTP*, 2004, vol. 38, no. 2, pp. 218–221.
- Nevdomskiy V.N., Bert N.A., Chaldyshev V.V., Puyato M.A., Semiyagin B.R. Struktury GaAs s kvantovymi tochkami InAs i As, poluchennyye v edinom protsesse molekulyarno-luchevoy epitaksii [GaAs structures with quantum dots InAs and As obtained in MBE unified process]. *FTP*, 2009, vol. 43, no. 12, pp. 1662–1666.
- Chenga L., Ploga K. Molekulyarno-luchevaya epitaksiya i geterostrukturury [MBE and heterostructures]. Translated from English. Moscow, Mir publ., 1989. 584 p.
- Ledentsov N.N. Geterostruktury s kvantovymi tochkami: poluchenie, svoystva, lazery. Obzor [Heterostructures with quantum dots: obtain, properties, lasers. Review]. *FTP*, 1998, vol. 32, no. 4, pp. 385–410.
- Alferov Zh.I. Istoriya i budushchee poluprovodnikovyykh geterestraktur [History and the future of semi-conductor heterostructures]. *FTP*, 1998, vol. 32, no. 1, pp. 3–18.
- Maronchuk I.E., Maronchuk A.I., Naydenkova M.V. Formirovaniye kvantovykh tochek v protsesse zhidkofaznoy epitaksii metodom impulsnogo okhlazhdeniya насыщенный раствор-расплава [Formation of quantum dots in the course of LPE by the of puls cooling method of a saturated solution-melt]. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2005, no. 12, pp. 99–101.
- Maronchuk I.E., Kulyutkina T.F., Maronchuk A.I., Naidenkova M.V. *Epitaxial growth of structures with nano-dimensional features from liquid phase by pulse cooling of substrate: patent US*, no. 20070089668, 2007.
- Maronchuk I.E., Kulyutkina T.F., Maronchuk I.I. *Sposib vyroshchuvannya epitaksiynikh nanoheterostruktur z masyvamy kvantovykh tochk* [Expedient of cultivation epitaxial nanoheterostructures with quantum dots]. Patent UA, no. 94699, 2011.
- Maronchuk I.I. Poluchenie nanoheteroepitaksialnykh struktur s kvantovymi tochkami dlya vysokoeffektivnykh solnechnykh elementov, issledovanie ikh svoystv [Obtaining nanoheteroepitaxial structures with quantum dots for high effective photovoltaic devices, investigation of their properties]. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National university*, 2013, no. 4 (193), pp. 149–155.
- Cánovas E., Martí A., Linares P.G., Antolin E., Fuertes Marrón D., Tablero C., Luque A. Predicted Photoreflectance Signatures on QD Selective Contacts for Hot Carrier Solar Cells. GCEP Proceedings of 23<sup>rd</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference. Spain, 2008. pp. 33–36.
- Maronchuk I.E., Berezovska N.I., Borkovska O.Yu. Nanoheteroepitaxial Structures for Solar Cells on Basis GaP. Proc. 24<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Germany, 2009. pp. 421–424.
- Dubrovskiy V.G. Teoriya formirovaniya epitaksialnykh struktur [The theory of formation of epitaxial structures]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2009, 350 p.
- Van-der-Merve. Nesootvetstvie kristallicheskiykh reshotok i sily svyazi na poverkhnosti razdela mezhdru orientirovannymi plenkami i podlozhkami [Discrepancy of crystalline lattices and force of communication on an interface between the oriented films and substrates]. *Monokristallicheskie plenki* [Monocrystalline films]. Moscow, Mir Publ., 1966. pp. 172.
- Mott N.F. Perekhod metal-izolyator [Metal-insulator transition]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 343 p.
- Fizicheskaya entsiklopediya [The physical encyclopedia]. Ed. by A.M. Prokhorov. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1990. Vol. 2, 703 p.
- Bugaev A.A., Zakharchenko B.P., Chudnovskiy F.A. Fazovy perekhod metal-poluprovodnik i ego primeneniye [Metal-semiconductor phase transition and its application]. Leningrad, Nauka Publ., 1979. 183 p.
- Novikova S.I. Teplovoe rashirenije tverdykh tel [Thermal dilatation of solid bodies]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 290 p.

Received: 12 May 2014.

УДК 620.197

## АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ОСУШЕНИЯ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА С ПОМОЩЬЮ СИЛИКАГЕЛЯ ПРИ КОНСЕРВАЦИИ АГРЕГАТОВ ПАРОВОДЯНОГО ТРАКТА ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

**Голдаев Сергей Васильевич,**

д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры теоретической и промышленной  
теплотехники Энергетического института ФГБОУ ВПО «Национальный  
исследовательский Томский политехнический университет»,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: SVGoldaev@rambler.ru

**Хушвактов Алишер Асанович,**

аспирант кафедры теплотехники и теплотехнического оборудования  
Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими,  
Республика Таджикистан, 734042, г. Душанбе,  
ул. академиков Раджабовых, 10. E-mail: alisher1001@mail.ru

**Актуальность работы** определяется необходимостью защиты агрегатов пароводяного тракта ТЭС при простоях от стояночной атмосферной коррозии.

**Цель работы:** провести сопоставительный анализ вариантов осушения воздуха в агрегатах пароводяного тракта ТЭС с помощью силикагеля, размещая его в одноразовых контейнерах, или использования псевдооживленного слоя.

**Методы исследования:** на основе апробированных методик прогнозирования характеристик установок для осушения воздуха от паров воды адсорбентами осуществлена оценка их применимости в агрегатах пароводяного тракта ТЭС.

**Результаты:** Рассмотрена задача о консервации агрегатов пароводяного тракта тепловой электрической станции с помощью адсорбентов (силикагелей, цеолитов и др.), широко применяющихся при сушке и разделении газов и жидкостей, в процессе очистки дымовых газов от диоксида углерода. Отмечено, что при поддержании требуемой влажности в замкнутых объемах осушение происходит в статических условиях. Процесс насыщения силикагелей влагой характеризуется малой скоростью, зависящей в основном от размеров его гранул. Влагоемкость силикагеля при фиксированной относительной влажности газа изменяется незначительно. Кроме того, рассмотрен вариант исполнения устройства для осушения воздуха в пароводяном тракте тепловой электрической станции с помощью гранул адсорбента, находящихся в псевдооживленном состоянии, в котором происходит механическое взаимодействие частиц адсорбента друг с другом и с внутренними поверхностями аппарата. В промышленных адсорбционных установках часто используются аппараты такого типа с непрерывным принципом действия, что эффективно при улавливании целевых компонентов из отходящих газовых потоков больших расходов. Установлено, что для снижения с 98 до 20 % относительной влажности воздуха, заполняющего резервуар вместимостью 10 м<sup>3</sup>, требуется 1 кг технического силикагеля с минимальной влагоемкостью, равной 0,2, что в 25 раз меньше значения, рекомендуемого в ПТЭ. В рамках модели адсорбционной установки с псевдооживленным слоем необходима масса силикагеля 7...12 кг для осушения влажного воздуха с объемным расходом, соответствующим промышленным адсорберам. Однако эта схема сложнее для реализации внутри агрегатов пароводяного тракта ТЭС.

**Ключевые слова:**

Адсорбция, десорбция, осушение воздуха, пароводяной тракт ТЭС, псевдооживленный слой, коррозия, силикагель, турбина, регенерация, диффузия, цеолит.

Водяной пар, содержащийся в воздухе и в газах, конденсируется уже при незначительном охлаждении и приводит к коррозии узлов, трубопроводов, котлов и других агрегатов пароводяного тракта тепловых электрических станций (ТЭС) [1].

Опыт эксплуатации ТЭС показывает, что при некачественном проведении консервации их агрегатов конденсация влаги, содержащейся в воздухе и в газах, во время останова со снижением давления среды до атмосферного и попадании во внутренний объем кислорода воздуха вызывает стояночную атмосферную коррозию (САК) углеродистой стали [2].

Успешное решение многосторонней проблемы защиты агрегатов пароводяного тракта ТЭС при простоях от САК позволит повысить их рабочий ресурс, уменьшить материальные потери в результате коррозии металлов, снизить загрязнение окружающей среды [3].

Для консервации внутренних металлических поверхностей котельных агрегатов (КА) возможно применение ингибиторов, создающих защитные пленки, покрывающие все участки поверхностей агрегатов ТЭС [4, 5]; использование инертного газа; снижение относительной влажности воздуха, достигаемое нагреванием [6] или осушением [7]. Однако такие предложения, как отмечено в работе [8], связаны с большими затратами электрической энергии.

Принимая во внимание большое количество агрегатов ТЭС, эксплуатируемых в России, для которых необходима консервация, следует отнести рассматриваемую задачу к разряду актуальных. Это подтверждается и многочисленными публикациями.

Перспективным представляется использование для консервации агрегатов пароводяного тракта ТЭС адсорбентов (силикагелей, цеолитов и т. п.),

которые широко применяются при сушке и разделении газов и жидкостей [9, 10], в процессах очистки дымовых газов от диоксида углерода [11], в холодильной технике [12, 13], фармакологии [14] и др.

Целью настоящей работы является выполнение сопоставительного анализа вариантов осушения воздуха в агрегатах пароводяного тракта ТЭС с помощью силикагеля: размещение его в одноразовых контейнерах или подача в режиме псевдооживленного слоя (ПОС).

При консервации агрегатов пароводяного тракта ТЭС, поддержании заданной влажности в замкнутых объемах достаточно широко распространено осушение в статических условиях. Количество загружаемого адсорбента в этом случае определяется в основном равновесной адсорбционной емкостью. Среди адсорбентов выделяется силикагель вследствие его масштабного промышленного производства и низкой цены [15]. Процесс насыщения силикагелей влагой в статических условиях характеризуется малой скоростью. Длительность полного насыщения при комнатной температуре мелкопористых силикагелей составляет 40 ч, среднепористых – 50 ч и крупнопористых – 75 ч [16, 17]. При фиксированной относительной влажности газа влагоемкость ( $g_c$ ) силикагеля изменяется незначительно, вне зависимости от температуры, при которой происходит процесс поглощения [18].

Известно, что при относительном влагосодержании среды ( $\varphi$ ) до 55 ... 60 % максимальной адсорбционной способностью по парам воды обладает мелкопористый силикагель (насыпная плотность порядка 700 кг/м<sup>3</sup>). В интервале  $\varphi=70...80$  % предпочтительнее среднепористый силикагель. Преимущества крупнопористого силикагеля ( $\rho_c \sim 400...500$  кг/м<sup>3</sup>) реализуются при  $\varphi > 90$  % [14].

На практике в статических условиях для поддержания влажности в частично герметичном объеме сухой силикагель более или менее равномерно распределяется по контролируемому объему. Общее количество адсорбента зависит от проницаемости и размеров оболочки, поступления влаги с проникающим через неплотности воздухом. Масса адсорбента тем больше, чем выше заданная продолжительность хранения, и обратно пропорциональна равновесной адсорбционной емкости, которая может быть определена по изотерме адсорбции, соответствующей температуре хранения, и предельно допустимой для изделий данного вида относительной влажности среды [16].

Анализ зависимости количества поглощенной воды силикагелем от относительной влажности воздуха показал, что при  $\varphi < 70$  %  $g_c$  линейно повышается до 36 %, а при  $\varphi = 70 ... 100$  % влагоемкость возрастает от 36 до 40 % [16].

В работе [19] на основе термодинамического подхода была оценена масса адсорбента  $M_a$ , которую можно будет использовать для поглощения паров воды из воздуха, находящегося при давлении

$p_b$  в свободном пространстве агрегата пароводяного тракта ТЭС, имеющего вместимость  $V_b$  при относительной влажности  $\varphi_1$  и температуре  $T_{b1}$ . Согласно техническим условиям консервации для предотвращения образования налета ржавчины агрегат должен находиться при влажности  $\varphi_2$  и температуре  $T_{b2}$  [8]. Поглощающая способность 1 кг адсорбента (силикагеля) принималась равной  $g_{ps}$  воды.

Было получено, что для осушения воздуха с  $\varphi_1 = 98$  %, находящегося внутри агрегатов вместимостью 100 м<sup>3</sup>, требуется около 9,5 кг силикагеля с  $g_{ps} = 0,2$ .

Например, для котла БКЗ-210–140 с суммарными водяным и паровым объемами 94 м<sup>3</sup> потребуется 9 кг силикагеля. С использованием габаритных размеров турбины Т-12–35/1,2 [20] для верхней оценки вместимости ее кожуха получено 20 м<sup>3</sup>, соответственно  $M_c \approx 2$  кг. При цене 1 кг технического силикагеля 50 р. [15], затраты на его приобретение и использование будут малыми. По опыту проведения консервации водогрейного котла КВГМ-100–150 осушенным воздухом, подача которого осуществлялась от установки ВОУ-2000 в выходной сетевой трубопровод диаметром 400 мм [6], силикагель можно разместить в этом месте в виде поглотительных контейнеров. В случае необходимости можно повторить несколько раз эту процедуру.

Отраслевым нормативом [21] рекомендовано 1,5...2,5 кг силикагеля на 1 м<sup>3</sup> внутреннего объема консервируемого котла, что превышает примерно в 25 раз полученную выше оценку. Подробности обоснования такой массы силикагеля в [21] не приведены. Возможно, существенное расхождение значений массы адсорбента обусловлено учетом дополнительной массы воды, сохраняющейся в эксплуатационных отложениях на внутренних поверхностях нагрева [6].

Рассмотрим другой вариант исполнения устройства для осушения воздуха в пароводяном тракте ТЭС с помощью гранул адсорбента, находящихся в псевдооживленном состоянии, в котором происходит механическое взаимодействие частиц адсорбента друг с другом и с внутренними поверхностями аппарата [22]. В ходе расчета адсорбционного процесса определяются концентрации целевого компонента в газе-носителе на выходе из слоя адсорбента.

При функционировании аппаратов с ПОС адсорбента происходит значительное перемешивание дисперсного материала по высоте слоя, имеющего величину 60...100 мм, что обеспечивает удовлетворительное псевдооживление [22]. Предполагается, что осуществляется полное перемешивание адсорбента, которому соответствует постоянное значение средней степени обработки адсорбента по всему объему слоя.

В промышленных адсорбционных установках часто используются аппараты ПОС непрерывного действия с постоянной подачей и выгрузкой адсор-

бента, что эффективно при улавливании целевых компонентов из отходящих газовых потоков больших расходов. Поэтому допустимо применять их в условиях меньших расходов воздуха.

Алгоритм прогнозирования характеристик для ПОС с использованием номограмм описан в монографии [22]. Однако в рассмотренном примере представлены результаты расчета одного варианта, что не позволяет проанализировать возможности анализируемого способа для рассматриваемой задачи.

Расчет массы адсорбента, требуемой для осушения воздуха в ПОС, проведен по соотношениям для непрерывного режима адсорбции. Реализация процесса осушения воздуха в режиме фильтрации его через ПОС адсорбента позволяет рассматривать полученные результаты для массы адсорбента как оценку «снизу».

Приближенный расчет характеристик адсорбента непрерывного действия основывается на уравнении материального баланса [22]

$$W_b(C_0 - C_k) = W_a(a_{md} - a_n) = \beta_{0v} \Delta C_{md} F, \quad (1)$$

где  $C_0$  и  $C_k$  – начальная и конечная концентрации паров воды, кг/м<sup>3</sup>;  $a_{md}$ ,  $a_n$  – средняя степень обработки дисперсного адсорбента в объеме ПОС и на выходе из него;  $W_c$ ,  $W_a$  – объемные расходы газаносителя и адсорбента;  $F$  – суммарная площадь поверхности частиц в объеме слоя.

Средняя по высоте слоя движущая разность концентраций адсорбтива вычисляется следующим образом

$$\Delta C_{md} = (C_0 - C_k) / \ln \left[ \frac{C_0 - C_s(a_{md})}{C_k - C_s(a_{md})} \right], \quad (2)$$

где  $C_s(a_{md})$  – концентрация адсорбтива в газе, равновесная среднему его содержанию в частицах адсорбента; для условий полного перемешивания частиц в ПОС является постоянной, однако неизвестной величиной.

В ходе приближенного расчета предполагаются известными такие параметры:  $W_b$ ,  $C_0$ ,  $C_k$  и  $a_n$ . Величина коэффициента массообмена ( $\beta_{0v}$ ) определялась из критериального уравнения [22]

$$\frac{\beta_{0v} d_a^2}{D_w} = 4,0 \left( \frac{W_a d}{D_w} \right)^{0,70} \left( \frac{C_{mx}}{C_0} \right)^{0,35} \left( \frac{\beta^2}{BT^2} \right)^{1,1}, \quad (3)$$

где  $d_a$  – диаметр частиц адсорбента;  $C_{mx}$  – предельная концентрация целевого компонента в адсорбенте;  $D_w$  и  $C_0$  – коэффициент диффузии адсорбтива и начальная концентрация его паров в воздухе.

При расчете  $W_a$  используется величина минимального расхода адсорбента  $W_{amn}$ , при котором на выходе из аппарата степень отработки адсорбента находится в равновесии с заданным значением входной концентрации в газовой фазе

$$W_{amn}(a_s - a_n) = W_b(C_0 - C_k). \quad (4)$$

Для адсорберов такого типа действительный расход адсорбента принимается больше минимального на 10...30 %

$$W_a = k_z W_{amn}. \quad (5)$$

Проиллюстрируем применение описанной методики на следующем примере из монографии [22]. В качестве адсорбента предполагался цеолит, для которого известны необходимые для методики физико-химические характеристики. По своей активности он превосходит силикагель в 1,5 раза. Приведенные в [23] результаты расчетов габаритно-массовых характеристик адсорберов воздухо-разделительных установок среднего давления, заполненных цеолитом NaX, находятся в качественном соответствии с упомянутыми данными для силикагеля.

Адсорбер с ПОС предназначен для поглощения паров воды с начальной концентрацией  $C_0=3,8 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup> из потока воздуха с  $W_b=0,50$  м<sup>3</sup>/с. Конечная концентрации паров воды:  $C_k=0,04 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>, их коэффициент афинности  $\beta=2,53$ . При температуре 20 °С концентрация насыщенных паров воды  $C_s=17,2 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>. Диаметр частиц адсорбента  $d_a=2,0 \cdot 10^{-3}$  м, их плотность  $\rho_a=1200$  кг/м<sup>3</sup>, содержание воды в исходном адсорбенте  $a_n=0,5$  кг/м<sup>3</sup>. Коэффициент диффузии паров воды в воздухе  $D_w=2,4 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с. Структурная константа для цеолита  $B=5,5 \cdot 10^{-8}$  1/К<sup>2</sup>. Изотерма адсорбции при температуре 20 °С предполагается близкой к линейной

$$a_{sc} = K_a(C/C_s), \quad (6)$$

где  $K_a=679,4$  – коэффициент аппроксимации для цеолита, найденный из анализа результатов промежуточных вычислений рассматриваемого примера.

Критерий Рейнольдса для воздушного потока, проходящего через ПОС, вычисляется по формуле [22]

$$Re_b = \frac{Ar_b \cdot \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,61 \sqrt{Ar_b \cdot \varepsilon^{4,75}}},$$

где  $\varepsilon$  – порозность слоя, принимается равной 0,5;  $Ar_b$  – критерий Архимеда, определяется таким образом

$$Ar_b = \frac{gd^3(\rho_T - \rho_b)}{v_b^2 \rho_b}.$$

Здесь  $\rho_b$ ,  $v_b$  – плотность и коэффициент кинематической вязкости воздуха при температуре 20 °С.

В усовершенствованной методике расчета необходимые теплофизические свойства воздуха находились с помощью интерполяционных зависимостей из справочника [24].

Средняя скорость газа на полное сечение слоя

$$w_b = v_b \cdot Re_b / d_T.$$

Диаметр корпуса аппарата цилиндрической формы

$$D_{ap} = \sqrt{4V_b / (\pi w_b)}.$$

Минимальный объемный расход адсорбента определялся по уравнению (4)

$$W_{mn} = W_b(C_0 - C_k) / [a_s(C_k) - a_n],$$



в котором согласно изотерме адсорбции (6)  $a_{sc}(C_k)=1,58 \text{ кг/м}^3$ .

С учетом максимального значения запаса по расходу адсорбента согласно (5)

$$V_T = 1,3 \cdot V_{mn}.$$

Значение  $\beta_{0v}$  на выходе из аппарата определяется по уравнению (3).

Средняя концентрация влаги, поглощенной адсорбентом, находилась из уравнения материального баланса

$$a_{md} = a_n + (V_b / M_T)(C_0 - C_k). \quad (7)$$

По изотерме адсорбции (6) с учетом (7) вычислено  $C_{sc}(a_{md})=3,37 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м}^3$ .

Средняя движущая разность концентраций в газовой фазе вычислялась по формуле (2).

По уравнению (1) находился объем и масса адсорбента в ПОС

$$V_a = V_b(C_0 - C_k) / \beta_{0v} \Delta C_{md}; \quad M_a = \rho_a V_a. \quad (8)$$

Объем и высота ПОС

$$V_{sl} = V_a / \varepsilon; \quad H_{cl} = 4V_{cl} / (\pi D_{ap}^2).$$

Описанная методика была реализована на Турбо Паскале. Приведенные выше исходные данные и результаты расчета из монографии [22] использовались для тестирования составленной программы.

В ходе параметрического анализа выявлялась зависимость массы цеолита и размеры ПОС от ряда входных параметров.

Снижение объемного расхода воздуха  $W_b$  от 0,5 до 0,3 м<sup>3</sup>/с привело к уменьшению массы цеолита от 8,7 до 7,4 кг (рис. 1).

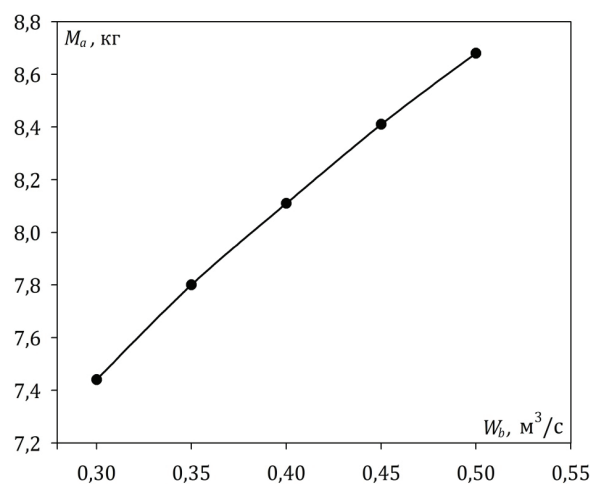


Рис. 1. Зависимость массы цеолита от объемного расхода воздуха

Fig. 1. Zeolite mass dependence on air volume flow

На рис. 2 представлены результаты влияния варьирования  $C_0$  на требуемую массу адсорбента. Такое поведение кривой может быть объяснено зависимостью объема адсорбента от  $\beta_{0v}$ . Согласно соотношению (8)  $W_a \sim 1/\beta_{0v}$ , а значение  $\beta_{0v}$ , вычисленное по интерполяционной формуле (3), возрастает от 440 при  $C_0=0,0038 \text{ кг/м}^3$  до 612 1/с при  $C_0=0,0098 \text{ кг/м}^3$ .

Как видно, для осушения воздуха с достаточно высокими значениями объемных расходов, сравнимых с расходами в промышленных установках, требуется несколько килограммов цеолита. Поэтому можно воспользоваться предложенным выше коэффициентом пересчета, и считать, что массы силикагеля будут превышать в 1,5 раза приведенные на рис. 1, 2 значения массы для цеолита.

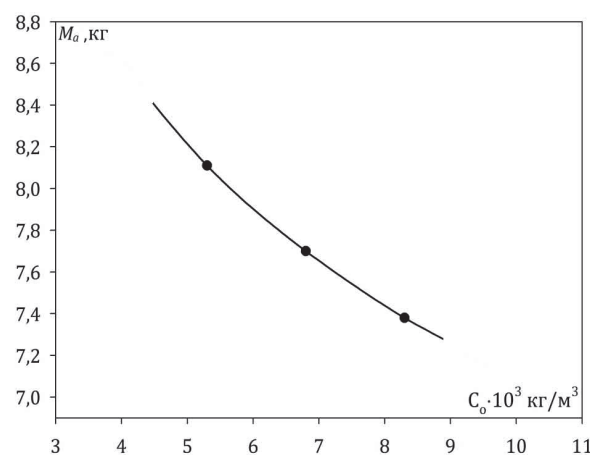


Рис. 2. Зависимость массы цеолита от начальной концентрации паров воды в воздухе

Fig. 2. Zeolite mass dependence on initial concentration of water vapor in the air

### Выводы

В рамках модели адсорбционной установки с ПОС определена необходимая масса силикагеля, составляющая 7...12 кг. Этот режим эффективен из-за развитой поверхности массообмена, с другой стороны, энергоемок и сложнее по конструкции, нежели предложенный вариант с одноразовыми контейнерами, заполненными силикагелем. Во втором варианте несколько увеличиваются размеры адсорберов, но упрощается и удешевляется конструкция вследствие отказа от участка псевдооживления и стадии десорбции.

Разработанная автоматизированная методика расчета характеристик осушения воздуха с помощью адсорбционной установки с ПОС уточняет результаты, облегчает выполнение параметрического анализа на стадии проектирования и может быть использована в учебном процессе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Троянский Е.А., Чоловский В.Н. Повышение долговечности элементов котельного оборудования. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 80 с.
2. Сутоцкий Г.П. Повреждения энергетического оборудования, связанные с водно-химическим режимом. – СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1992. – 256 с.
3. Богачев А.Ф. Предотвращение коррозии и повреждений оборудования пароводяного тракта ТЭС // Теплоэнергетика. – 2001. – № 7. – С. 65–71.
4. Чернышев Е.В., Вепров Е.Н., Петров В.А. Повышение коррозионной стойкости оборудования при использовании пленкообразующих аминов // Электрические станции. – 2005. – № 11. – С. 15–18.
5. Шатова И.А. Совершенствование защиты от стояночной коррозии углеродистой стали котлов на основе применения ингибиторов октадециламина и М-1: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2005. – 148 с.
6. Полевич А.Н. Разработка, исследование и внедрение процессов и схем воздушной консервации теплоэнергетического оборудования: дис.... канд. техн. наук. – М., 2001. – 137 с.
7. Вишневецкий Е.П. Анализ особенностей использования основных методов осушения воздуха // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2004. – № 3. – С. 5–8.
8. Вишневецкий Е.П., Чепурин Г.В. Консервация осушенным воздухом // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2010. – № 5. – С. 8–12.
9. White J. CFD Simulation of silica gel and water adsorbent beds used in adsorption cooling system. PhD. Diss. – Birmingham, 2012. – 210 p.
10. White J. Computational fluid dynamics modelling and experimental study on a single silica gel type B / Modelling and Simulation in Engineering. – 2012. – V. 2012. – ID 598479. – P. 130–139.
11. Kierzkowska A.M., Pacciani R., Müller C.R. CaO-based CO<sub>2</sub> sorbents: From fundamentals to the development of new, highly effective materials // ChemSusChem. – 2013. – V. 6. – Iss. 7. – P. 1130–1148.
12. Simulation of water sorption dynamics in adsorption chillers: One, two and four layers of loose silicagrain / A. Freni, G. Maggio, F. Cipiti, Y.I. Aristov // Applied Thermal Engineering. – 2012. – V. 44. – P. 69–77.
13. Study of a novel silica gel-water adsorption chiller. P. I. Design and performance prediction / D.C. Wang, Z.Z. Xia, J.Y. Wu, R.Z. Wang, H. Zhai, W.D. Dou // International Journal of Refrigeration. – 2005. – № 28. – P. 1073–1083.
14. Остриков А.Н. Процессы и аппараты пищевых производств: в 2 кн. Кн. 2. – СПб.: ГИОРД, 2007. – 608 с.
15. Обзор рынка силикагеля в СНГ. ООО «Инфомайн» (Исследовательская группа). URL: <http://www.infomine.ru/research/18/441> (дата обращения: 15.11.2013).
16. Серпионова Е.Н. Промышленная адсорбция газов и паров. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1969. – 416 с.
17. Морозов В.С., Морозов Е.В., Вихрова С.В. Остаточное содержание влаги в воздухе, осушенном силикагелем // Технические газы. – 2005. – № 6. – С. 34–36.
18. Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: в 2 кн. Кн. 1. – М.: Университетская книга: Логос; Физматкнига, 2006. – 912 с.
19. Голдаев С.В., Хушвактов А.А. Об использовании силикагелей для повышения долговечности котельного оборудования // Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность: Матер. трудов XIX Всерос. научно-техн. конф. – Томск: Изд-во ООО «Скан», 2013. – Т. 2. – С. 386–389.
20. Щегляев А.В. Паровые турбины. Теория теплового процесса и конструкции турбин: в 2-х кн. Кн. 2. 6-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 416 с.
21. Правила технической эксплуатации коммунальных отопительных котельных. Утверждены Приказом Минстроя России от 11.11.92 г. № 251.
22. Романков П.Г., Фролов В.Ф. Массообменные процессы химической технологии. – Л.: Химия, 1990. – 384 с.
23. Алексеев В.П., Вайнштейн Г.Е., Герасимов П.В. Расчет и моделирование аппаратов криогенных установок. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. – 280 с.
24. Бажан П.И., Канивец Г.Е., Селиверстов В.М. Справочник по теплообменным аппаратам. – М.: Машиностроение, 1989. – 367 с.

Поступила 15.04.2014 г.

UDC 620.197

## ANALYZING OPTIONS OF MOIST AIR DEHUMIDIFYING WITH SILICA GEL AT CONSERVATION OF UNITS OF STEAM AND WATER TRACT AT THERMAL POWER PLANT

Sergey V. Goldaev,

Dr. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,  
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: SVGoldaev@rambler.ru

Alisher A. Khushvaktov,

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi,  
10, Academicians Rajabovs street, Dushanbe, 734042, Republic of Tajikistan.  
E-mail: alisher1001@mail.ru

Relevance of the work is determined by the need to protect the steam circuit of TPP units from the parking atmospheric corrosion at inactivity.

**The main aim of the study** is to carry out the comparative analysis of air dehumidification options in TPP-steam circuit using silica gel, placing it in disposable containers, or using a fluidized bed.

**The methods used in the study:** based on the tested methods of forecasting the performance of installations for air drying from water vapor by adsorbents the authors evaluated their applicability in the operating conditions in the steam circuit TPP units.

**The results:** The paper considers the task of conserving TPP units by adsorbents (silica gel, zeolites etc.) widely used when drying and separating gases and liquids at flue gas carbon dioxide removal. As it is noted when maintaining the required moisture in closed volumes the drying occurs in static conditions. Silica gel is humidified at low speed which generally depends on its grain size. Moisture capacity of silica gel at fixed relative gas humidity changes insufficiently. The paper considers as well the variant of configuration of the unit for air drying in steam and water tract of TPP by the absorbent grains in fluidized bed where absorbent particle interact to each other and to inner parts of the device. In industrial absorption units such kind of device with continuous operation is often used. It is efficient when capturing target components from outgoing gas high flows. It was ascertained that in order to reduce from 98 to 20 % relative humidity of air filling the tank with a capacity of 10 m<sup>3</sup>, one kilo of silica gel with a minimum of technical water capacity of 0,2 is required; it is 25 times less than the value recommended in the rules of technical operation. Similar results were obtained in the framework of the adsorption fluidized bed. The required weight of silica gel is 7...12 kilos for drying moist air at a flow rate corresponding to the adsorption industry. But this scheme is more difficult to be accommodated within the TPP units steam circuit.

### Key words:

Adsorption, desorption, air dehumidification, steam and water tract of TPP, fluidized bed, corrosion, silica gel, turbine, regeneration, diffusion, zeolite.

### REFERENCES

1. Troyansky E.A., Cholovsky V.N. *Povyshenie dolgovechnosti elementov kotelnogo oborudovaniya* [Increased longevity of boiler equipment elements]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 80 p.
2. Sutotsky G.P. *Povrezhdeniya energeticheskogo oborudovaniya, svyazannye s vodno-khimicheskim rezhimom* [Damages to power equipment associated with water-chemical regime]. S-Peterburg, NPO CKTI Publ., 1992. 256 p.
3. Bogachev A.F. *Predotvrashchenie korrozii i povrezhdeniy oborudovaniya parovodyanogo trakta TES* [Prevention of corrosion and damage equipment steam and water tract TPP]. *Thermal Engineering*, 2001. no. 7, pp. 65–71.
4. Chernyshev E.V., Veprov E.N., Petrov V.A. *Povyshenie korrozionnoy stoykosti oborudovaniya pri ispolzovanii plenkoobrazuyushchikh aminov* [Increased corrosion resistance of equipment using film-forming amines]. *Elektricheskie stantsii*, 2008, no. 11, pp. 15–18.
5. Shatova I.A. *Sovershenstvovanie zashchity ot stoyanochnoy korrozii uglerodistoy stali kotlov na osnove primeneniya ingibitorov oktadetsilamina i M-1*. Kand. Diss. [Improved protection from parking corrosion of boiler carbon steel based on inhibitors of octadecylamine and M-1. Cand. Diss.]. Ivanovo, 2003. 272 p.
6. Polevich A.N. *Razrabotka, issledovanie i vnedrenie protsessov i skhem vozduшной konservatsii teploenergeticheskogo oborudovaniya*. Kand. Diss. [Development, research and implementation of processes and schemes of air conservation of thermal power equipment. Cand. Diss.]. Moscow, 2001. 137 p.
7. Vishnevsky E.P. *Analiz osobennostey ispolzovaniya osnovnykh metodov osusheniya vozdukh* [Analysis of features of using the main dehumidification methods]. *Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie*, 2004, no. 3, pp. 5–8.
8. Vishnevsky E.P., Chepurin G.V. *Konservatsiya osushennym vozduhom* [Preservation with dry air]. *Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie*, 2010, no. 5, pp. 8–12.
9. White J. *CFD Simulation of silica gel and water adsorbent beds used in adsorption cooling system*. PhD. Diss. Birmingham, 2012. 210 p.
10. White J. *Computational fluid dynamics modelling and experimental study on a single silica gel type B*. Modelling and Simulation in Engineering. 2012, vol. 2012, Article ID 598479, pp. 130–139.
11. Kierzkowska A.M., Pacciani R., Müller C.R. *CaO-based CO<sub>2</sub> sorbents: From fundamentals to the development of new, highly effective materials*. *ChemSusChem*, 2013, vol. 6, Iss. 7, pp. 1130–1148.
12. Freni A., Maggio G., Cipiti F., Aristov Y.I. *Simulation of water sorption dynamics in adsorption chillers: One, two and four layers of loose silicagrain*. *Applied Thermal Engineering*, 2012, vol. 44, pp. 69–77.
13. Wang D.C., Xia Z.Z., Wu J.Y., Wang R.Z., Zhai H., Dou W.D. *Study of a novel silica gel–water adsorption chiller. Part I. Design and performance prediction*. *International Journal of Refrigeration*, 2005, no. 28, pp. 1073–1083.
14. Ostrikov A.N. *Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv* [Processes and devices of food manufactures]. S-Peterburg, GIORD Publ., 2007. 608 p.

15. *Obzor rynka silikagelya v SNG* [Overview of silica market in the CIS]. Available at: <http://www.infomine.ru/research/18/441/> (accessed 15 November 2013).
16. Serpionova E.N. *Promyshlennaya adsorbtsiya gazov i parov* [Industrial adsorption of gases and vapors]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1969. 416 p.
17. Morozov V.S., Morozov E.V., Vihrova S.V. *Ostatocnoe sodержanie vlagi v vozdukh, osushennom silikagelem* [Residual moisture content in the air dried with silica gel]. *Tekhnicheskie gazy*, 2005, no. 6, pp. 34–36.
18. Aynshteyn V.G., Zakharov M.K., Nosov G.A. *Obshchy kurs protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii* [General course of processes and devices of chemical technology]. Moscow, Fizmatkniga Publ., 2006. 912 p.
19. Goldaev S.V., Khushvaktov A.A. *Ob ispolzovanii silikageley dlya povysheniya dolgovechnosti kotelnogo oborudovaniya* [On use of silica gel to improve durability of the boiler equipment]. *Energetika: effektivnost, nadezhnost, bezopasnost: materialy trudov XIX Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Energy: Efficiency, reliability, safety. Proc. XIX All-Russian scientific and technical conference]. Tomsk, 2013. Vol. 2, pp. 386–389.
20. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii kommunalnykh otopitelnykh kotelnykh*. Utverzhdeny Priказom Ministroya Rossii [Rules of technical operation of municipal heating plants. Approved by the Order of Russian Ministry of Construction]. 11.11.92, no. 251.
21. Romankov P.G., Frolov V.F. *Massoobmennye protsessy khimicheskoy tekhnologii* [Mass transfer processes of chemical technology]. Leningrad, Khimiya Publ., 1990. 384 p.
22. Alekseev V.P., Vaynshteyn G.E., Gerasimov P.V. *Raschet i modelirovanie apparatov kriogennykh ustanovok* [Calculation and simulation of cryogenic devices]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1987. 280 p.
23. Bazhan P.I., Seliverstov V.M. *Spravochnik po teploobmennym apparatam* [Handbook of heat transfer devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 367 p.
25. Shcheglyayev A.V. *Parovye turbiny. Teoriya teplovogo protsessa i konstruksii* [Steam turbine. The theory of thermal process and turbine design]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1993. 416 p.

Received: 15 April 2014.



УДК 551.510.532; 551.501.816

## ЛИДАРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ АТМОСФЕРЫ МЕТОДОМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ: РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТОВ

**Бочковский Дмитрий Андреевич,**

мл. науч. сотр. лаборатории лидарных методов ФГБНУ «Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук», Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1. E-mail: moto@iao.ru

**Романовский Олег Анатольевич,**

д-р физ.-мат. наук, зав. научно-образовательным центром ФГБНУ «Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук», Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1; профессор каф. управления инновациями факультета инновационных технологий ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36. E-mail: roa@iao.ru

**Харченко Ольга Викторовна,**

ст. науч. сотр. Центра лазерного зондирования атмосферы ФГБНУ «Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук», Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1. E-mail: olya@iao.ru

**Яковлев Семен Владимирович,**

канд. физ.-мат. наук, науч. сотр. лаборатории лидарных методов ФГБНУ «Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук», Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1; доцент каф. управления инновациями факультета инновационных технологий ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36. E-mail: ysv@iao.ru

*Актуальность работы обусловлена необходимостью развития лазерных методов зондирования для решения проблемы контроля состояния окружающей среды.*

**Цель работы:** создание программно-алгоритмической системы для лазерного дистанционного зондирования малых газовых составляющих атмосферы методом дифференциального поглощения, поиск информативных длин волн, численное моделирование лидарного зондирования газовых примесей и экспериментальная проверка информативности выбранных длин волн для зондирования малых газовых составляющих атмосферы.

**Методы исследования:** метод дифференциального поглощения, основанный на эффекте резонансного поглощения лазерного излучения в пределах селективной линии поглощения исследуемой газовой компоненты.

**Результаты:** Разработанная программно-аналитическая система «LIDAS» позволяет определить информативные длины волн лазерного зондирования различных малых газовых составляющих атмосферы, с ее помощью можно проводить численное моделирование лидарного зондирования малых газовых составляющих атмосферы, оценивать систематические ошибки восстановления профилей атмосферных газов, выработать требования к лидарам дифференциального поглощения, а также планировать и проводить эксперименты по лидарным измерениям профилей малых газовых составляющих атмосферы. Проведенное с помощью системы «LIDAS» численное моделирование показало, что при использовании лидара на основе обертонового СО-лазера в диапазоне высот 0–5 км при диаметре приемной оптики 0,3 м и пространственном разрешении 1 км уровень лидарных эхо-сигналов для всех исследуемых газов превышает уровень эквивалентной мощности шума фотоприемника  $NEP=10^{-9}$  Вт. Эксперименты по лазерной диагностике газового состава атмосферы обертонным СО-лазером подтвердили результат предварительной оценки эффективности применения метода дифференциального поглощения с учетом требований к спектрально-энергетическим параметрам зондирующего комплекса, рассчитанных разработанной программно-алгоритмической системой «LIDAS».

**Ключевые слова:**

Лидар, газоанализ, атмосфера, дифференциальное поглощение.

Малые газовые составляющие атмосферы (МГС), к числу которых относятся водяной пар, углекислый газ, озон, окислы азота и серы, угар-

ный газ и целый ряд других, являются оптически активными компонентами атмосферы и оказывают существенное воздействие на протекание таких

процессов, как погодообразование, загрязнение воздушного бассейна индустриальными выбросами, трансформация солнечного излучения, распространение оптических волн. В связи с этим возникает проблема разработки соответствующих приборов и методов анализа газового состава атмосферы, при этом наиболее интенсивно в последнее время развиваются дистанционные методы [1–3], которые, в отличие от стандартных контактных методов газоанализа, обеспечивают возможность получения данных с высокой оперативностью и в значительных пространственных масштабах.

Указанным требованиям в наибольшей степени удовлетворяют лазерные методы исследования газового состава атмосферы, основанные на использовании таких спектроскопических эффектов взаимодействия лазерного излучения с атмосферой, как резонансное поглощение, комбинационное рассеяние и флуоресценция. Максимальным сечением взаимодействия из перечисленных явлений обладает резонансное поглощение лазерного излучения атмосферными газами, что и определяет высокую чувствительность метода дифференциального поглощения (МДП), использующего это явление.

В настоящее время лазерное зондирование МГС по МДП принципиально реализовано [4, 5], однако из-за технической сложности лидаров измерения проводились только периодически. В связи с этим ставится задача повышения эффективности и информативности каждого измерения, решение которой возможно путем численного моделирования для оценки потенциальных возможностей и реализации оптимальных схем построения создаваемых лидарных систем [6–10].

В данной работе с помощью численного моделирования и экспериментально решаются следующие задачи:

- разработка программно-алгоритмической системы для лазерного дистанционного зондирования МГС по МДП;
- поиск информативных длин волн и численное моделирование лидарного зондирования газовых примесей по МДП;
- экспериментальная проверка информативности выбранных длин волн для зондирования МГС атмосферы.

Интенсивное развитие лазерных спектроскопических методов зондирования для решения проблемы контроля состояния окружающей среды требует предварительного численного моделирования для оценки потенциальных возможностей и реализации оптимальных схем построения создаваемых лидарных систем. Для решения этих задач создана информационно-вычислительная система для лазерного зондирования МГС атмосферы по МДП (LIdar Differential Absorption Sensing «LIDAS»). В отличие от системы «LIDAS», разработанные ранее пакеты программ для моделирования лазерного зондирования атмосферных газов методом дифференциального поглощения [11, 12]

предназначены только для анализа потенциальных возможностей лидарного зондирования водяного пара и озона в области генерации CO<sub>2</sub>-лазера и не дают возможности анализа применимости для многокомпонентного газоанализа других лазерных источников.

Лазерное зондирование профилей концентраций малых газовых составляющих атмосферы с использованием МДП основано на эффекте резонансного поглощения лазерного излучения в пределах селективной линии поглощения исследуемой газовой компоненты. Концентрация газовой составляющей  $n(z)$ , усредненная по пространственному интервалу  $\Delta z$ , определяется в этом случае по известной формуле [13]:

$$n(z) = \frac{1}{2(K(v_1, z) - K(v_2, z)) \Delta z} \times \ln \left[ \frac{P(v_1, z)P(v_2, z + \Delta z)}{P(v_2, z)P(v_1, z + \Delta z)} \right], \quad (1)$$

где  $K(v_1, z)$  и  $K(v_2, z)$  – значения коэффициентов поглощения вдоль трассы зондирования в точке  $z$  на частотах, расположенных внутри  $v_1$  и вне  $v_2$  контура селективной линии поглощения исследуемой газовой компоненты, предварительно рассчитываемые с использованием высотных модельных профилей метеопараметров атмосферы;  $P(v_1, z)$ ,  $P(v_2, z)$ ,  $P(v_1, z + \Delta z)$  и  $P(v_2, z + \Delta z)$  – значения лазерных эхосигналов на частотах зондирования  $v_1$  и  $v_2$  из точек  $z$  и  $z + \Delta z$  по трассе зондирования, регистрируемые приемной системой лидара. Лидарные сигналы описываются с помощью известного уравнения лазерной локации, которое в приближении однократного рассеяния можно представить в виде [1]:

$$P(v, z) = \chi \eta P(v, z_0) \frac{c\tau}{2} A z^{-2} (\beta_m(v, z) + \beta_a(v, z)) \exp \left[ -2 \int_0^z \alpha(v, z) dz \right], \quad (2)$$

где  $\chi$  – пропускание приемной оптики лидара;  $\eta$  – эффективность фотоприемника;  $P(v, z_0)$  – мощность лазерного излучения, посылаемая из места расположения лидара  $z_0$ ;  $c$  – скорость света;  $\tau$  – длительность импульса лазерного излучения;  $A$  – эффективная площадь приемной оптической системы;  $\beta_m(v, z)$  и  $\beta_a(v, z)$  – объемные коэффициенты молекулярного и аэрозольного рассеяния лазерного излучения в направлении назад;  $\alpha(v, z)$  – профиль коэффициента ослабления лазерного излучения, который можно представить в виде суммы коэффициентов ослабления, обусловленных поглощением и рассеянием аэрозолями и молекулами атмосферных газов:

$$\alpha(v, z) = \alpha_{ma}(v, z) + \alpha_{ms}(v, z) + \alpha_{aa}(v, z) + \alpha_{as}(v, z), \quad (3)$$

где  $\alpha_{ms}(v, z)$  – профиль объемного коэффициента ослабления лазерного излучения за счет молекулярного рассеяния;  $\alpha_{aa}(v, z)$  и  $\alpha_{as}(v, z)$  – профили коэффициентов ослабления, обусловленного поглощением и рассеянием атмосферными аэрозолями, со-

ответственно;  $\alpha_{ma}(v, z)$  – профиль объемного коэффициента ослабления лазерного излучения за счет молекулярного поглощения, который можно описать как

$$\alpha_{ma}(v, z) = n(z) \cdot K(v, z), \quad (4)$$

где  $K(v, z)$  – профиль коэффициента поглощения зондирующего лазерного излучения молекулами исследуемого газа, который можно представить в следующем виде:

$$K(v, z) = K_0(z) \cdot \varphi_v(b, \omega), \quad (5)$$

$$K_0(z) = \frac{S(z)}{\gamma_D(z)} \left[ \frac{\ln 2}{\pi} \right]^{0.5}, \quad (6)$$

где  $S(z)$  и  $\gamma_D(z)$  – интенсивность и доплеровская полуширина линии поглощения в точке  $z$ ;  $\varphi_v(b, \omega)$  – форма спектрального контура линии поглощения, которая в общем случае для любых атмосферных высот может быть описана с использованием фойгтовского контура:

$$\varphi_v(z) = \frac{b}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-x^2)}{b^2 + (\omega - x)^2} dx, \quad (7)$$

$$b = \frac{\gamma_L(z)}{\gamma_D(z)} (\ln 2)^{0.5}, \quad \omega = \frac{(v - v_0)}{\gamma_D(z)} (\ln 2)^{0.5}, \quad (8)$$

где  $\gamma_L(z)$  – лоренцевская полуширина линии поглощения вдоль трассы зондирования;  $v_0$  – центр линии поглощения исследуемого газа.

Спектральные параметры  $S(z)$ ,  $\gamma_L(z)$  и  $\gamma_D(z)$  зависят от температуры  $T$  и давления  $P$  атмосферы следующим образом:

$$S(z) = \left[ \frac{T_0}{T(z)} \right]^n \exp \left\{ \frac{hc}{k} E'' \left[ \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T(z)} \right] \right\}, \quad (9)$$

$$\gamma_L(z) = \gamma_0 \frac{P(z)}{P_0} \left[ \frac{T_0}{T(z)} \right]^q, \quad (10)$$

$$\gamma_D(z) = \frac{v_0}{c} \left[ \frac{2kT(z) \ln 2}{m} \right]^{0.5},$$

где  $S_0$  и  $\gamma_0$  – интенсивность и лоренцевская полуширина при температуре  $T_0$  и давлении  $P_0$ ;  $h$  – постоянная Планка;  $k$  – постоянная Больцмана;  $m$  – масса молекулы атмосферного газа;  $q$  – параметр, равный 1 для линейных молекул и 1,5 – для нелинейных молекул;  $E''$  – энергия нижнего состояния поглощающего перехода. Показатель степени  $q$  в формуле (10) согласно газокинетической теории Лоренца равен 1/2. Экспериментальные измерения для линий поглощения различных газов дают значения от  $q=0,24$  до  $q=0,88$ .

Выражения (5)–(10) записаны в приближении монохроматичности лазерного излучения, то есть ширина линии лазерного излучения равна нулю. На практике источники лазерного излучения обладают конечной спектральной шириной лазерного излучения. В этом случае высотные профили коэффициентов поглощения могут быть представлены в следующем виде:

$$K_{eff}(v_1, z) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} I(v_1, v) T_{ma}^2(v, z) K(v, z) dv}{\int_{-\infty}^{\infty} I(v_1, v) T_{ma}^2(v, z) dv}, \quad (11)$$

где  $K(v, z)$  – профили монохроматических коэффициентов поглощения;  $I(v_1, v)$  – спектральное распределение мощности зондирующего импульса лазерного излучения;  $T_{ma}^2(v, z)$  – квадрат пропускания, описываемый в случае учета молекулярного поглощения исследуемым газом как

$$T_{ma}^2(v, z) = \exp \left[ -2 \int_0^z \alpha_{ma}(v, z) dz \right]. \quad (12)$$

Формулы (1)–(12) заложены в основу алгоритма планирования и проведения лидарных измерений профилей МГС атмосферы, представленного на рис. 1.

Алгоритм можно разделить на три составляющие: поисковую, расчетную, а также блок обработки лидарных сигналов. Входными данными являются исследуемый атмосферный газ, пространственное разрешение лидарных измерений, тип трассы зондирования (горизонтальная, вертикальная или наклонная), ширина линии лазерного излучения и другие параметры при необходимости решения конкретной задачи.

Для уверенного определения концентраций газов в атмосфере по МДП необходимо, чтобы используемые для зондирования линии поглощения удовлетворяли следующим требованиям:

- линии или набор рядом расположенных линий поглощения должны иметь интенсивность, достаточную для использования их в лазерном газоанализе по МДП;
- мешающее поглощение другими газами (кроме исследуемого) должно быть мало или хотя бы сравнимо с поглощением зондируемым газом;
- рядом с выбранной линией поглощения должно присутствовать окно прозрачности, в котором поглощение исследуемым газом пренебрежимо мало;
- необходимо, чтобы как линии поглощения, так и окно прозрачности с хорошей точностью совпадали с удобной с технической точки зрения частотой (длиной волны) лазерного излучения.

Указанные критерии легли в основу разработки программного модуля, используемого при поиске информативных для зондирования по МДП линий поглощения газовых компонент атмосферы.

В поисковом блоке самым большим по объему используемой памяти является атлас линий поглощения атмосферных газов [14]. Метеомодели взяты из [15, 16], используется также информация об аэрозольном ослаблении, коэффициенте обратного рассеяния и молекулярном рассеянии [17].

Расчетный блок позволяет решать следующие взаимосвязанные задачи:

- расчет коэффициентов поглощения и спектров пропускания атмосферы;



Рис. 1. Схема алгоритма планирования и проведения лидарных измерений профилей МГС атмосферы

Fig. 1. Diagram of algorithm of planning and lidar measuring of atmosphere gas component profiles

- численное моделирование зондирования профилей МГС атмосферы;
- расчет систематических ошибок восстановления профилей атмосферных газов;
- расчет случайных ошибок восстановления профилей МГС атмосферы;
- выработка требований к параметрам лидара.

С учетом результатов численного моделирования и оценки погрешностей измерений производится выработка требований к метеорологическому лидару дифференциального поглощения (ширина линии лазерного излучения, частота повторения импульсов, точность измерения длины волны и др.). Используя данный алгоритм, можно найти длины волн, которые являются наиболее информативными с точки зрения лидарных измерений метеопараметров атмосферы методом дифференциального поглощения.

Описанный выше алгоритм реализован в программно-алгоритмической системе для лазерного дистанционного зондирования МГС по МДП. Интерфейс системы «LIDAS» представлен на рис. 2.

Таким образом, разработанная система «LIDAS» позволяет определить информативные, с

точки зрения газоанализа, длины волн лазерного зондирования различных МГС атмосферы, токсичных и взрывоопасных газов и сечения поглощения для частот излучения различных лазеров. С ее помощью можно проводить численное моделирование лидарного зондирования МГС атмосферы, оценивать систематические ошибки восстановления профилей атмосферных газов, выработать требования к лидарам дифференциального поглощения, а также планировать и проводить эксперименты по лидарным измерениям профилей МГС атмосферы.

Система «LIDAS» была использована для поиска длин волн зондирования МГС атмосферы в наиболее информативной с точки зрения лазерного газоанализа средней ИК-области спектра. Рассматривались возможности использования в качестве источника лазерного излучения оберточного СО-лазера [18–20].

Результаты поиска информативных длин волн, пригодных для зондирования МГС атмосферы с помощью оберточного СО-лазера, представлены в табл. 1, в которой указаны центры линий поглощения атмосферных газов  $\nu_{\text{полд}}$  и ближайшие к ним



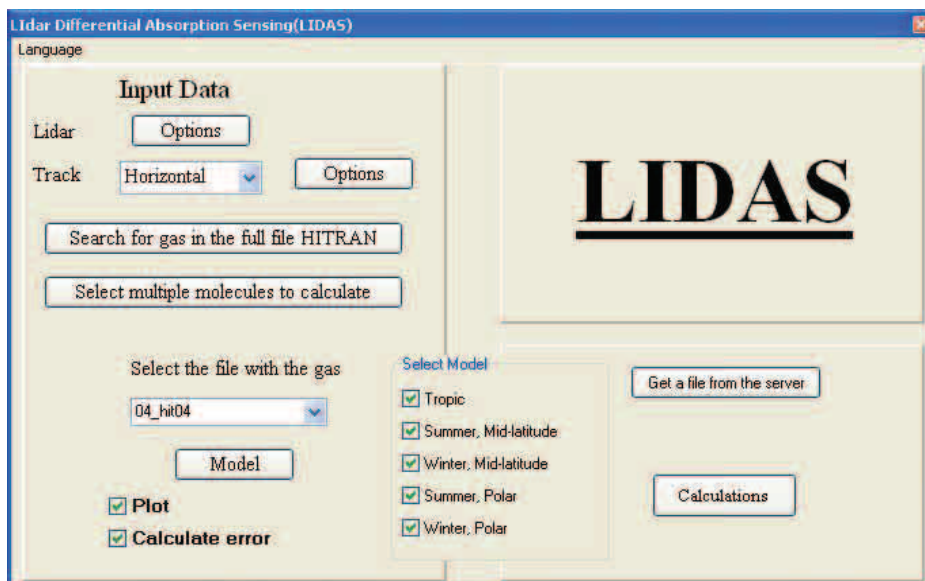


Рис. 2. Интерфейс программно-алгоритмической системы для лазерного дистанционного зондирования МГС по МДП системы «LIDAS»

Fig. 2. Interface of program algorithm system for laser remote sensing of gas components by the differential absorption method of the system «LIDAS»

центры линий излучения  $\nu_{изл}$ , а также величина отстройки  $\Delta\nu$  между центрами линий поглощения и излучения. В табл. 1 также представлены коэффициенты пропускания  $T_{МГС}$  на приземной трассе 1 км при поглощении только исследуемым газом и коэффициент пропускания мешающих газов  $T_{меш.погл.}$  который рассчитывался по линиям поглощения, расположенным на расстоянии не более  $10\text{ см}^{-1}$  от центра лазерной линии.

Таблица 1. Информативные длины волн, наиболее пригодные для зондирования малых газовых составляющих атмосферы излучением обертонного СО-лазера

Table 1. Informative wave lengths suitable most of all for sensing atmosphere gas components by overtone CO-laser radiation

Газ/ Gas	$\lambda_{изл.},$ МКМ	$\nu_{изл.},$ $\text{CM}^{-1}$	$\lambda_{погл.},$ МКМ	$\nu_{погл.},$ $\text{CM}^{-1}$	$\Delta\nu,$ $\text{CM}^{-1}$	$T_{МГС}$	$T_{меш.погл.}$
CH <sub>4</sub>	3,44030	2906,723	3,44037	2906,664	0,059	0,80	0,93
N <sub>2</sub> O	3,87790	2578,715	3,87789	2578,719	0,0042	0,70	0,96
H <sub>2</sub> CO	3,56340	2806,309	3,56332	2806,371	0,062	0,60	0,98
NO <sub>2</sub>	3,42820	2916,983	3,42823	2916,956	0,027	0,70	0,80

Для оценки возможностей лидарного зондирования МГС атмосферы с помощью выбранных в результате проведенного поиска информативных длин волн в диапазоне генерации обертонного СО-лазера (табл. 1) был проведен расчет эхо-сигналов для вертикальной трассы. Учитывалось мешающее поглощение всех основных атмосферных газовых компонент, концентрация зондируемой газовой компоненты полагалась равной  $1\text{ млн}^{-1}$ . Входные данные для проведения численного моделирования представлены в табл. 2.

На рис. 3 представлены рассчитанные для вертикальных трасс пространственно и спектрально разрешенные лидарные эхо-сигналы в области выбранных длин волн зондирования некоторых рассматриваемых в данной работе МГС атмосферы.

Таблица 2. Входные данные для проведения численного моделирования лидарного зондирования МГС атмосферы с помощью обертонного СО-лазера

Table 2. Output data for numerical simulation of lidar sensing of atmosphere gas components by overtone CO-laser

Параметр лидарной системы Lidar system parameter	Значение параметра Parameter value
Площадь приемника $A_{приемн.}$ ( $D=0,3\text{ м}$ )/ Receiver area	700 $\text{cm}^2$
Ширина аппаратной функции/ Instrument function width	0,01 $\text{cm}^{-1}$
Эффективность приемной системы/ Receiving system efficiency	0,3
Пространственное разрешение $\Delta R$ / Space resolution	1 км
Пиковая мощность лазера/ Laser peak output	20·10 <sup>3</sup> Вт
Диапазон перестройки лазера/ Laser rearrangement range	2,5–4,2 мкм
Коэффициент обратного аэрозольного рассеяния $\beta_z$ / Coefficient of reverse aerosol scattering	2,3·10 <sup>-3</sup> км <sup>-1</sup>
NEP фотодетектора/ NEP of photo detector	1·10 <sup>-9</sup> Вт

Из рис. 3 видно, что во всем рассматриваемом диапазоне высот 0–5 км уровень лидарных эхо-сигналов для всех исследуемых газов превышает уровень эквивалентной мощности шума фотоприемника  $NEP=10^{-9}$  Вт.

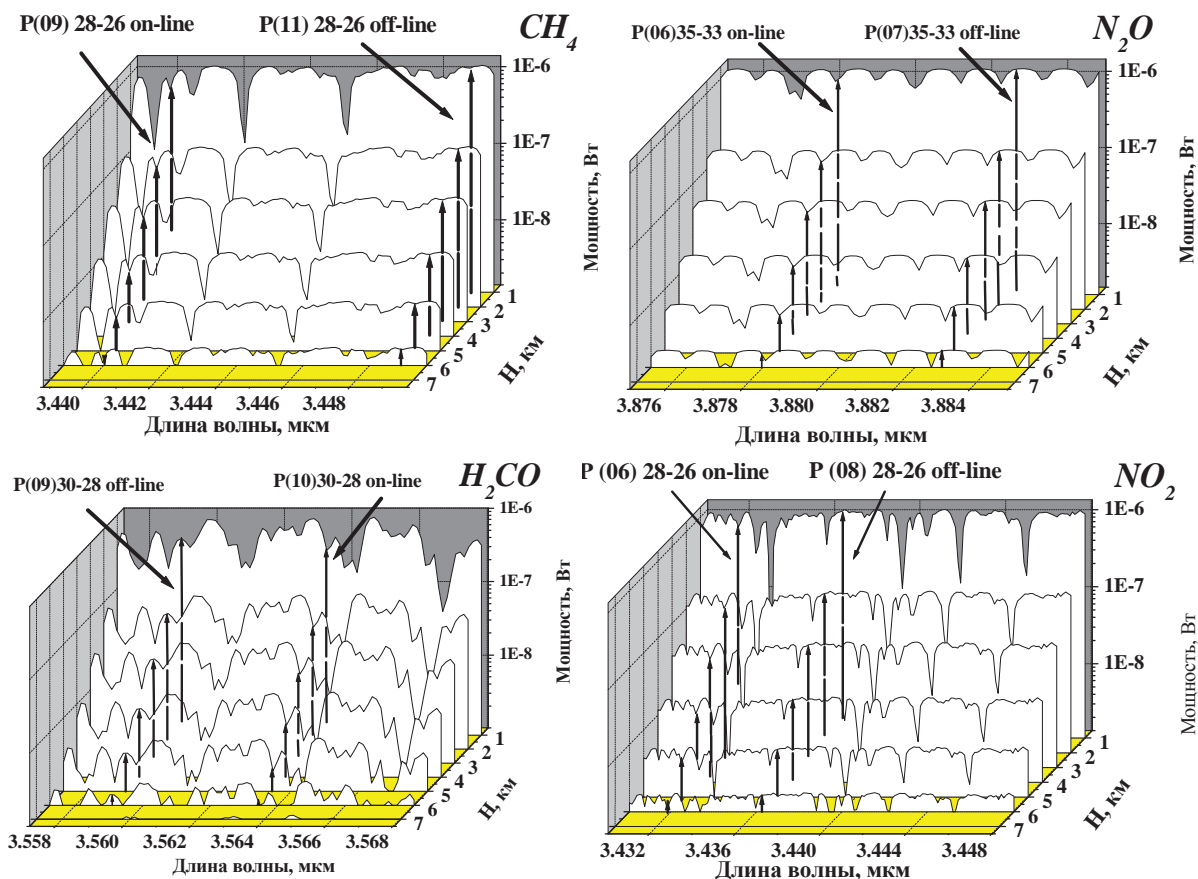


Рис. 3. Пространственно и спектрально разрешенные лидарные эхо-сигналы в области выбранных длины волны зондирования МГС атмосферы

Fig. 3. Space and spectral resolved lidar echo-signals within the selected wave length of atmosphere gas component sensing

На выбранных с помощью разработанной системы «LIDAS» длинах волн для зондирования метана в области спектра 3,440 мкм и закиси азота – 3,877 мкм (табл. 1) проведены лабораторные эксперименты по лазерному зондированию этих МГС атмосферы при реализации трассовой схемы МДП.

Измерение поглощения и суммарного ослабления рассеянного от топографической мишени излучения, прошедшего через среду с исследуемым газом, проводилось с помощью калориметров «ORHIR 3A-SH» и криогенных фоторезисторов «СВОД». Оптическая схема экспериментов по измерению коэффициента поглощения и коэффициента ослабления излучения обертонового СО-лазера в метане и закиси азота представлена на рис. 4.

Лазерный резонатор обертонового СО-лазера был образован сферическим зеркалом и дифракционной решеткой (420 штр./мм), работающей в режиме автоколлимации в первом порядке дифракции и выводящей излучение в нулевой порядок. Апертура лазерного пучка определялась внутрирезонаторной диафрагмой диаметром 25 мм. Для юстировки лазерного резонатора применялся He-Ne-лазер. Изменение спектральной линии излучения лазера осуществлялось поворотом дифракционной решетки.

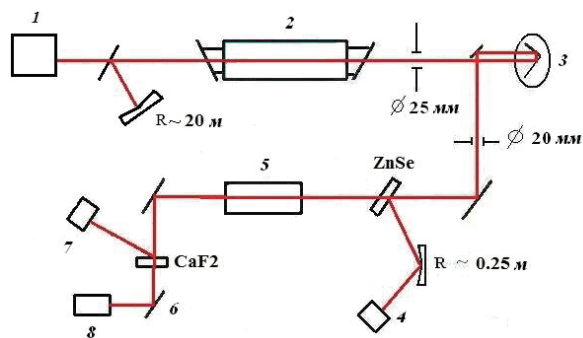


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для измерения поглощения, а также ослабления рассеянного от топографической мишени излучения, прошедшего через среду с исследуемым газом (1 – He-Ne-лазер; 2 – СО-лазер; 3 – дифракционная решетка; 4 – калориметр Ophir 3A-SH; 5 – поглощающая кювета (L=10 см); 6 – топоцель; 7 – ИКС/ калориметр Ophir 3A-SH; 8 – фоторезистор «СВОД»)

Fig. 4. Diagram of the experimental unit for measuring absorption and attenuation of radiation diffused from topographic target and got through the medium with the gas (1 – He-Ne-laser; 2 – CO-laser; 3 – diffraction grid; 4 – calorimeter Ophir 3A-SH; 5 – absorbing cell (L=10 cm); 6 – topographic aim; 7 – IR-spectrometer/calorimeter Ophir 3A-SH; 8 – photoresistance cell «SVOD»)

В данной конфигурации схемы в кювету длиной 10 см при давлении 1 атм напускалась смесь газов: исследуемые газовые составляющие с азотом ( $N_2O:N_2$ ,  $CH_4:N_2$ ) в пропорции 1:24, при концентрации поглощающего газа 4 %. Для измерения энергии лазерного импульса  $E_0$  часть лазерного излучения, прошедшего диафрагму диаметром 20 мм, направлялась на первый калориметр посредством отражения от плоскопараллельной пластины из ZnSe. После прохождения лазерного луча через кювету часть излучения направлялась на второй калориметр/ИКС (инфракрасный спектрометр) посредством отражения от плоскопараллельной пластины  $CaF_2$ . Второй калориметр измерял энергию лазерного луча  $E$ , прошедшего через поглощающую кювету. Поглощение излучения вычислялось в соответствии с законом Бугера–Ламберта–Бэра. Другая часть лазерного излучения направлялась на топоцель, расположенную вслед за пластиной  $CaF_2$ . В качестве топоцели использовался диффузно-рассеивающий отражатель с альбедо 0,8. Фоторезистором «СВОД» регистрировалась энергия излучения, прошедшего через среду с исследуемым газом, и терявшаяся часть излучения при отражении от топоцели. Результаты расчета и измерений поглощения и ослабления для закиси азота и метана представлены в табл. 3, 4.

**Таблица 3.** Результаты расчета и измерений поглощения и ослабления для закиси азота

**Table 3.** Results of calculation and measurement of absorption and attenuation for nitrogen oxide

Длина волны в воздухе, мкм Wave length in the air, $\mu m$	Лазерный переход ( $V+2 \rightarrow V$ ) Laser transition	Коэфф. поглощения, $cm^{-1}$ (расчет) Absorption coefficient (calculation)	Коэфф. поглощения, $cm^{-1}$ (эксперимент) Absorption coefficient (experiment)	Коэфф. ослабления, $cm^{-1}$ (эксперимент) Attenuation coefficient (experiment)
3,841	32	0,0014	0,0095	–
3,852	32	0,0067	0,0004	0,0129
3,877	33	0,1178	0,0953	0,1202
3,892	33	0,0209	0,0502	–
3,897	33	0,0102	0,0072	–
3,907	33	0,0508	0,0262	0,0029
3,918	33	0,0307	0,0223	0,0066
3,930	33	0,0061	0,0014	0,0185

Из приведенных в таблицах экспериментальных данных по измерению поглощения и ослабления видно, что измеренные (поглощение и ослабление) и рассчитанные (поглощение) значения находятся в удовлетворительном согласии во всем спектральном интервале, в котором произведены измерения. Некоторые расхождения расчета и измерений поглощения метана можно объяснить влиянием остаточного мешающего поглощения водяного пара в измерительной кювете либо (для расчета коэффициента ослабления) неоднородностью рассеянного от топоцели лазерного излучения, прошедшего через среду с исследуемой смесью газов. Стоит также учитывать погрешность измере-

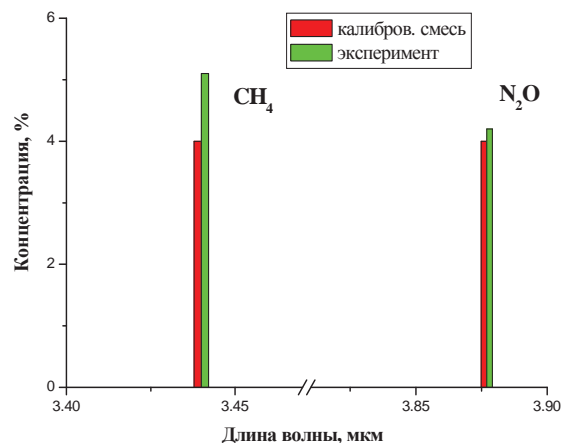
ния величины энергии излучения калориметром ОРНІR 3A-SH, которая не превышает 5 %.

**Таблица 4.** Результаты расчета и измерений поглощения и рассеяния для метана

**Table 4.** Results of calculation and measurements of absorption and diffusion for methane

Длина волны в воздухе, мкм Wave length in the air, $\mu m$	Лазерный переход ( $V+2 \rightarrow V$ ) Laser transition	Коэфф. поглощения, $cm^{-1}$ (расчет) Absorption coefficient (calculation)	Коэфф. поглощения, $cm^{-1}$ (эксперимент) Absorption coefficient (experiment)	Коэфф. ослабления, $cm^{-1}$ (эксперимент) Attenuation coefficient (experiment)
3,328	24	0,0025	–	0,0090
3,336	24	0,0005	0,00462	0,0151
3,345	24	0,0381	0,0199	0,0276
3,432	26	0,0003	0,0029	–
3,440	26	0,0247	0,0078	0,0564
3,444	26	0,0011	–	0,0563
3,453	26	0,1159	0,1040	0,1733

Для выбранных при работе по топоцели длин волн зондирования метана и закиси азота была решена обратная задача восстановления концентраций данных МГС в поглощающей кювете 10 см с помощью оберточного СО-лазера при анализе полученных в ходе выполнения эксперимента коэффициентов поглощения. Результаты восстановления концентрации и сравнение с теоретическими данными представлены на рис. 5.



**Рис. 5.** Восстановление концентраций закиси азота и метана при работе на выбранных длинах волн зондирования излучением оберточного СО-лазера

**Fig. 5.** Recovery of nitrogen oxide and methane concentrations when operating at the selected wave lengths of sensing by the overtone CO-laser

Из рисунка видно, что на решение обратной задачи восстановления концентраций большое влияние оказывает точность измерения коэффициентов поглощения исследуемых МГС.

Проведенные на основе численного моделирования тестовые лабораторные эксперименты по измерению поглощения и ослабления линий излучения оберточного СО-лазера в смесях с исследуемы-

ми газами дают приемлемое соответствие рассчитанных значений с измеренными, кроме нескольких неинформативных длин волн, что позволяет применять разработанную методику поиска длин волн при реализации метода дифференциального поглощения. Достоверность полученных результатов подтверждается решением обратной задачи по восстановлению концентраций исследуемых газовых компонентов при анализе полученных в ходе выполнения эксперимента коэффициентов поглощения.

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. Разработанная программно-аналитическая система «LIDAS» позволяет определить информативные длины волн лазерного зондирования различных МГС атмосферы, с ее помощью можно проводить численное моделирование лидарного зондирования МГС атмосферы, оценивать систематические ошибки восстановления профилей атмосферных газов, вырабатывать требования к лидарам дифференциального поглощения, а также планировать и проводить эксперименты по лидарным измерениям профилей МГС атмосферы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энгель М.В., Афонин С.В., Белов В.В. Web-ресурс для атмосферной коррекции спутниковых данных // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 5. – С. 94–99.
  2. Васильев Б.И., Маннун У.М. ИК лидары дифференциального поглощения для экологического мониторинга окружающей среды // Квантовая электроника. – 2006. – Т. 36. – № 9. – С. 801–820.
  3. Андреев Ю.М., Гейко П.П., Самохвалов И.В. Зондирование газовых загрязнений атмосферы методом дифференциального поглощения в ИК-области спектра // Оптика атмосферы и океана. – 2003. – Т. 16. – № 9. – С. 782–791.
  4. Weitkamp C. Lidar. Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere. – Berlin: Springer, 2005. – 460 p.
  5. Дистанционное зондирование закиси азота и метана с использованием линий излучения обертонового СО-лазера / А.А. Ионин, Ю.М. Климачев, А.Ю. Козлов, А.А. Котков, О.А. Романовский, О.В. Харченко, С.В. Яковлев // Журнал прикладной спектроскопии. – 2014. – Т. 81. – № 2. – С. 313–316.
  6. Romanovskii O.A. Airborne DIAL Lidar Gas Analysis of the Atmosphere by Middle IR Gas Lasers: Numerical Modeling // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2008. – V. 17. – № 2. – P. 131–137.
  7. The Possibilities of a Strontium Vapor Laser Using for Laser Sensing of Minor Gaseous Components of the Atmosphere / A.V. Vasiljeva, Yu.P. Polunin, O.A. Romanovskii, A.N. Soldatov, O.V. Kharchenko, N.A. Yudin // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2009. – V. 19. – № 2. – P. 142–149.
  8. Geiko P.P., Tikhomirov A.A. Remote Measurement of Chemical Warfare Agents by Differential Absorption CO<sub>2</sub> Lidar // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2011. – V. 20. – № 1. – P. 71–75.
  9. Лидарные технологии дистанционного зондирования параметров атмосферы / В.Д. Бурлаков, С.И. Долгий, А.П. Макеев, Г.Г. Матвиенко, А.В. Невзоров, А.Н. Солдатов, О.А. Романовский, О.В. Харченко, С.В. Яковлев // Оптика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 26. – № 10. – С. 829–837.
  2. Проведенное с помощью системы «LIDAS» численное моделирование показало, что при использовании лидара на основе обертонового СО-лазера в диапазоне высот 0–5 км при диаметре приемной оптики 0,3 м и пространственном разрешении 1 км уровень лидарных эхо-сигналов для всех исследуемых газов превышает уровень эквивалентной мощности шума фотоприемника NEP=10<sup>-9</sup> Вт.
  3. Эксперименты по лазерной диагностике газового состава атмосферы обертонным СО-лазером подтвердили результат предварительной оценки эффективности применения МДП с учетом требований к спектрально-энергетическим параметрам зондирующего комплекса, рассчитанных разработанной программно-алгоритмической системой «LIDAS».
- Работа выполнена при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 13-05-98074-р\_сибирь-а), Российского научного фонда (Соглашение № 14-27-00022 в части проведения численного моделирования лидарного зондирования), гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-4714.2014.5 и программы повышения конкурентоспособности ТГУ (Tomsk State University Competitiveness Improvement Program).*
10. Романовский О.А., Харченко О.В., Яковлев С.В. Методические аспекты лидарного зондирования малых газовых составляющих атмосферы по методу дифференциального поглощения // Журнал прикладной спектроскопии. – 2012. – Т. 79. – № 5. – С. 799–805.
  11. Simulation of gas analysis of the atmosphere by long path method: Computer Code LPM / V.V. Zuev, A.A. Mitsel', M.Yu. Kataev, I.V. Ptashnik, K.M. Firsov // Computers in Physics. – 1995. – V. 9. – № 6. – P. 649–656.
  12. The Computer Code SAGDAM for Simulating the Laser Sounding of Atmospheric Gases / K.M. Firsov, I.V. Ptashnik, V.V. Zuev, M.Yu. Kataev, A.A. Mitsel' // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 1999. – V. 61. – № 1. – P. 25–37.
  13. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование / пер. с англ. И.Г. Городецкого, В.В. Филюшкина / под ред. А.Б. Карасева. – М.: Мир, 1987. – 550 с.
  14. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database / L.S., Rothman I.E. Gordon, A. Barbe, D.Ch. Benner, P.F. Bernath, M. Birk, V. Boudon, L.R. Brown, A. Campargue, J.P. Champion, K. Chance, L.H. Coudert, V. Dana, V.M. Devi, S. Fally, J.M. Flaud, R.R. Gamache, A. Goldman, D. Jacquemart, I. Kleiner, N. Lacome, W.J. Lafferty, J.Y. Mandin, S.T. Massie, S. Mikhailenko, C.E. Miller, N. Moazzen-Ahmadi, O.V. Naumenko, A. Nikitin, J. Orphal, A. Predoi-Cross, V. Perevalov, A. Perrin, C.P. Rinsland, M. Rotger, M. Simeckov, M.A.H. Smith, K. Sung, S. Tashkun, J. Tennyson, R.A. Toth, A.C. Vandaele, J.V. Auwera // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2009. – № 110. – P. 532–572.
  15. Optical properties of atmosphere. Report AFCRL-71-0297 / R.A. McClatchey, R.W. Fenn, J.E.A. Selby, F.E. Volz, J.S. Garling. – Bedford: Mass, 1971. – 86 p.
  16. Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 264 с.
  17. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. – Новосибирск: Наука, 1982. – 199 с.
  18. Wideband CO laser in problems of laser sensing of minor gaseous components in the atmosphere / A.A. Ionin, Yu.M. Klimachev,



- A.Yu. Kozlov, A.A. Kotkov, O.A. Romanovskii, L.V. Seleznev, D.V. Sinityn, O.V. Kharchenko, A.V. Shelestovich, S.V. Yakovlev // *Russian Physics Journal*. – 2008. – V. 51. – № 11. – P. 1200–1207.
19. Resonant absorption of first-overtone CO laser radiation by atmospheric water vapor and pollutants / O.G. Buzykin, A.A. Ionin, S.V. Ivanov, A.A. Kotkov, L.V. Seleznev, A.V. Shustov // *Laser and Particle Beams*. – 2000. – № 18. – P. 697–713.
20. Multiline Laser Probing for Active Media CO: He, CO: N<sub>2</sub>, and CO: O<sub>2</sub> in Wide-Aperture Pulsed Amplifier / A. Ionin, Yu. Klimachev, A. Kotkov, A. Kozlov, O. Rulev, L. Seleznev, D. Sinityn, S. Vetoshkin // *Journal of Russian Laser Research*. – 2006. – V. 27. – № 1. – P. 33–69.

UDC 551.510.532; 551.501.816

Поступила 13.05.2014 г.

## LIDAR SOUNDING OF ATMOSPHERE TRACE GASES BY THE DIFFERENTIAL ABSORPTION METHOD: SIMULATION AND EXPERIMENT RESULTS

**Dmitrii A. Bochkovskii,**

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Academician Zuev square, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: moto@iao.ru

**Oleg A. Romanovskii,**

Dr. Sc., V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Academician Zuev square, Tomsk, 634021, Russia; National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: roa@iao.ru

**Olga V. Kharchenko,**

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Academician Zuev square Tomsk, 634021, Russia. E-mail: olya@iao.ru

**Semen V. Yakovlev,**

Cand. Sc., V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Academician Zuev square, Tomsk, 634021, Russia; National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: ysv@iao.ru

*Relevance of the research is caused by the necessity to develop laser sensing methods for solving the environment monitoring problem.*

**The main aim of the study** is the development of the program-algorithmic system for laser remote sensing of gas components in atmosphere using differential absorption, the search of the informative wavelengths, simulation of gas remote sensing and experiments at selected wavelengths for remote sensing of atmosphere gas components.

**The methods used in the study:** differential absorption method based on resonant absorption of laser radiation within a selective absorption line of the analyzed gas component.

**The results:** The developed program-algorithmic system «LIDAS» allows determining informative wavelengths for laser remote sensing of atmosphere gas components and simulating as well the remote sensing of gases in atmosphere; estimating systematic errors of atmospheric gas profiles reduction; working out requirements for differentiation absorption lidars; planning and carrying out the experiments on lidar measurements of gas profiles. The numerical simulation showed that when using lidar based on overtone CO-laser in the 0–5 km height region at diameter of the receiving optics 0,3 m and spatial resolution of 1 km the echo-signal level for all measured gases exceeds the level of the NEP=10<sup>-9</sup> W. The experiments on laser diagnostics of atmosphere gas components by overtone CO-laser confirmed the results of preliminary evaluation of the efficiency of applying differential absorption considering the requirements of spectral energy parameters of sensing complex, computed by the developed algorithmic system «LIDAS».

### **Key words:**

Lidar, gas analysis, atmosphere, differential absorption.

*The research was supported by Russian Foundation for Basic Research (RFFI grant № 13–05–98074-r\_sibir-a), the Russian science Foundation (Agreement № 14–27–00022 to conduct numerical simulation of lidar sensing), grant of the President of the RF on support of leading scientific schools SS-4714.2014.5 and the program of competitive growth TSU (Tomsk State University Competitiveness Improvement Program).*

## REFERENCES

- Engel M.V., Afonin S.V., Belov V.V. Web-resources dlya atmosferynoy korrektsii sputnikovykh dannyykh [Web resource for atmospheric correction of satellite data]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 318, no. 5, pp. 94–99.
- Vasilev B.I., Mannun U.M. IR differential-absorption lidars for ecological monitoring of the environment *Quantum Electronics*, 2006, vol. 36, no. 9, pp. 801–820. DOI: 10.1070/QE2006v036n09AB-EH006577
- Andreev Yu.M., Geiko P.P., Samokhvalov I.V. Sensing of gaseous atmospheric pollutants by DIAL technique in the IR spectral region. *Atmospheric and oceanic optics*, 2003, vol. 16, no. 09, pp. 721–728.
- Weitekamp C. Lidar. Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere. Berlin, Springer, 2005. 460 p.
- Ionin A.A., Klimachev Yu.M., Kozlov A.Yu., Kotkov A.A., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V., Yakovlev S.V. Remote Sensing of Nitrous Oxide and Methane Using Emission Lines of a CO Overtone Laser. *Journal of applied spectroscopy*, 2014, vol. 81, no. 2, pp. 309–312.
- Romanovskii O.A. Airborne DIAL Lidar Gas Analysis of the Atmosphere by Middle IR Gas Lasers: Numerical Modeling. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, 2008, vol. 17, no. 2, pp. 131–137.
- Vasiljeva A.V., Polunin Yu.P., Romanovskii O.A., Soldatov A.N., Kharchenko O.V., Yudin N.A. The Possibilities of a Strontium Vapor Laser Using for Laser Sensing of Minor Gaseous Components of the Atmosphere. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, 2009, vol. 19, no. 2, pp. 142–149.
- Geiko P.P., Tikhomirov A.A. Remote Measurement of Chemical Warfare Agents by Differential Absorption CO<sub>2</sub> Lidar. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, 2011, vol. 20, no. 1, pp. 71–75.
- Burlakov V.D., Dolgii S.I., Makeev A.P., Matvienko G.G., Nevzorov A.V., Soldatov A.N., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V., Yakovlev S.V. Lidarnye tehnologii distantsionnogo zondirovaniya parametrov atmosfery [Lidar technologies for remote sensing of atmospheric parameters]. *Optika atmosfery i okeana*, 2013, vol. 26, no. 10, pp. 829–837.
- Romanovskii O.A., Kharchenko O.V., Yakovlev S.V. Methodological aspects of lidar sounding of trace gases of the atmosphere by differential absorption. *Journal of applied spectroscopy*, 2012, vol. 79, no. 5, pp. 793–800.
- Zuev V.V., Mitsel' A.A., Kataev M.Yu., Ptashnik I.V., Firsov K.M. Simulation of gas analysis of the atmosphere by long path method: Computer Code LPM. *Computers in Physics*, 1995, vol. 9, no. 6, pp. 649–656.
- Firsov K.M., Ptashnik I.V., Zuev V.V., Kataev M.Yu., Mitsel' A.A. The Computer Code SAGDAM for Simulating the Laser Sounding of Atmospheric Gases. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1999, vol. 61, no. 1, pp. 25–37.
- Measures R.M. *Laser Remote Sensing*. New York, Wiley, 1984. 510 p.
- Rothman L.S., Gordon I.E., Barbe A., Benner D.Ch., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Brown L.R., Campargue A., Champion J.P., Chance K., Coudert L.H., Dana V., Devi V.M., Fally S., Flaud J.M., Gamache R.R., Goldman A., Jacquemart D., Kleiner I., Lacombe N., Lafferty W.J., Mandin J.Y., Massie S.T., Mikhailenko S., Miller C.E., Moazzen-Ahmadi N., Naumenko O.V., Nikitin A., Orphal J., Predoi-Cross A., Perevalov V., Perrin A., Rinsland C.P., Rotger M., Simeckov M., Smith M.A.H., Sung K., Tashkun S., Tennyson J., Toth R.A., Vandaele A.C., Auwera J.V. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, no. 110, pp. 532–572.
- McClatchey R.A., Fenn R.W., Selby J.E.A., Volz F.E., Garing J.S. *Optical properties of atmosphere. Report AFCRL-71-0297*. Bedford, Mass, 1971. 86 p.
- Zuev V.E., Komarov V.S. *Statisticheskie modeli temperatury i gazovykh komponent atmosfery* [Statistical model of temperature and gaseous components of the atmosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1986. 264 p.
- Krekov G.M., Rakhimov R.F. *Optikolokatsionnaya model kontinentalnogo aerosolya* [Optic-localational model of continental aerosol]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1982. 199 p.
- Ionin A.A., Klimachev Yu.M., Kozlov A.Yu., Kotkov A.A., Romanovskii O.A., Seleznev L.V., Sinityn D.V., Kharchenko O.V., Shelestovich A.V., Yakovlev S.V. Wideband CO laser in problems of laser sensing of minor gaseous components in the atmosphere. *Russian Physics Journal*, 2008, vol. 51, no. 11, pp. 1200–1207.
- Buzykin O. G., Ionin A. A., Ivanov S. V., Kotkov A.A., Seleznev L.V. and Shustov A.V. Resonant absorption of first-overtone CO laser radiation by atmospheric water vapor and pollutants. *Laser and Particle Beams*, 2000, no. 18, pp. 697–713.
- Ionin A., Klimachev Yu., Kotkov A., Kozlov A., Rulev O., Seleznev L., Sinityn D., Vetoshkin S. Multiline Laser Probing for Active Media CO: He, CO: N<sub>2</sub>, and CO: O<sub>2</sub> in Wide-Aperture Pulsed Amplifier. *Journal of Russian Laser Research*, 2006, vol. 27, no. 1, pp. 33–69.

Received: 13 may 2014.

УДК 535.8

## ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ АКУСТООПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРАХ

**Белоусов Андрей Петрович,**

канд. физ.-мат. наук, доцент каф. общей физики факультета радиотехники и электроники ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.  
E-mail: abelousov@ngs.ru

**Белоусов Петр Яковлевич,**

канд. техн. наук, доцент каф. оптических информационных технологий факультета физико-технического факультета ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: pyabelousov@ngs.ru

**Борыняк Леонид Александрович,**

д-р физ.-мат. наук, профессор каф. общей физики факультета радиотехники и электроники ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: borynyak-leonid@mail.ru

*Актуальность работы обусловлена необходимостью эффективного использования твердотельных акустооптических модуляторов в широком диапазоне технических устройств, таких как дефлекторы, устройства смещения частоты и развертки, делители оптических пучков, лазерные доплеровские анемометры и многих других.*

**Цель работы:** изучение температурной динамики твердотельных акустооптических модуляторов бесконтактными оптическими методами. Обоснование использования коммутационных режимов работы акустооптических модуляторов в технических устройствах. Определение диапазона применимости и возможных погрешностей при эксплуатации.

**Методы исследования:** измерение сдвига фазы световой волны, обусловленного тепловым изменением оптической плотности и геометрических параметров рабочей области твердотельного акустооптического модулятора. Оценка интегрального изменения температуры в зависимости от времени и положения зондирующего пучка в звукопроводе. Реализуется двухлучевая схема интерферометра. Излучение гелий-неонового лазера с длиной волны  $\lambda=632,8$  нм мощностью 0,5 мВт разбивается на два пучка светоделительным кубиком. В один из пучков помещается акустооптический модулятор. Сдвиг фаз, вызванный изменением оптической плотности и геометрических параметров исследуемого объекта, фиксируется по смещению интерференционных полос. Методы анализа изображений, интерферометрии, фотометрии, акустооптики, материаловедения, когерентной оптики, лазерной физики.

**Результаты:** измерен сдвиг фазы световой волны, обусловленный изменением оптической плотности и толщины объекта. Проведена оценка интегрального изменения температуры в зависимости от времени и положения зондирующего пучка в звукопроводе твердотельного акустооптического модулятора. Определено время выхода устройства на стационарный режим. Результаты исследования показали, что максимальная величина погрешности измерения скорости потоков с низкой частотой следования светорассеивающих трассеров при использовании коммутационного режима работы твердотельного модулятора в лазерных доплеровских анемометрах будет равняться 0,5 %. Повышение точности может быть достигнуто путем применения корректирующих алгоритмов.

### **Ключевые слова:**

Твердотельные акустооптические модуляторы, интерферометрия, дифракция, акустические волны, температурные градиенты, 3D лазерные доплеровские анемометры, ультразвук, режим коммутации, стационарный режим, оптическая плотность, температурное расширение, сдвиг фазы.

### **Введение**

В современных лазерных доплеровских измерителях скорости [1–5] смещение частоты доплеровского сигнала в удобную для обработки область осуществляется при помощи акустооптических модуляторов (АОМ) [6]. Это позволяет расширить динамический диапазон доплеровских систем и провести оптимальную фильтрацию сигнала от аддитивной составляющей. Помимо смещения частоты АОМ расщепляют лазерные пучки с необходимым соотношением интенсивностей [1–9].

В металлургии используют лазерные измерители скорости и длины проката с полупроводниковыми лазерами [1], нестабильность длины волны которых составляет 0,5 % [10]. Если не применять специальных мер, то относительная погрешность измерения скорости и длины объектов будет определяться данной величиной. Применение дифракционных расщепителей в лазерных доплеровских измерителях скорости и длины объектов позволяет решить эту проблему. АОМ, являясь модулятором, работающим по принципу дифракции свето-

вой волны на бегущей фазовой решетке, хорошо подходит для работы в приборах с полупроводниковыми лазерами. В таких системах измерения скорости и длины объектов потенциальная относительная погрешность определения скорости зависит главным образом от относительной нестабильности скорости звука в звукопроводе АОМ. В связи с этим исследование тепловых характеристик АОМ, определяющих относительную стабильность скорости ультразвуковой волны в модуляторе, является актуальной задачей. Следует заметить, что предъявляемые требования к точности работы современных измерителей скорости и длины (относительная погрешность измерения не превышает 0,1 %) диктуют необходимость учитывать тепловые эффекты в АОМ, приводящие к относительно нестабильности скорости звука порядка 0,01...0,1 %.

В некоторых схемах доплеровских измерителей 3-D вектора скорости объектов АОМ работает в коммутационном режиме, что позволяет использовать один фотоприемник и надежно «развязать» измеряемые компоненты от взаимного влияния. При этом в каждый момент времени измеряется одна из ортогональных компонент вектора скорости. На таком принципе работает лазерный доплеровский измеритель скорости с адаптивной временной селекцией компонент скорости ЛДА АВС [2]. Если скорости объектов (потоков жидкостей и газов) малы или режим течения нестационарный, время между переключениями измеряемых компонент может оказаться достаточно большим, что приведет к смене теплового режима (средняя температура и пространственное распределение температур) в звукопроводе АОМ. Это в свою очередь может вызвать значительные ошибки при измерении компонент вектора скорости. В связи с этим измерение динамики изменения оптической плотности активной зоны звукопровода АОМ является чрезвычайно важной и актуальной задачей, так как позволяет оценить возможные ошибки изме-

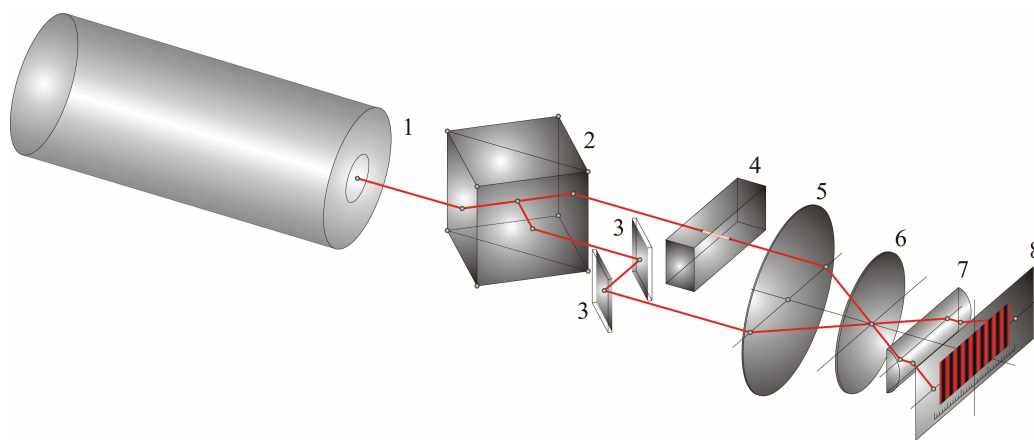
рения при работе системы в коммутационных режимах. Следует добавить, что требования к точности устройств непрерывно увеличиваются, при этом потребность в точной информации о работе АОМ также со временем возрастает. Решения задач, встающих перед разработчиками лазерных доплеровских измерителей скорости в связи с использованием АОМ, могут быть полезными и в других сферах (дальномеры, системы развертки и т. д.) [11–18]. Принципы работы акустооптических модуляторов подробно описаны в соответствующей литературе [6] и поэтому рассматриваться в данной статье не будут.

При эксплуатации твердотельных АОМ в измерительных системах с коммутацией [2, 19] тепловые эффекты могут приводить к снижению точности. Цель данного исследования – изучение тепловых процессов, сопровождающих работу твердотельного акустооптического модулятора. Данный вопрос поднимался рядом авторов [6, 20], однако подробное экспериментальное исследование особенностей применения устройства в системах доплеровской диагностики с учетом динамики не проводилось.

#### Описание метода измерений

Изменение температуры в среде вызывает изменение оптической плотности, которое хорошо регистрируется интерферометрическими методами. Изменение оптической плотности приводит к появлению оптической разности хода и вызывает смещение интерференционных полос. Оптическая разность хода связана с температурой среды через термооптический коэффициент.

На рис. 1 изображена схема измерительной системы. Излучение гелий-неонового лазера – 1 направляется на расщепительный кубик – 2, разделяющий пучок лазера на два. В один из пучков помещается модулятор – 4, расположенный на координатном столе, имеющем степени свободы в вертикальном и горизонтальном направлении. Вто-



**Рис. 1.** Измерительная система: 1) гелий-неоновый лазер ( $\lambda=632,8$  нм); 2) расщепительный кубик; 3) зеркало; 4) акустооптический модулятор; 5) объектив; 6) отрицательная линза; 7) цилиндрическая линза; 8) экран

**Fig. 1.** Measurement system: 1) helium-neon laser; 2) split cube; 3) mirror; 4) acoustooptical modulator; 5) lens; 6) negative lens; 7) cylindrical lens; 8) screen



рой пучок юстируется поворотными зеркалами – 3 с целью обеспечения параллельности расщепленных пучков. Параллельные пучки, после модулятора – 4 и зеркал – 3 проходя через объектив – 5, пересекаются в фокальной плоскости. Увеличенное изображение области пересечения с помощью отрицательной линзы – 6 переносится в плоскость экрана – 8, где проводятся измерения. Для удобства регистрации использовалась цилиндрическая линза – 7, сжимающая интерференционную картину в вертикальном направлении вдоль направления интерференционных полос.

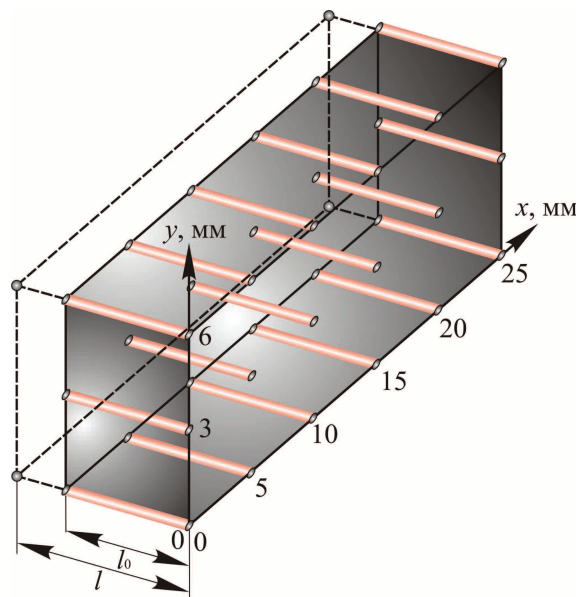


Рис. 2. Измерение оптической плотности

Fig. 2. Measurement of optical density

Изменение оптической толщины образца можно выразить в виде

$$\Delta L = L - L_0,$$

где  $L_0 = l_0(n_0 - 1)$ ,  $L = l(n - 1)$ . Здесь  $L$  – оптическая толщина звукопровода при температуре  $T$ ;  $L_0$  – оптическая толщина звукопровода при температуре  $T_0$ ;  $l$  – толщина звукопровода при температуре  $T$ ;  $l_0$  – толщина звукопровода при температуре  $T_0$  (рис. 2);  $n$  – показатель преломления материала звукопровода при температуре  $T$ ;  $n_0$  – показатель преломления материала звукопровода при температуре  $T_0$ . Изменение оптической толщины  $\Delta L$  связано как с температурным изменением геометрической толщины звукопровода, так и с температурным изменением показателя преломления

$$\begin{aligned} \Delta L &= L - L_0 = (n - 1)l - (n_0 - 1)l_0 = \\ &= [(n_0 + \beta \Delta T) - 1] \cdot (1 + \alpha \Delta T)l_0 - (n_0 - 1)l_0. \end{aligned}$$

Здесь  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения материала;  $\beta = dn/dT$  – приращение показателя преломления при повышении температуры на  $1^\circ\text{C}$ ,

$$\begin{cases} n = n_0 + \beta \Delta T, \\ l = l_0 [1 + \alpha \Delta T], \end{cases}$$

где  $\Delta T = T - T_0$ . Раскрывая скобки и пренебрегая членом  $\alpha \beta l_0 (\Delta T)^2$ , ввиду его малости, получим:

$$\Delta L = l_0 \Delta T \left[ \alpha + \frac{\beta}{n_0 - 1} \right] (n_0 - 1). \quad (1)$$

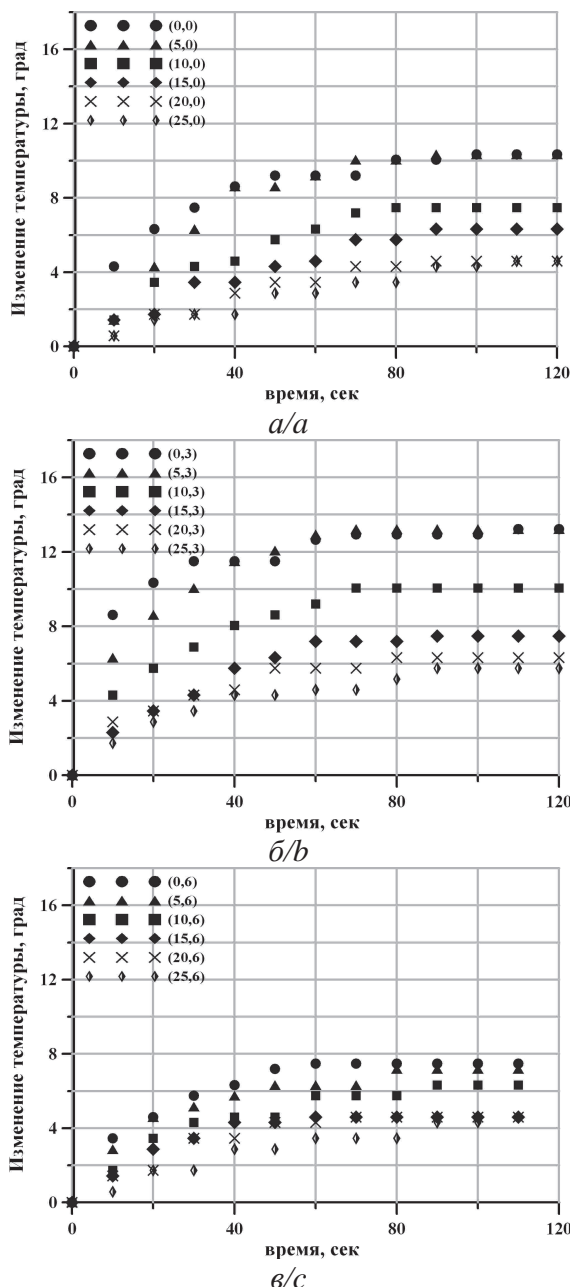


Рис. 3. Динамика изменения температуры в твердотельном акустооптическом модуляторе (а, б, в)

Fig. 3. Dynamics of temperature change in solid-state acousto-optical modulator (a, b, c)

Вычислим изменение температуры при смещении интерференционной картины на одну полосу. При этом  $\Delta L = \lambda$ .

$$\Delta T = \frac{\lambda}{l_0 \left[ \alpha + \frac{\beta}{n_0 - 1} \right] (n_0 - 1)},$$

где  $\lambda=632,8$  нм – длина волны He-Ne-лазера;  $l_0=10$  мм – геометрический размер звукового столба. Для материала звукопровода (МЛ-201, ТФ-7) значения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  равны:  $\alpha=0,96 \cdot 10^{-3}$ ;  $\beta=4,2 \cdot 10^{-6}$ ,  $n_0-1=0,73$ . Подставив данные коэффициенты в формулу (1), получим:  $\Delta T=5,75$  °С – изменение температуры при смещении интерференционной картины на одну полосу.

#### Экспериментальные результаты

В эксперименте на АОМ, находящийся при температуре окружающей среды  $\approx 25$  °С, подавалось рабочее высокочастотное (80 МГц) питание мощностью 2 Вт. В этом режиме акустооптический модулятор отклоняет половину падающего на него лазерного излучения на угол, равный углу Брэгга. При такой мощности возбуждающей волны АОМ служит в качестве расщепителя световых пучков в ЛДА. После подачи питания звукопроводящая среда начинает нагреваться, а  $t=0$  соответствует моменту подачи питания. Через время  $\approx 60$  с происходит стабилизация температуры внутри звукопровода, и интерференционные полосы перестают смещаться.

На рис. 3 (а–в) представлена динамика изменения средней температуры в выбранных локальных сечениях рис. 2. Используются следующие обозначения (а, b) – координаты локальных сечений, в

которых проводились измерения; а – координата по оси  $x$ , b – координата по оси  $y$  в миллиметрах (рис. 2). Ультразвуковой источник расположен вблизи точки (0, 3).

#### Заключение

Максимальное изменение оптической толщины звукопровода наблюдается в акустическом столбе непосредственно вблизи генератора УЗ волны и составляет величину  $\approx 2,5$  интерференционной полосы, что соответствует изменению температуры на величину  $\approx 14$  °С (рис. 3, б). В удаленной от генератора области смещение полос  $\approx 0,8$ , что составляет 4 °С. Таким образом, температурный градиент по длине УЗ столба ( $\approx 25$  мм) 10 °С. Такой градиент температуры вызовет отклонение световой волны на выходе АОМ на существенный угол. Это серьезный тепловой эффект, который может значительно ограничить сферу применения твердотельных акустооптических модуляторов. Можно предположить, что увеличение мощности приведет к большим тепловым градиентам.

Тепловые эффекты в АОМ существенно влияют на точность измерения скорости в ЛДА АВС. При малых скоростях исследуемых объектов или при малых концентрациях рассеивающих частиц ( $\sim 1$  частица в минуту) погрешность измерения составит величину 0,5 % (т. е. снизится почти на порядок).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусов П.Я., Дубнищев Ю.Н., Меледин В.Г. Оптический измеритель скорости на основе полупроводникового лазера // Квантовая электроника. – 1988. – Т. 15. – № 3. – С. 633–635.
2. Лазерный доплеровский анемометр с временной селекцией ортогональных компонент вектора скорости / П.Я. Белоусов, Ю.Н. Дубнищев, В.Г. Меледин, В.А. Павлов // Автометрия. – 1988. – № 2. – С. 43–49.
3. Belousov P.Ya., Dubnistshev Yu.N., Meledin V.G. Optical velocimeters for moving surfaces using gas and semiconductor lasers // Optics & Laser Technology. – 1990. – V. 22. – № 5. – P. 335–339.
4. Белоусов П.П., Белоусов П.Я., Дубнищев Ю.Н. Лазерный метод измерения трехмерного вектора скорости // Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31. – № 1. – С. 79–82.
5. Дубнищев Ю.Н., Ринкевичюс Б.С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. – М.: Наука, 1982. – 304 с.
6. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. – М.: Сов. радио, 1978. – 112 с.
7. Антонов С.Н., Резвов Ю.Г. Брэгговская акустооптическая дифракция на частотно-модулированной звуковой волне – угловое расщепление дифракционного порядка // Радиотехника и электроника. – 2005. – Т. 50. – № 4. – С. 472–479.
8. Анизотропная акустооптическая дифракция как метод измерения и формирования углового спектра лазерного излучения / С.Н. Антонов, А.В. Вайнер, В.В. Проклов, И.Ф. Янгиров // Радиотехника и электроника. – 2011. – Т. 56. – № 7. – С. 889–895.
9. Бондаренко Д.А., Карасик В.Е., Семенов В.П. Исследование режима дифракции лазерного пучка на линейно частотно-модулированной акустической волне в анизотропном акустооптическом дефлекторе // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. – 2011. – № S2 – С. 31–41.
10. Баркан И.Б., Павленко Л.К., Павлов В.Е. Особенности спектральной перестройки полупроводникового лазера ИПЛН-102 // Перестраиваемые лазеры: сборник научных трудов. – Новосибирск: Институт теплофизики, 1988. – С. 73–87.
11. Повышение точностных параметров лазерных генераторов изображений с круговым сканированием для формирования прецизионных углоизмерительных структур / А.В. Кирьянов, В.А. Жмудь, И.Н. Томилов, Д.А. Котин, Д.О. Терешкин, А.В. Останин // Научный вестник НГТУ. – 2013. – Т. 52. – № 3. – С. 46–50.
12. Kastelik J.-C., Dupont S., Gazalet J., Yushkov K.B. Frequency and angular bandwidth of acousto-optic deflectors with ultrasonic walk-off // Ultrasonics. – 2013. – V. 53. – № 1. – P. 219–224.
13. Тонкая структура кривой погрешности углового преобразователя / В.П. Кирьянов, А.В. Кирьянов, А.А. Лубков, В.В. Чуканов // Научный вестник НГТУ. – 2013. – Т. 52. – № 3. – С. 51–54.
14. Бессмельцев В.П., Голошевский Н.В. Система управления составными двухкоординатными сканерами // Автометрия. – 2007. – Т. 43. – № 1. – С. 116–126.
15. Zhang S., Wang L. Optical proximity correction for low resolution acoustooptic modulator // Guangdong Gongcheng/Opto-Electronic Engineering. – 2012. – V. 39. – № 4. – P. 129–135.
16. Бессмельцев В.П., Ралдугин А.Н., Служев В.А. Многоканальная система управления акустооптическим модулятором лазерного излучения на основе прямого синтеза частот // Автометрия. – 2013. – Т. 49. – № 6. – С. 79–85.
17. Бондаренко Д.А., Карасик В.Е., Семенов В.П. Управление пространственным спектром лазерного пучка с помощью частотно-манипулированных сигналов в лазерных сканирующих системах телеориентации // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. – 2012. – № 3 – С. 38–53.

18. Direct observation of femtosecond pulse buildup in self-mode-locked laser using an intracavity acoustooptic modulator / S. Kinoshita, E. Ito, M. Omori, S. Ueki // Japanese Journal of Applied Physics. – 2002. – V. 40. – № 11. – P. 6430–6434.
19. Давыдов А.И., Мухамадиев А.А., Ураксеев М.А. Акустооптическая коммутация элементов в информационно-измерительных системах // Датчики и системы. – 2013. – Т. 165. – № 2. – С. 33–37.
20. Spatial and temporal thermal analysis of acousto-optic deflectors using finite element analysis model / R. Jiang, Z. Zhou, X. Lv, S. Zeng, Z. Huang, H. Zhou // Ultrasonics. – 2012. – V. 52. – № 5. – P. 643–649.

Поступила 14.05.2014 г.

UDC 535.8

## TEMPERATURE DYNAMICS INTERFERENCE MEASURING IN SOLID-STATE ACOUSTOOPTICAL MODULATORS

**Andrey P. Belousov,**

Cand. Sc., Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marks Avenue,  
Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: abelousov@ngs.ru

**Peter Ya. Belousov,**

Cand. Sc., Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marks Avenue,  
Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: pyabelousov@ngs.ru

**Leonid A. Borynyak,**

Dr. Sc., Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marks Avenue,  
Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: borynyak-leonid@mail.ru

*The relevance of the work is determined by the necessity of solid-state acoustooptical modulators effective using in a wide range of technical devices such as deflectors, frequency shift setups, sweeping tools, optical beam splitters, laser Doppler anemometers et cetera.*

**The main aim of the study:** investigation of temperature dynamics in solid-state acoustooptical modulators by non-invasive optical methods; substantiation of solid-state acoustooptical modulators switching mode using in devices; estimation of applicability range and possible operating biases.

**The methods used in the study:** measurement of light wave phase shift induced by solid-state acoustooptical modulator active area geometrical characteristics and optical density thermal alterations. Estimation of temperature integral changing depending on time and interrogation beam location in acoustic transmission duct. A two-beam interferometer was used. Helium-neon laser emission with wavelength  $\lambda=632,8$  nm and power 0,5 mW was divided into two rays by beam splitting cube. The acoustooptical modulator was placed in one of the beams. A phase shift produced by geometric parameters of investigated object and optical density changings was determined by interference fringe shift. Methods of image analysis, interferometry, photometry, acoustooptics, material science, coherent optics, laser physics.

**The results:** The authors have measured the light wave phase shift caused by alterations of optical density and object thickness. Temperature integral change was estimated depending on time and probing beam location in acoustic transmission duct of acoustooptical modulator. The warm-up period of optical modulator was defined. The findings revealed that measuring maximal error magnitude of flow velocity with low event's frequency of light-diffusing tracers for solid-state acoustooptical modulator switching mode would equal 0,5 %. The measurement accuracy can be increased by usage of error correction algorithms.

### **Key words:**

Solid-state acoustooptical modulator, interferometry, diffraction, acoustical wave, thermal gradient, 3D laser Doppler velocimeter, ultrasound, switching mode, stationary mode, optical density, thermal expansion, phase shift.

## REFERENCES

1. Belousov P.Ya., Dubnishchev Yu.N., Meledin V.G. Optical velocimeter based on semiconductor laser. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1988, vol. 18, no. 3, pp. 405–407.
2. Belousov P.Ya., Dubnishchev Yu.N., Meledin V.G., Pavlov V.A. *Lazernyy doplerovskiy anemometr s vremennoy selektsiei ortogonalnykh component vektora skorosti* [Laser Doppler anemometer with temporal selection of orthogonal velocity vector components]. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 1988, no. 2, pp. 43–49.
3. Belousov P.Ya., Dubnistshev Yu.N., Meledin V.G. Optical velocimeters for moving surfaces using gas and semiconductor lasers. *Optics & Laser Technology*, 1990, vol. 22, no. 5, pp. 335–339.
4. Belousov P.P., Belousov P.Ya., Dubnishchev Yu.N. A laser method for measuring the three-dimensional velocity vector. *Quantum Electronics*, 2001, vol. 31, no. 1, pp. 79–82.
5. Dubnishchev Yu.N., Rinkevichyus B.S. *Metody lazernoy doplerovskoy anemometrii* [Methods of laser Doppler anemometry]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 304 p.
6. Magdich L.N., Molchanov V.Ya. *Akustoopticheskie ustroystva i ikh primeneniye* [Acoustooptic systems and their using]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1978. 112 p.
7. Antonov S.N., Rezvov Yu.G. *Breggovskaya akustoopticheskaya difraktsiya na chastotno-modulirovannoy zvukovoy volne – ugiyovoye rasshechleniye difraktsionnogo poriyadka* [Bragg acoustooptic diffraction by a frequency-modulated acoustic wave: angular splitting of the diffraction order]. *Radiotekhnika i elektronika*, 2005, vol. 50, no. 4, pp. 472–479.
8. Antonov S.N., Vainer A.V., Proklov V.V., Yangirov I.F. Anisotropic acousto-optic diffraction as a method to measure and control the angular spectrum of laser radiation. *Journal of communications technology and electronics*, 2011, vol. 56, no. 7, pp. 900–905.
9. Bondarenko D.A., Karasik V.E., Semenov V.P. *Issledovanie rezhima difraktsii lazernogo puchka na lineynoy chastotno-modulirovannoy akusticheskoy volne v anizotropnom akustoopticheskom deflektore* [Studying the regime of laser beam diffraction on linearly frequency-modulated acoustic wave at anisotropic acousto-optic deflector]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya: Priborostroeniye*, 2011, no. S2, pp. 31–41.
10. Barkan I.B., Pavlenko L.K., Pavlov V.E. *Osobennosti spektralnoy perestroyki poluprovodnikovogo lasera IPLN-102* [Semiconductor laser IPLN-102 spectral tuning specificities]. *Sbornik nauchnykh trudov: Perestroykaemye lasery* [Collected papers: tuned lasers]. Novosibirsk, Institut teplofiziki, 1988. pp. 73–87.
11. Kiryanov A.V., Zhmud V.A., Tomilov I.N., Kotin D.A., Tereshkin D.O., Ostanin A.V. *Povysheniye tochnostnykh parametrov lazernykh generatorov izobrazheniy s krugovym skanirovaniem dlya formirovaniya pretsizionnykh ugloizmeritelnykh struktur* [Accuracy enhancement of circular laser pattern generator for precision angle measurement structures]. *Nauchnyy vestnik NGTU*, 2013, vol. 52, no. 3, pp. 46–50.
12. Kastelik J.-C., Dupont S., Gazelet J., Yushkov K. B. Frequency and angular bandwidth of acousto-optic deflectors with ultrasonic walk-off. *Ultrasonics*, 2013, vol. 53, no. 1, pp. 219–224.
13. Kiryanov V.P., Kiryanov A.V., Lubkov A.A., Chukanov V.V. *Tonkaya struktura krivoy pogreshnosti uglovogo preobrazovatelya* [Small-size structure of angle encoder error curve]. *Nauchnyy vestnik NGTU*, 2013, vol. 52, no. 3, pp. 51–54.
14. Bessmeltsev V.P., Goloshevsky N.V. Control system for complementary two-coordinate scanning devices. *Optoelectronics, instrumentation and data processing*, 2007, vol. 43, no. 1, pp. 90–98.
15. Zhang S., Wang L. Optical proximity correction for low resolution acoustooptic modulator. *Guangdian Gongcheng/Opto-Electronic Engineering*, 2012, vol. 39, no. 4, pp. 129–135.
16. Bessmeltsev V.P., Raldugin A.N., Sluev V.A. Multichannel control system for an acousto-optical modulator of laser radiation based on direct digital synthesis of frequencies. *Optoelectronics, instrumentation and data processing*, 2013, vol. 49, no. 6, pp. 592–597.
17. Bondarenko D.A., Karasik V.E., Semenov V.P. *Upravleniye prostanstvennyim spektrom lazernogo puchka s pomoshchyu chastotno-manipulirovannykh signalov v lazernykh skaniruyushchikh sistemakh teleorientatsii* [Control of spatial spectrum of laser beam using frequency-shift signals in laser scanning tele-orientation systems]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya: Priborostroeniye*, 2012, no. 3, pp. 38–53.
18. Kinoshita S., Ito E., Omori M., Ueki S. Direct observation of femtosecond pulse buildup in self-mode-locked laser using an intracavity acoustooptic modulator. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, vol. 40, no. 11, pp. 6430–6434.
19. Davidov A.I., Mukhamadiev A.A., Urakseev M.A. *Akustoopticheskaya kommutatsiya elementov v informatsionno-izmeritelnykh sistemakh* [Elements' acousto-optic switching in information-measuring systems]. *Datchiki i sistemy*, 2013, vol. 165, no. 2, pp. 33–37.
20. Jiang R., Zhou Z., Lv X., Zeng S., Huang Z., Zhou H. Spatial and temporal thermal analysis of acousto-optic deflectors using finite element analysis model. *Ultrasonics*, 2012, vol. 52, no. 5, pp. 643–649.

Received: 14 May 2014.



УДК 621.313.3:621.365.5

## ОСОБЕННОСТИ НАГРЕВА НЕМАГНИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ПОЛЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

**Бикеев Роман Александрович,**

канд. техн. наук, доцент каф. автоматизированных электротехнологических установок факультета мехатроники и автоматизации ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: bikeev@ngs.ru

**Промзелев Владислав Алексеевич,**

аспирант каф. автоматизированных электротехнологических установок факультета мехатроники и автоматизации ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: promzelev@mail.ru

**Бланк Алексей Валерьевич,**

канд. техн. наук, доцент каф. теоретических основ электротехники факультета мехатроники и автоматизации ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: kaftoe@ngs.ru

**Морев Андрей Эдуардович,**

студент каф. автоматизированных электротехнологических установок факультета мехатроники и автоматизации ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: glhficcup@yandex.ru

Актуальность работы обусловлена тем, что в настоящее время в области создания новых энергосберегающих электротехнологий для задач нагрева изделий из цветных металлов особое внимание уделяется установкам индукционного нагрева в поперечном магнитном поле, при этом не охваченной методом нагрева в поперечном магнитном поле оказалась большая номенклатура изделий, имеющих прямоугольное поперечное сечение, выполненных из цветных металлов. В настоящее время такие изделия нагреваются в установках индукционного нагрева в продольном переменном магнитном поле, имеющих электрический КПД, не превышающий 0,5. Привлекательностью нагрева таких изделий в поперечном вращающемся магнитном поле постоянных магнитов является его потенциальная возможность в достижении электрического КПД, равного 0,75–0,85. В представленной статье рассматриваются проведенные исследования нагрева алюминиевых изделий прямоугольного поперечного сечения до температуры 550 °С.

**Цель исследования:** разработка численной модели на базе программного комплекса ANSYS для расчета электромагнитных параметров системы «индуктор–загрузка» и температурного поля в нагреваемой заготовке; выполнение расчетов распределения параметров электромагнитного и температурного поля в нагреваемой заготовке.

**Методы исследования:** Основным инструментом научного исследования является программный комплекс ANSYS, позволяющий моделировать различные пространственные физические системы, поведение которых может быть описано дифференциальными уравнениями. За основу принят метод конечных элементов, позволяющий непрерывную область задачи, имеющую бесконечное число степеней свободы, разбить на конечное, хотя и достаточно большое, число областей, в которых параметры постоянны. В узлах системы сосредотачиваются физические свойства и внешние воздействия.

**Результаты:** Созданная модель позволила рассчитать связанную электромагнитную и тепловую задачу нагрева немагнитного изделия прямоугольного поперечного сечения во вращающемся магнитном поле постоянных магнитов. В статье представлены полученные зависимости максимальных температурных перепадов, получаемых в поперечном сечении прямоугольных изделий, выполненных из алюминия. Зависимости представлены, как функции скорости вращения системы постоянных магнитов, создающих поперечное магнитное поле, числа пар полюсов магнитов и зазора между нагреваемым изделием и магнитами.

### **Ключевые слова:**

Индукционный нагрев с постоянными магнитами, температурное поле, температурный перепад, скорость вращения магнитного поля, число пар полюсов, переменное магнитное поле, теплообмен, граничные условия.

### **Введение**

В настоящее время в области создания новых энергосберегающих электротехнологий для задач нагрева изделий из цветных металлов особое внимание уделяется установкам индукционного нагрева в

поперечном магнитном поле. Значительные успехи достигнуты к настоящему времени в направлении исследования и разработки систем индукционного нагрева металлической ленты из цветных металлов в поперечном переменном магнитном поле, создава-

емом индукторами специальной конструкции. Бесспорным преимуществом данных установок является то, что они работают на частотах 0,05–10 кГц, в отличие от индукционных систем традиционной конструкции с нагревом ленты в продольном магнитном поле, для которых требуются частоты 100–2000 кГц [1–17]. При этом стоимость электрооборудования, применяемого на частотах до 10 кГц, и энергозатраты в таких установках в несколько раз меньше, чем для частот 100–2000 кГц.

Получены положительные результаты при разработке установок для нагрева цилиндрических заготовок из цветных металлов в поперечном магнитном поле, создаваемом либо катушками постоянного тока, либо системой постоянных магнитов [18–20].

Не охваченной методом нагрева в поперечном магнитном поле оказалась большая номенклатура изделий, имеющих прямоугольное поперечное сечение, выполненных из цветных металлов. В настоящее время такие изделия нагреваются в установках индукционного нагрева в продольном переменном магнитном поле, имеющих электрический КПД, не превышающий 0,5. Привлекательностью нагрева таких изделий в поперечном вращающемся магнитном поле постоянных магнитов является его потенциальная возможность в достижении электрического КПД, равного 0,75–0,85 [18, 19].

Выполненные исследования направлены на то, чтобы начать преодолевать этот пробел в создании энергоэффективных установок индукционного нагрева изделий прямоугольного сечения во вращающемся поперечном магнитном поле постоянных магнитов.

#### Постановка задачи

На рис. 1 представлена схема установки индукционного нагрева изделия прямоугольного поперечного сечения во вращающемся поле постоянных магнитов. На рисунке приняты следующие обозначения:  $h$  – высота магнитов;  $S, N$  – южный и северный полюса магнита, соответственно;  $A_m$  – угловой размер магнита;  $A_z$  – угловой размер зазора между магнитами в магнитной системе;  $a, b$  – ширина и высота нагреваемой заготовки;  $d$  – зазор между нагреваемой заготовкой и поверхностью магнитов;  $V$  – скорость вращения магнитной системы вокруг нагреваемой заготовки.

В работе выполняется нагрев алюминиевых изделий прямоугольного поперечного сечения до температуры 550 °С. Технологический зазор между ребром изделия и магнитами принимался равным  $d=10, 20, 30$  мм, между изделием и магнитами располагается теплоизоляционный экран толщиной 5 мм. Высота магнитов  $h=15$  мм, остаточная индукция 1 Тл, коэрцитивная сила 735 кА/А (направление намагничивания радиальное). Скорость вращения магнитной системы вокруг заготовки  $V$  изменялась от 600 до 3000 об/мин.

Процесс конвективного теплообмена поверхности вращающегося изделия заготовки с окружающей средой выполнялся при граничном условии 3 рода [20]. В силу малого значения степени черно-

ты алюминия теплопередача излучением между изделием и тепловым экраном не учитывалась.

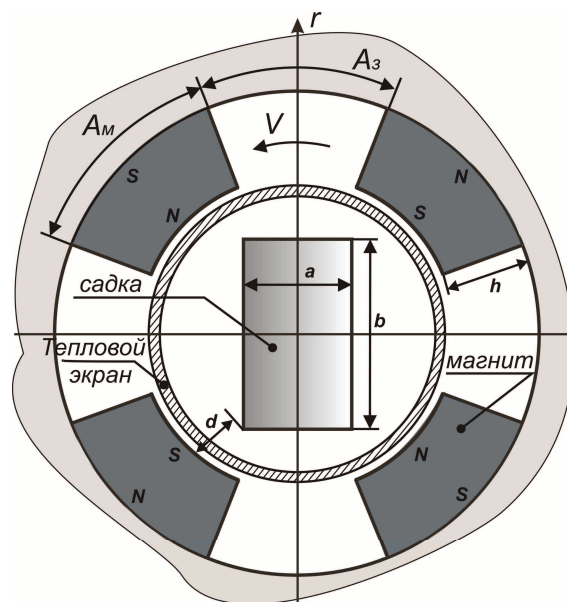


Рис. 1. Схема установки индукционного нагрева изделия прямоугольного поперечного сечения во вращающемся поле постоянных магнитов

Fig. 1. Diagram of installation for induction heating the product with rectangular cross section in rotating field of permanent magnets

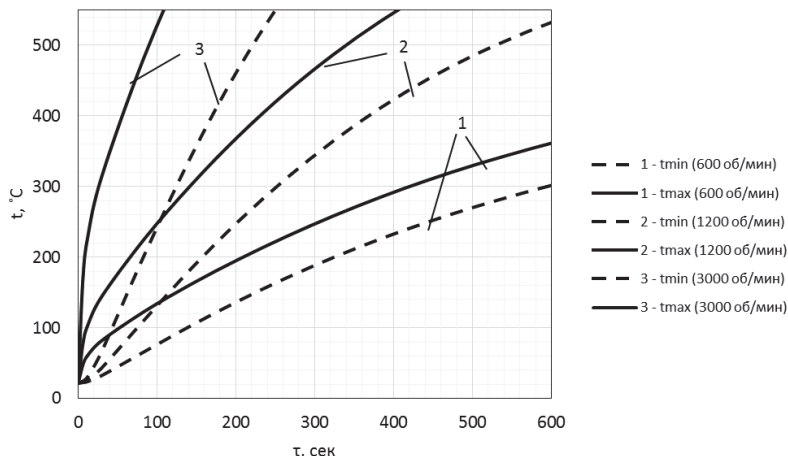
#### Результаты расчета

Расчеты взаимосвязанной электромагнитной и тепловой задач в нагреваемом изделии выполнялись в программном комплексе ANSYS в двухмерной постановке на суперкомпьютере со следующими характеристиками: размер оперативной памяти 96 Гб; 2 процессора Intel Xeon X5680 3.33 МГц по шесть ядер каждый.

На рис. 2–4 представлены зависимости распределения температурного поля в изделии от геометрических и режимных параметров нагрева.

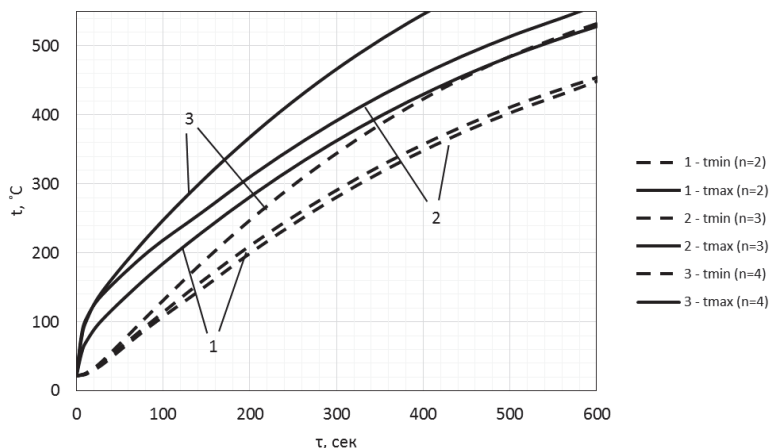
По рис. 2, 3 видно, что с повышением скорости вращения и числа пар полюсов магнитной системы происходит увеличение скорости нагрева и максимального температурного перепада в изделии. Это связано с возрастанием активной мощности, выделяющейся в нем. Следует отметить, что величина максимального температурного перепада растет с увеличением скорости вращения и числа пар полюсов, что связано с увеличивающейся частотой магнитного поля, проникающего в изделие и, как следствие, уменьшением глубины проникновения переменного электромагнитного поля, наведенного в изделии. В прямоугольном изделии, вне зависимости от частоты магнитного поля, более интенсивно разогреваются углы заготовки, а затем, за счет теплопроводности от зоны выделения энергии, остальная часть тела.

По рис. 4 видно, что с увеличением технологического зазора между изделием и поверхностью магнитов происходит уменьшение скорости нагре-



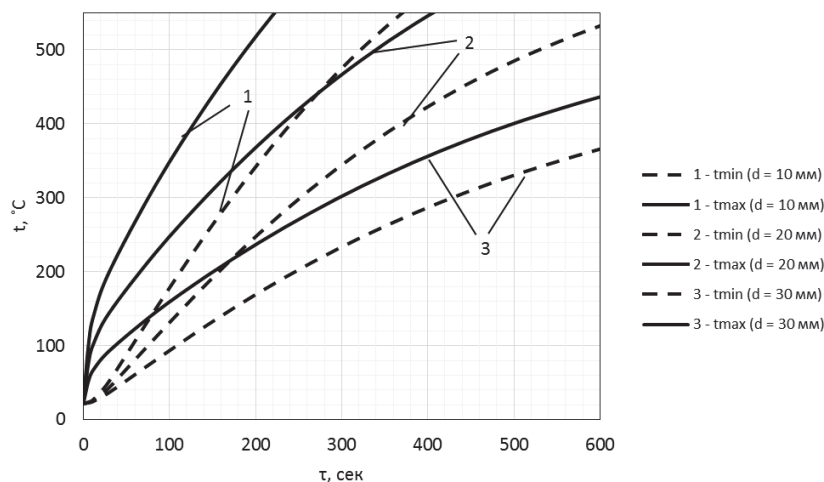
**Рис. 2.** Зависимость распределения температурного поля в прямоугольном изделии сечением  $180 \times 90$  мм (зазора  $d=10$  мм) от скорости вращения магнитной системы установки с 3 парами полюсов

**Fig. 2.** Dependence of temperature field distribution in rectangular product with section of  $180 \times 90$  mm (the gap  $d=10$  mm) on rotation speed of installation magnetic system with three pairs of poles



**Рис. 3.** Зависимость распределения температурного поля в прямоугольном изделии сечением  $180 \times 90$  мм от количества пар полюсов магнитной системы установки при частоте вращения  $1200$  об/мин

**Fig. 3.** Dependence of temperature field distribution in rectangular product with section of  $180 \times 90$  mm on a number of poles of the installation magnetic system at rotation frequency of  $1200$  r/min



**Рис. 4.** Зависимость распределения температурного поля в прямоугольном изделии при частоте вращения магнитной системы  $1200$  об/мин установки с 3 парами полюсов от геометрических размеров заготовки

**Fig. 4.** Dependence of temperature field distribution in rectangular product at rotation frequency of  $1200$  r/min of the installation with three pairs of poles on subproduct geometry

ва заготовки. Такое поведение скорости нагрева связано с уменьшающейся удельной активной мощностью, выделяющейся в изделии.

#### Заключение

Модель, разработанная в программном комплексе ANSYS, позволила рассчитать связанную электромагнитную и тепловую задачу нагрева немагнитного изделия прямоугольного поперечного сечения во вращающемся магнитном поле постоянных магнитов.

Получены зависимости распределения температуры по сечению нагреваемых изделий прямоугольного сечения. Установлено, что в алюминиевых изделиях прямоугольного поперечного сечения возможно обеспечение температурных перепадов между точками ребра, образованного боковыми поверхностями и точками оси прямоугольного

сечения, менее 60 °С. Но это можно получить только при малых скоростях нагрева, обусловленных малыми скоростями вращения поперечного магнитного поля (менее 600 об/мин), при которых получается низкой энергоэффективностью (тепловой КПД) процесса нагрева.

Скорость нагрева и максимальный температурный перепад по сечению изделия увеличиваются с ростом числа пар полюсов и скорости вращения магнитной системы.

Энергетические показатели такого вида нагрева изделий прямоугольного сечения достаточно высоки (электрический КПД близок к 0,7), что определяет его перспективность при условии применения специальных способов выравнивания температурного поля по сечению нагреваемого изделия.

*Научные исследования проведены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 3D-FEM Simulation of Transverse-Flux Induction Heaters / V. Bukanin, F. Dughiero, V. Nemkov, S. Lupi // CEFC 94. IEEE Transaction. on Mag. – Aix les Bains, France, 5–7 July 1994. – V. 31. – № 3. – P. 2174–2177.
- Transverse Flux Heating for Heat Treatment of Precipitous Metal Strips / I. Artuso, F. Dughiero, P. Fabbro, S. Lupi, A. Tiziani // IHS-98, International Induction Heating Seminar. – Padova, Italia, 13–15 May 1998. – P. 157–166.
- Investigation, design and optimization of transverse flux induction heating / A. Nikanorov, G. Nauvertat, H. Schulbe, B. Nacke, A. Muhlbauer // International seminar on heating by internal sources. HIS-2001: Induction, dielectric and conduction. – Padua, 12–14 September, 2001. – P. 553–558.
- Schülbe H., Nikanorov A., Nacke B. Flexible transverse flux heaters of metal strip // Proc. of International Symposium HES-04: Heating by Electromagnetic Sources. – Padua, 2004. – P. 293–300.
- Tudorache T., Fireteanu V. Magneto-Thermal-Translating motion coupling in 3D FEM analysis of metallic sheets transverse flux induction heating // Proc. of International Symposium HES-07: Heating by Electromagnetic Sources. – Padua, 2007. – P. 259–266.
- Dughiero F., Forzan M., Lupi S. Induction heating of aluminum billets rotating in a DC magnetic field // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды VIII Международ. конф. – Самара, 2006. – С. 171–176.
- Magnusson N. Prospects for rotating billet superconducting induction heating // Heating by electromagnetic sources HES-07. – Padua, 2007 – P. 479–486.
- Optimization design of induction heaters in the field of rotating permanent magnets with cylindrical load of non-ferrous metals / E. Golovenko, I. Gudkov, V. Goremykin, K. Michailov, E. Kinev // Proc. of the XVII Congress. – St. Petersburg, 21–25 May, 2012. – С.-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. – С. 91–97.
- Analytical and numerical analysis of electrical parameters of induction heating with permanent magnets / A. Aliferov, A. Blanc, M. Forzan, A. Inkin, S. Lupi // Proc. of the XVII Congress. – St. Petersburg, 21–25 May, 2012. – С.-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. – С. 81–90.
- A new high efficiency technology for the induction heating of nonmagnetic billets / F. Dughiero, M. Forzan, S. Lupi, F. Nicoletti, M. Zerbetto // Heating by electromagnetic sources HES-10. – Padua, 2010 – P. 531–538.
- Исследование электромагнитных параметров установок индукционного нагрева с постоянными магнитами / А.И. Инкин, А.В. Бланк, А.И. Алиферов, Е.Г. Порсев, В.А. Промзевел // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 1–1. – С. 178–182.
- Бланк А.В., Азанов А.В. Магнитоэлектрические установки индукционного нагрева и их электротепловые расчеты на базе каскадных схем замещения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 6. – С. 65–69.
- Бланк А.В., Алиферов А.И., Инкин А.И. Каскадные Е-Н-схемы замещения для расчета магнитоэлектрических установок индукционного нагрева // Электротехника. – 2011. – № 6. – С. 36–41.
- Инкин А.И., Алиферов А.И., Бланк А.В. Установки индукционного нагрева с постоянными магнитами и их каскадные А-Н-схемы замещения для расчета электромагнитного поля // Вестник Павлодарского государственного университета. Серия энергетическая. – 2011. – № 2. – С. 64–74.
- Инкин А.И., Алиферов А.И., Бланк А.В. Электротепловые расчеты установок электронагрева на основе универсальных каскадных схем замещения: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 202 с.
- Multi-objective optimisation of induction heating processes: Methods of the problem solution and examples based on benchmark model / P. Di Barba, Y. Pleshivtseva, E. Rapoport, M. Forzan, S. Lupi, E. Sieni, B. Nacke, A. Nikanorov // International Journal of Microstructure and Materials Properties. – 2013. – № 8 (4–5). – P. 357–372.
- Di Barba P., Pleshivtseva Yu., Lupi S. Multi-objective optimization for advanced design of induction through heaters // HES-13 – Heating by Electromagnetic sources. – Padua, Italy, 21–24 May, 2013. – № P-9. – P. 507–514.
- Electromagnetic and thermal analysis of the induction heating of aluminum rotating in a DC magnetic field / R. Araneo, F. Dughiero, M. Fabbri, M. Forzan, A. Geri, S. Lupi, A. Morandi, P. Ribani, G. Vega // Proc. of International Symposium HES-07: Heating by Electromagnetic Sources. – Padua, 2007. – P. 487–496.
- Karban P., Mach F., Dolezel I. Higher-order finite element modeling of rotational induction heating of nonferromagnetic cylindrical billets // Proc. of International Symposium HES-10: Heating by Electromagnetic Sources. – Padua, 2010 – P. 515–522.
- Алиферов А.И., Луци С. Индукционный и электроконтактный нагрев металлов: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 411 с.

*Поступила 22.08.2013 г.*



UDC 621.313.3:621.365.5

## FEATURES OF HEATING NON-MAGNETIC ITEMS OF RECTANGULAR SECTION IN ROTATING FIELD OF PERMANENT MAGNETS

**Roman A. Bikeev,**

Cand. Sc., G.I. Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: bikeev@ngs.ru

**Vladislav A. Promzelev,**

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: promzelev@mail.ru

**Aleksey V. Blank,**

Cand. Sc., G.I. Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: kaftoe@ngs.ru

**Andrey E. Morev,**

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: glhficcup@yandex.ru

*Relevance of the work is caused by the fact that at the present time in the field of new energy-saving electrotechnologies for heating non-ferrous metals products the focus is on induction heating in a transverse magnetic field. A large range of products with rectangular cross-section made of non-ferrous metals turned out not to be covered by the heating method in a transverse magnetic field. Currently such products are heated in the induction heating installations in alternating longitudinal magnetic field while electrical efficiency is not greater than 0,5. The attractiveness of such products heating in the transverse rotating magnetic field of permanent magnets is its potential to achieve electrical efficiency equal to 0,75–0,85. The paper considers the carried out studies of heating aluminum products with rectangular cross-section to a temperature of 550 °C.*

**The main aim of the study** is to develop a numerical model on the basis of the program package ANSYS for calculating electromagnetic parameters of system «inductor–product» and the temperature field in the heated product; to calculate distributions of electromagnetic and temperature fields parameters in the heated product.

**The methods used in the study:** The main instrument of the study is the software package ANSYS, which allows modeling different spatial physical systems which behavior can be described by the differential equations. The finite element method was taken as the basic one. It allows dividing a continuous problem domain having an infinite number of freedom degrees into a finite, but sufficiently large, number of areas where parameters are constant. Physical properties and external influences are concentrated in the nodes of the system.

**The results:** The developed model allows calculating the coupled electromagnetic and thermal problems of heating non-magnetic product with rectangular cross-section in rotating magnetic field of permanent magnets. The paper introduces the dependencies of the maximum temperature differences obtained in the cross-sections of rectangular products made of aluminum. The dependencies are given as functions of rotational speed of permanent magnets, producing a transverse magnetic field, the number of pole pairs of the magnets and the gap between the heated product and magnets.

### Key words:

Induction heating by a permanent magnet, temperature field, temperature difference, magnetic field rotational speed, number of pole pairs, alternating magnetic field, heat exchange, boundary conditions.

*The research was financially supported by the State presented by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.*

### REFERENCES

1. Bukanin V., Dughiero F., Nemkov V., Lupi S. 3D-FEM Simulation of Transverse-Flux Induction Heaters. *CEFC 94. IEEE Transaction. on Mag.* Aix les Bains, France, 5–7 July 1994. Vol. 31, no. 3, pp. 2174–2177.
2. Artuso I., Dughiero F., Fabbro P., Lupi S., Tiziani A. Transverse Flux Heating for Heat Treatment of Precipitous Metal Strips. *IHS-98, International Induction Heating Seminar.* Padova, Italia, 13–15 May, 1998. pp. 157–166.
3. Nikanorov A., Nauvertat G., Schulbe H., Nacke B., Muhlbauer A. Investigation, design and optimization of transverse flux induction heating. *International seminar on heating by internal sources. HIS-2001: Induction, dielectric and conduction.* Padua, 12–14 September, 2001. pp. 553–558.
4. Schulbe H., Nikanorov A., Nacke B. Flexible transverse flux heaters of metal strip. *Proc. of International Symposium HES-04: Heating by Electromagnetic Sources.* Padua, 2004. pp. 293–300.
5. Tudorache T., Fireteanu V. Magneto-Thermal-Translating motion coupling in 3D FEM analysis of metallic sheets transverse flux induction heating. *Proc. of International Symposium HES-07: Heating by Electromagnetic Sources.* Padua, 2007. pp. 259–266.
6. Dughiero F., Forzan M., Lupi S. Induction heating of aluminum billets rotating in a DC magnetic field. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy konferentsii «Problemy upravleniia i modelirovaniia v slozhnykh sistemakh»* [Proc. VIII International conference. Problems of control and design in complex systems]. Samara, 2006. pp. 171–176.

7. Magnusson N. Prospects for rotating billet superconducting induction heating. *Heating by electromagnetic sources HES-07*. Padua, 2007. pp. 479–486.
8. Golovenko E., Gudkov I., Goremykin V., Michailov K., Kinev E. Optimization design of induction heaters in the field of rotating permanent magnets with cylindrical load of non-ferrous metals. *Proceedings of the XVII Congress*. St. Petersburg, 21–25 May, 2012. St. Peterburg, SPbSETU «LETI» Publ., 2012. pp. 91–97.
9. Aliferov A., Blanc A., Forzan M., Inkin A., Lupi S. Analytical and numerical analysis of electrical parameters of induction heating with permanent magnets. *Proceedings of the XVII Congress*. St. Petersburg, 21–25 May, 2012. St. Peterburg, SPbSETU «LETI» Publ., 2012. pp. 81–90.
10. Dughiero F., Forzan M., Lupi S., Nicoletti F., Zerbetto M. A new high efficiency technology for the induction heating of nonmagnetic billets. *Heating by electromagnetic sources HES-10*. Padua, 2010. pp. 531–538.
11. Inkin A.I., Blank A.V., Aliferov A.I., Porsev E.G., Promzelev V.A. Issledovanie elektromagnitnykh parametrov ustanovok induktsionnogo nagreva s postoyannymi magnitami [Studying electromagnetic parameters of induction heating installations with permanent magnets]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniia i radioelektroniki*, 2012, no. 1–1, pp. 178–182.
12. Blank A.V., Azanov A.V. Magnitoelektricheskie ustanovki induktsionnogo nagreva i ikh elektroteplovye raschety na baze kaskadnykh skhem zameshcheniia. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 2012, no.6, pp. 65–69.
13. Blank A. V., Aliferov A. I., Inkin A. I. Kaskadnye E-N-shemy zameshheniya dlja rascheta magnitoelektricheskikh ustanovok induktsionnogo nagreva [Cascading EH-equivalent circuit for calculating the magnitoelectric induction heating]. *Elektrotehnika*, 2011, no. 6, pp. 36–41.
14. Inkin A.I., Blank A.V., Aliferov A.I. Ustanovki induktsionnogo nagreva s postoyannymi magnitami i ikh kaskadnye A-N-skemy zameshcheniya dlya rascheta elektromagnitnogo polya [Induction heating installations with permanent magnets and their cascade A-H-equivalent circuits for calculating electromagnetic field]. *Vestnik Pavlodarskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya energeticheskaya*, 2011, no. 2, pp. 64–74.
15. Inkin A. I., Aliferov A.I., Blank A.V. *Elektroteplovye raschety ustanovok elektronagreva na osnove universalnykh kaskadnykh skhem zameshcheny* [Electrothermal calculations of electric heating systems based on universal cascade equivalent circuits]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2013. 202 p.
16. Di Barba P., Pleshivtseva Y., Rapoport E., Forzan M., Lupi S., Sieni E., Nacke B., Nikanorov A. Multi-objective optimisation of induction heating processes: Methods of the problem solution and examples based on benchmark model. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*. 2013, no. 8 (4–5), pp. 357–372.
17. Di Barba P., Pleshivtseva Yu., Lupi S. Multi-objective optimization for advanced design of induction through heaters. *HES-13 – Heating by Electromagnetic sources*. Padua, Italy, 21–24May, 2013. No. P-9, pp. 507–514.
18. Araneo R., Dughiero F., Fabbri M., Forzan M., Geri A., Lupi S., Morandi A., Ribani P., Vega G. Electromagnetic and thermal analysis of the induction heating of aluminum rotating in a DC magnetic field. *Proc. of International Symposium HES-07: Heating by Electromagnetic Sources*. Padua, 2007. pp. 487–496.
19. Karban P., Mach F., Dolezel I. Higher-order finite element modeling of rotational induction heating of nonferromagnetic cylindrical billets. *Proc. of International Symposium HES-10: Heating by Electromagnetic Sources*. Padua, 2010. pp. 515–522.
20. Aliferov A.I., Lupi S. *Induktsionny i elektrokontaktny nagrev metallov* [Metal induction and electrical contact heating]. Novosibirsk, NSTU publ., 2011. 411 p.

Received: 22 August 2013.

УДК 539.232:543.429.23

## **ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЫДЕРЖКИ НА МАГНИТНЫЕ И СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ПРОДУКТОВ ХИМИЧЕСКОЙ КАРБОНИЗАЦИИ ПОЛИВИНИЛИДЕНФТОРИДА**

**Живулин Владимир Евгеньевич,**

аспирант кафедры физики и методики обучения физике  
Физико-математического факультета ФГБОУ ВПО «Челябинский  
государственный педагогический университет», Россия, 454080,  
г. Челябинск, пр. Ленина, 69. E-mail: zhivulinve@mail.ru

**Песин Леонид Абрамович,**

д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры физики и методики обучения  
физике Физико-математического факультета ФГБОУ ВПО «Челябинский  
государственный педагогический университет», Россия, 454080,  
г. Челябинск, пр. Ленина, 69. E-mail: pesinla@mail.ru

**Меженина Ольга Александровна,**

инженер кафедры химии твердого тела и нанопроцессов Химического  
факультета ФГБОУ ВПО «Челябинский государственный университет»,  
Россия, 454001, г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129. E-mail: ink1@list.ru

**Ковалев Игорь Николаевич,**

канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры химии твердого тела  
и нанопроцессов Химического факультета ФГБОУ ВПО «Челябинский  
государственный университет», Россия, 454001, г. Челябинск,  
ул. Братьев Кашириных, 129. E-mail: ink1@list.ru

**Злобина Наталья Алексеевна,**

студентка Физико-математического факультета ФГБОУ ВПО «Челябинский  
государственный педагогический университет», Россия, 454080,  
г. Челябинск, пр. Ленина, 69. E-mail: tasha558559@mail.ru

**Гаврилов Михаил Александрович,**

студент Физико-математического факультета ФГБОУ ВПО «Челябинский  
государственный педагогический университет», Россия, 454080,  
г. Челябинск, пр. Ленина, 69. E-mail: super.mig1212@ya.ru

**Морилова Виктория Михайловна,**

ст. преподаватель кафедры общей физики Снежинского  
физико-технического института НИЯУ МИФИ, Россия, 456776,  
г. Снежинск, ул. Комсомольская, 8. E-mail: vika\_m@list.ru

**Корякова Ольга Васильевна,**

канд. хим. наук, науч. сотр. лаборатории спектральных методов  
исследования ИОС УрО РАН, Россия, 620990, г. Екатеринбург,  
ул. С. Ковалевской, 22. E-mail: ir@ios.uran.ru

**Актуальность работы:** Современные наука и технология проявляют интерес к использованию низкоразмерных и наноразмерных материалов на основе углерода. Одним из наиболее перспективных материалов для синтеза подобных структур является поливинилиденфторид. Одинаковое количество фтора и водорода в полимерных цепях данного материала позволяет добиться высокой степени его дегидрофторирования путём отщепления молекул фтористого водорода. В процессе постепенного проникновения дегидрофторизирующих химических реагентов в глубину плёнки поливинилиденфторида на её поверхности происходит образование углеродных гетерослоёв, отличающихся содержанием остаточного фтора и величиной электрической проводимости. Такие гетероструктуры на гибкой полимерной основе могут быть востребованы современной микроэлектроникой. Поэтому изучение их физико-химических свойств представляется актуальным.

**Цель работы:** Изучить влияние продолжительности изотермической выдержки при 250 °С на магнитные и структурные свойства образцов ПВДФ, частично дегидрофторированных химическим путём.

**Методы исследования:** ЭПР-спектроскопия, дифференциальный термический, термогравиметрический и дифференциальный термогравиметрический анализ, рентгеновская дифрактометрия.

**Результаты:** разработан способ получения на поверхности пленки поливинилиденфторида нового углеродного материала, обладающего магнитной активностью. Измерены параметры спектров ЭПР образцов частично дегидрофторированного химическим путём поливинилиденфторида, подвергнутых последующей термической обработке при 250 °С с различной продолжительностью изотермической выдержки. На основе данных дифференциального термического анализа сделаны предположения о возможном механизме монотонного роста концентрации парамагнитных центров при увеличении времени изотермического отжига.

**Ключевые слова:**

Поливинилиденфторид, электронный парамагнитный резонанс (ЭПР), дифференциальный термический анализ, рентгеновская дифрактометрия, дегидрофторирование, изотермический отжиг.

**Введение**

В последние годы большое число работ посвящено как практическому синтезу, так и теоретическому моделированию нано- и низкоразмерных углеродных структур, в том числе и карбина [1]. Модель идеального кристалла карбина предполагает наличие линейных углеродных цепей, в которых соседние атомы соединены между собой либо двойными, либо чередованием тройных и одинарных связей. Цепи должны быть упакованы в кристаллы за счет ван-дер-ваальсовских сил [2]. Обнаружение кристаллического карбина в природных минералах [3] вселяет надежду реализации условий его синтеза и в лабораторных условиях.

Одним из способов синтеза является карбонизация галогеносодержащих полимеров [4, 5]. Поливинилиденфторид (ПВДФ) – полимерный материал, обладающий рядом полезных свойств, благодаря которым он находит широкое применение в мембранных технологиях, электронике, медицине, акустике и т. д. Равное количество фтора и водорода в цепях создаёт потенциальную возможность использования ПВДФ в качестве исходного материала для создания одномерных углеродных наноструктур путём химического либо радиационного дегидрофторирования (ДФ). Согласно известной модели химической карбонизации, под влиянием жидкой дегидрофторирющей среды фтор и водород в равных количествах отщепляются от углеродного каркаса и удаляются в виде молекул фтористого водорода [4, 6].

Ранее в работах [4, 6–9] изучены процессы, происходящие при химической карбонизации ПВДФ. В [7] проведена оценка глубины проникновения дегидрофторирющей смеси (около 4 мкм). В работе [8] изучалось ЭПР-поглощение продуктов химической карбонизации ПВДФ в зависимости от продолжительности синтеза и последующего хранения. Сигнал ЭПР представляет одиночную линию с g-фактором, близким к таковому свободного электрона. Интенсивность сигнала увеличивается с ростом продолжительности синтеза. В процессе хранения образцов форма спектра ЭПР не менялась, однако происходило уменьшение интенсивности сигнала. Для образцов с большей продолжительностью синтеза этот процесс происходит быстрее; с течением времени скорость спада уменьшается. Работа [9] также посвящена изуче-

нию кинетики уменьшения парамагнитного поглощения химически карбонизованных в течение 1, 3 и 12 часов образцов ПВДФ при долговременном хранении в атмосфере воздуха и при пониженном давлении. Выявлено, что интенсивность сигнала ЭПР уменьшается с течением времени у всех образцов, за исключением образца с максимальной продолжительностью синтеза, хранящегося в вакууме. Для этого образца интенсивность сигнала уменьшалась в течение первых двух дней (~3200 мин) и возрастала при дальнейшем хранении. При этом рост происходил несколько быстрее, чем предыдущий спад.

Недавно было обнаружено, что при термической обработке выше 250 °С предварительно химически карбонизованных плёночных образцов ПВДФ происходит скачкообразное увеличение концентрации парамагнитных центров [10]. В настоящей работе проведено изучение влияния продолжительности изотермической выдержки при температуре 250 °С на магнитные характеристики карбонизованного слоя.

**Методика приготовления образцов**

Исходным материалом служила частично кристаллическая пленка ПВДФ марки Ф-2МЭ толщиной 60 мкм, предоставленная ОАО «Пластполимер», г. Санкт-Петербург. Характерная форма ИК спектра на рис. 1 указывает на доминирование полярной  $\beta$ -конформации полимерных цепей в исходной плёнке [11].

Из плёнки вырезались 5 заготовок для образцов размерами 20×20 мм. Перед дегидрофторированием все заготовки в течение 30 минут промывались в ультразвуковой ванне сначала в ацетоне, а затем в дистиллированной воде. Далее заготовки одновременно помещались в дегидрофторирющую смесь и находились в ней в течение 3 часов. Объем смеси составлял 200 мл. Смесь была приготовлена по методике, описанной в работе [4], и состояла из насыщенного раствора КОН в этаноле и ацетона в объемном соотношении 1:9. После дегидрофторирования все образцы снова промывались в ультразвуковой ванне аналогичным образом.

Образец для исследования методом ДТА был приготовлен отдельно, его химическая обработка производилась идентичным образом, при этом он не подвергался последующей термической обработке.



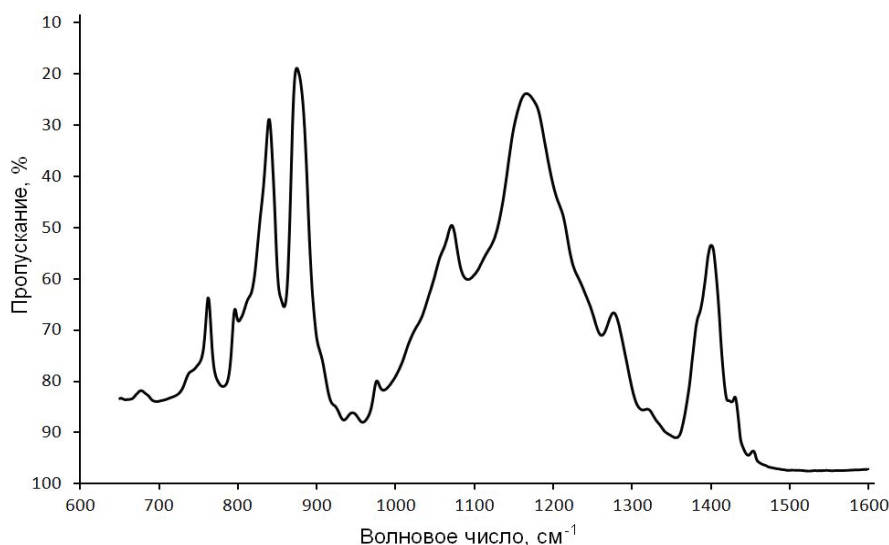


Рис. 1. ИК спектр исходной плёнки ПВХФ

Fig. 1. IR spectrum of the original poly (vinylidene fluoride) film

Термическая обработка проводилась в трубчатой печи. Один из пяти образцов, так же как и образец для ДТА, не подвергался термической обработке. Остальные поочерёдно помещались в предварительно нагретую до температуры 250 °С печь. Продолжительность изотермической выдержки измерялась секундомером. По истечению заданного времени образец вынимался из печи и остывал на воздухе до комнатной температуры. Таким образом, были получены 5 образцов с идентичной химической обработкой и различной продолжительностью (0, 1, 5, 10 и 60 минут) изотермической выдержки при температуре 250 °С.

Приготовленные образцы были исследованы методом ЭПР. Спектры ЭПР регистрировались радиоспектрометром РЭ-1306 при комнатной темпе-

ратуре. В качестве эталона для калибровки магнитного поля использовался образец MgO: Mn<sup>2+</sup> (сертификат калибровки № 04/910–2012). Масса образцов измерялась на аналитических весах ВЛР-20. Рентгеновскую дифрактометрию проводили на приборе ДРОН-3 (излучение Co K<sub>α</sub>). Комбинированный дифференциальный термический (ДТА), термогравиметрический (ТГ) и дифференциальный термогравиметрический (ДТГ) анализ проведён при помощи дериватографа Q-1500D.

#### Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлена микрофотография торца плёнки ПВХФ, химически дегидрофторированной в течение 3 часов.

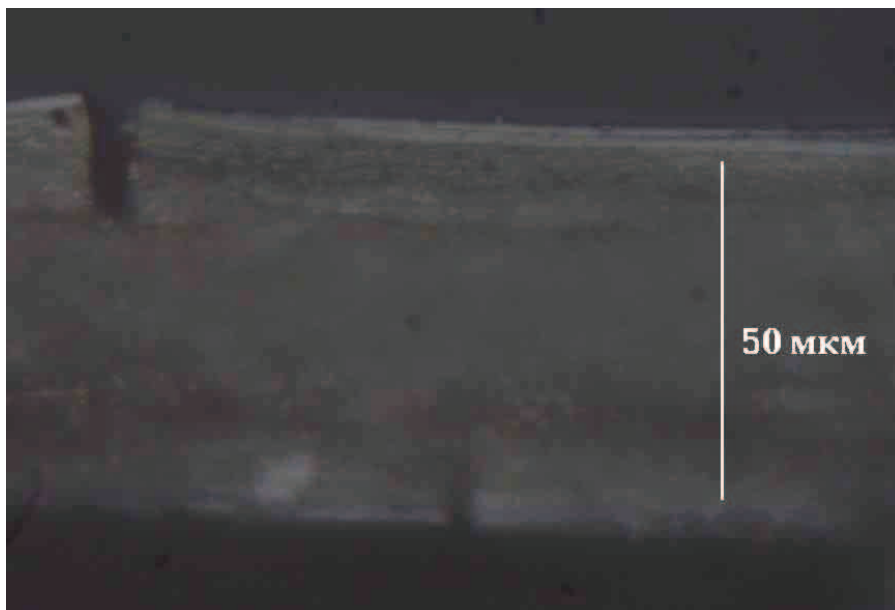


Рис. 2. Микрофотография торца плёнки после химического дегидрофторирования в течение 3 часов

Fig. 2. Micrograph of film end after chemical dehydrofluorination during 3 hours

Заметно гетерогенное строение образца, состоящего по меньшей мере из трёх слоев. Естественно предположить, что два внешних слоя приблизительно одинаковой толщины – частично карбонизованные области, образовавшиеся в результате взаимодействия полимера с дегидрофторирующей смесью. В них наблюдаются поперечные трещины, глубина которых практически совпадает с толщиной этих областей. Карбонизованные слои разделены

визуально более однородным слоем не прореагировавшего полимерного вещества. Анализ снимка свидетельствует, что приблизительно половина объёма образца за 3 часа химической обработки испытала частичную карбонизацию. Характер трещин соответствует уменьшению объёма вещества при карбонизации.

Методом ДТА при скорости нагрева печи 10 °С в минуту были исследованы исходная и химически

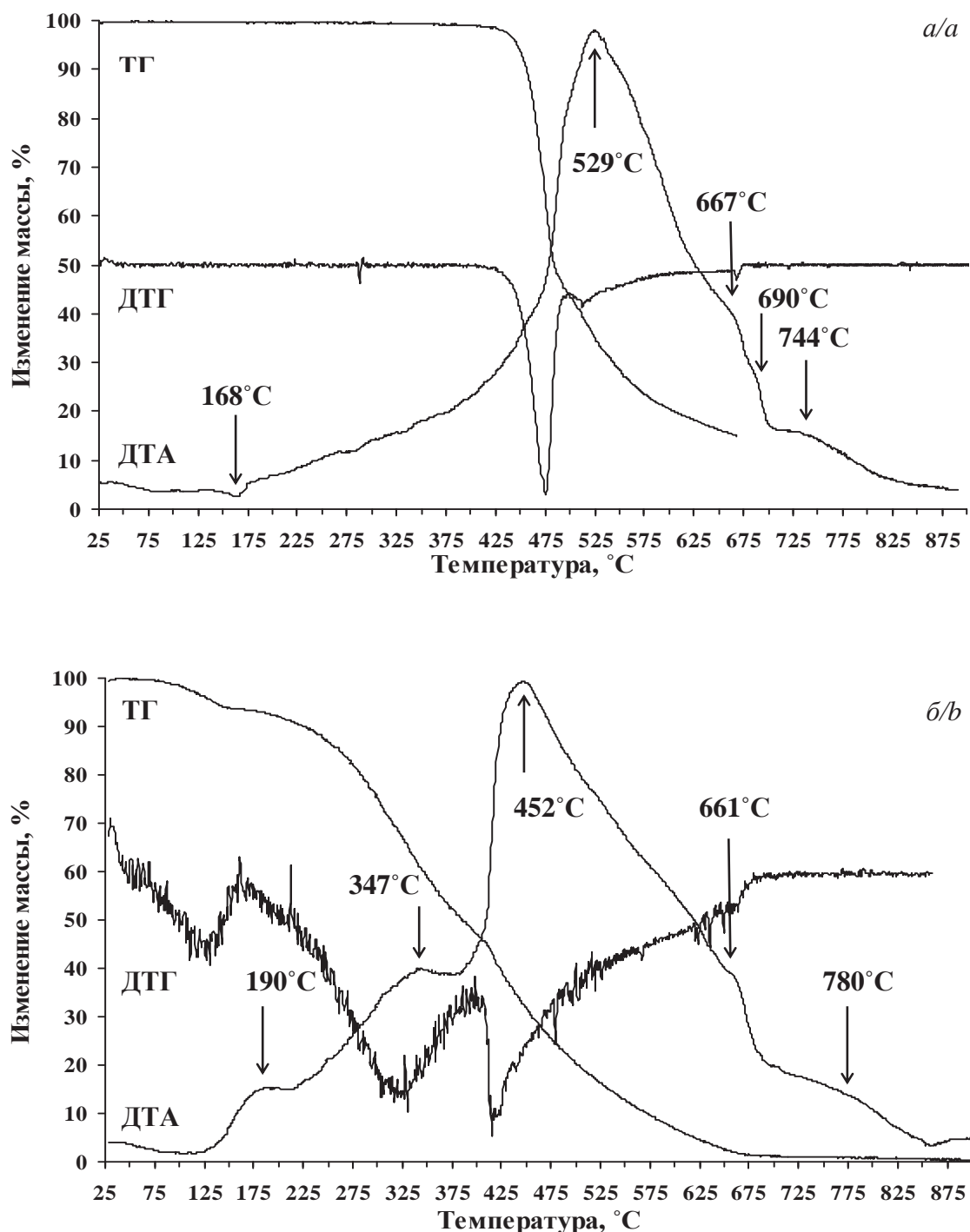


Рис. 3. Кривые ДТА, ТГ и ДТГ для исходной (а) и карбонизованной в течение 3 часов (б) пленки Ф2МЭ

Fig. 3. Curves of DTA, TG and DTG for original F2ME film (a) and the one carbonized during three hours

дегидрофторированная пленки ПВДФ. На панелях *a* и *b* рис. 3 приведены кривые ДТА, ТГ и ДТГ, соответственно, исходного и карбонизованного образцов.

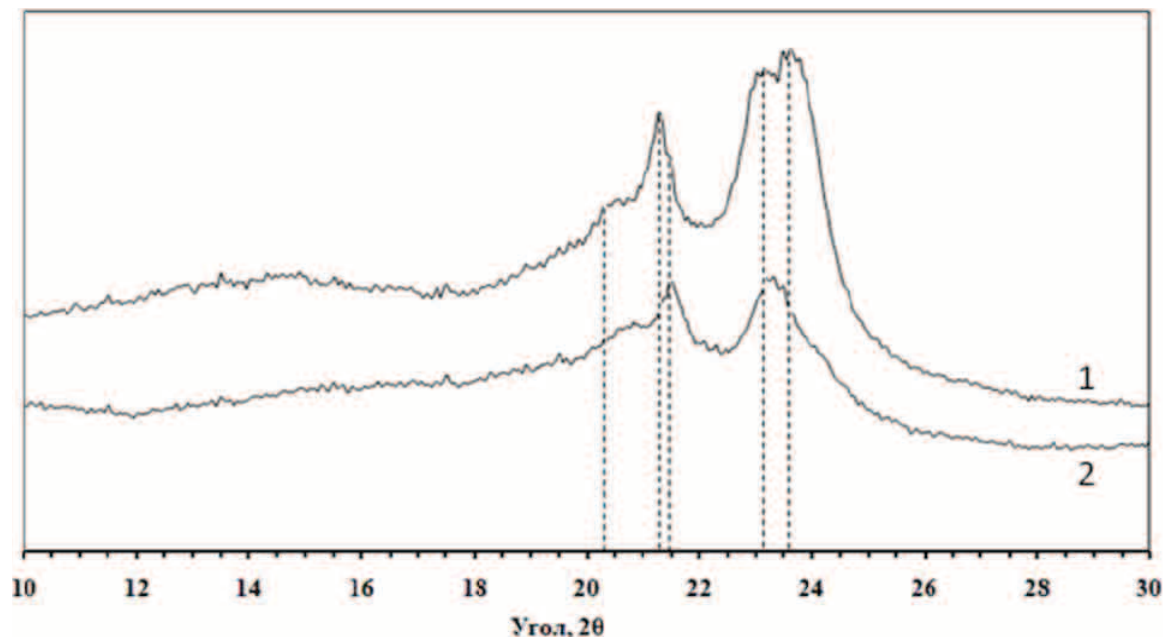
Из рис. 3, *a* видно, что у исходного образца наблюдается небольшой не сопровождаемый изменением массы эндотермический эффект при температуре 168 °С, соответствующей области размягчения полимера. До температуры 420 °С изменений массы образца не происходит. При дальнейшем повышении температуры происходит резкое уменьшение массы образца в два этапа при температурах 470 и 525 °С. Максимальный экзотермический эффект при температуре 529 °С обусловлен сгоранием полимера. Кроме основного максимума, на кривой ДТА наблюдаются три экзотермических эффекта меньшей интенсивности при температурах 667, 690 и 744 °С.

Кривые, полученные при термическом анализе химически карбонизованной пленки (рис. 3, *b*), существенно отличаются. При нагреве карбонизованного образца не наблюдается эффекта, связанного с плавлением исходного полимера. Карбонизованный образец начинает терять массу при достижении температуры 90 °С. Потеря массы происходит в три этапа и составляет при 155, 405 и 690 °С соответственно 7, 55 и 98 %. Максимальный экзотермический эффект наблюдается при температуре 452 °С. Также наблюдаются 3 экзотермических эффекта меньшей интенсивности при температурах 347, 661, 780 °С.

Исходная пленка ПВДФ остается стабильной и не подвергается термической деструкции до температуры 425 °С. Образец, подвергавшийся химиче-

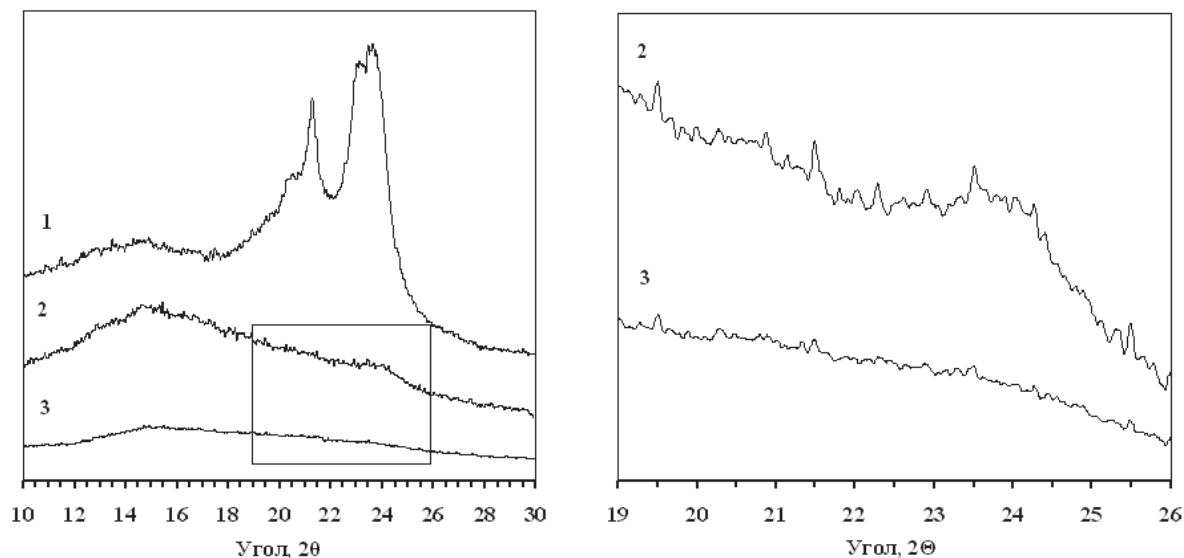
скому дегидрофторированию, начинает терять массу при достижении температуры 75 °С. Первая ступень потери массы в температурном диапазоне 75...155 °С, составляющая 7 %, может быть связана с удалением воды, абсорбированной на поверхности полимера. Вторая ступень в температурном диапазоне 155...405 °С (55 %) является следствием термической деструкции карбонизованного слоя, так как исходный ПВДФ в этом температурном диапазоне остается стабильным. Дальнейшая потеря массы образца, сопровождающаяся максимальным эндотермическим эффектом, связана со сгоранием исходного полимера и его карбонизованных производных. При химическом ДГФ в объеме и на поверхности модифицированного слоя образуются двойные и тройные углерод-углеродные связи, а также дефектные структуры в виде обрывов и шпик-волок цепей. Эти изменения проявляются в возникновении слабого сигнала ЭПР, который в исходной пленке отсутствует. При последующей термической обработке деструкция карбонизованного слоя приводит к существенному росту концентрации парамагнитных центров.

На рис. 4 представлены дифрактограммы исходной и термически обработанной при 250 °С в течение 5 минут без предварительного химического воздействия пленок ПВДФ. На дифрактограмме исходного полимера можно заметить широкое гало (10...18°) и два максимума с явными наплывами, интенсивность которых сравнима с таковыми собственно максимумов. После нагревания исходного ПВДФ выше температуры плавления происходит изменение формы, углового положения и интенсивностей данных особенностей.



**Рис. 4.** Дифрактограммы исходной (1) и термически обработанной при 250 °С без предварительной химической обработки (2) пленок ПВДФ

**Fig. 4.** Diffraction patterns of the original poly (vinylidene fluoride) film (1) and the one heat treated at 250 °С without preliminary chemical treatment (2)



**Рис. 5.** Дифрактограммы исходной пленки (1), подвергнутой химической карбонизации в течении 3 часов (2) и последующей термической обработке при 250 °С (3)

**Fig. 5.** Diffraction patterns of the original film (1), the one chemically carbonized during three hours (2) and heat treated at 250 °C (3)

При химическом ДГФ происходит резкое уменьшение их интенсивности (рис. 5, дифрактограммы 1 и 2). Последующая термическая обработка химически модифицированного ПВДФ приводит к полному исчезновению дифракционных максимумов, присущих исходному полимеру (рис. 5, дифрактограмма 3).

Перейдём к анализу данных ЭПР спектроскопии. Как было отмечено выше, в исходной плёнке парамагнитные центры отсутствуют. При термообработке до 250 °С без предварительного химического воздействия полимер остаётся магнитно неактивным. Следовательно, регистрируемый сигнал относится только к карбонизованному слою вещества. Спектры ЭПР поглощения всех образцов были записаны в одинаковых условиях.

Для определения погрешности измерений параметров линии поглощения при одинаковых настройках прибора производилась многократная (41 раз) запись сигнала ЭПР от одного и того же образца, подвергнутого последовательно химической обработке в течение 3 часов и отжигу при 250 °С в течение 40 минут. Случайная погрешность вычислялась по стандартному алгоритму и составила для  $g$ -фактора и ширины линии, соответственно, 0,0013 и 0,04 мТл. Интегральная интенсивность находилась методом двойного интегрирования и нормировалась на массу образца. Относительная погрешность измерения интегральной интенсивности составила 19 %.

В таблице представлены результаты измерений параметров линии ЭПР поглощения в зависимости от продолжительности изотермической выдержки. Интенсивность сигнала ЭПР монотонно растёт, а ширина линии уменьшается с увеличением продолжительности изотермической выдержки. При этом положение линии поглощения в пределах погрешности постоянно.

**Таблица.** Параметры линии сигнала ЭПР

**Table.** ESR signal line parameters

Продолжительность изотермической выдержки (мин.) Duration of isothermal annealing (min)	$g$ -фактор $g$ -factor	$\Delta H$ , мТл	Интегральная интенсивность, усл. ед. Integral intensity, arb. units
0	2,0031	1,70	1
1	2,0026	0,89	1,22
5	2,0026	0,77	1,65
10	2,0028	0,64	2,02
60	2,0027	0,54	3,66

### Заключение и выводы

Рост интегральной интенсивности ЭПР поглощения при увеличении продолжительности изотермической выдержки свидетельствует об образовании парамагнитных центров в результате прогрессивной термической деструкции карбонизованного слоя. Данная гипотеза подтверждается результатами дифференциального термического анализа.

Поскольку химической модификации подвергается при данных условиях опыта лишь около половины полимерного вещества, остальная его часть должна проявляться в рентгеновских дифрактограммах приблизительно так, как выглядит кривая 2 на рис. 4. Поэтому причины полного исчезновения дифракционных максимумов, характерных для исходного полимера, в результате термообработки химически дегидрофторированного ПВДФ являются интригующими и требуют проведения специального систематического исследования.

По результатам проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы:

1. Разработан способ получения на поверхности пленки поливинилиденфторида (ПВДФ) нового



- углеродного материала, обладающего магнитной активностью.
- Измерены параметры спектров ЭПР образцов частично дегидрофторированного химическим путём поливинилиденфторида, подвергнутых последующей термической обработке при 250 °С с различной продолжительностью изотермической выдержки.
  - На основе данных дифференциального термического анализа высказаны предположения о возможном механизме монотонного роста кон-

центрации парамагнитных центров при увеличении времени изотермического отжига.

*Выражаем благодарность доценту кафедры радиофизики и электроники Челябинского государственного университета А.А. Федию за неоценимую помощь в ремонте и настройке радиоспектрометра РЭ-1306.*

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации в сфере научной деятельности (НИР № 2531 «Синтез и свойства магнитоактивного слоя на поверхности пленки поливинилиденфторида (ПВДФ)»).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Шахова И.В., Беленков Е.А. Структура карбиноидных нанотрубок и карбинофуллеренов // Физика твердого тела. – 2011. – Т. 53. – Вып. 11. – С. 2265–2272.
- Heimann R.B., Evsyukov S.E., Kavan L. Carbyne and carbynoid structures. – Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1999. – 446 p.
- Природный монокристаллический ?-карбин / Т.Г. Шумилова, Ю.В. Данилова, М.В. Горбунов, С.И. Исаенко // Доклады Академии Наук. – 2011. – Т. 436. – Вып. 3. – С. 394–396.
- Кудрявцев Ю.П., Евсюков С.Е., Бабаев В.Г. Эффективная дегидрофторизирующая система для поливинилиденфторида // Изв. АН СССР. Сер. хим. – 1992. – Вып. 5. – С. 1223–1225.
- Chemical dehydrochlorination of polytrichlorobutadienes. A new route to carbynes / I.I. Vointseva, L.M. Gil'man, Yu.P. Kudryavtsev, S.E. Evsyukov, L.A. Pesin, I.V. Gribov., N.A. Moskvina, V.V. Khvostov // Europ. Polymer Journal. – 1996. – V. 32. – № 1. – P. 61–68.
- Евсюков С.Е., Кудрявцев Ю.П., Коршак Ю.В. Химическое дегидрогалогенирование галогеносодержащих полимеров // Успехи химии. – 1991. – Т. 60. – Вып. 4. – С. 764–798.
- Оценка глубины и скорости проникновения дегидрофторизирующей смеси в поливинилиденфторид методом ИК-спектроскопии / А.А. Волегов, Л.А. Песин, И.Г. Маргамов, С.Е. Евсюков, О.В. Корякова, В.А. Кочедыков // Известия Челябинского научного центра. – 2006. – Т. 34. – Вып. 4. – С. 26–31.
- Оптические свойства и ЭПР-поглощение химически дегидрофторированного поливинилиденфторида / Н.А. Мавринская, Л.А. Песин, М. Баумгартен, Е.М. Байтингер, А.В. Мавринский, С.Е. Евсюков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2008. – Т. 107. – Вып. 7. – С. 80–88.
- Влияние условий и продолжительности хранения на интенсивность сигнала ЭПР химически дегидрофторированных производных поливинилиденфторида / Н.А. Мавринская, А.В. Мавринский, М. Баумгартен, Е.М. Байтингер, С.Е. Евсюков, Л.А. Песин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2008. – Т. 122. – Вып. 22. – С. 89–91.
- Влияние термической обработки на магнитную активность продуктов химической карбонизации поливинилиденфторида / В.Е. Живулин, Л.А. Песин, В.М. Морилова, О.В. Корякова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2014. – Т. 6. – № 2. – С. 56–62.
- Кочервинский В.В. Структура и свойства блочного поливинилиденфторида и систем на его основе // Успехи химии. – 1996. – Т. 65. – Вып. 10. – С. 936–987.

*Поступила 24.05.2014 г.*

UDC 539.232:543.429.23

## INFLUENCE OF ISOTHERMAL HEAT-TREATMENT DURATION ON MAGNETIC AND STRUCTURAL PROPERTIES OF CHEMICALLY CARBONIZED POLY (VINYLIDENE FLUORIDE) DERIVATIVES

**Vladimir E. Zhivulin,**

Chelyabinsk State Pedagogical University, 69, Lenin Avenue,  
Chelyabinsk, 454080, Russia. E-mail: zhivulinve@mail.ru

**Leonid A. Pesin,**

Dr. Sc., Chelyabinsk State Pedagogical University, 69, Lenin Avenue,  
Chelyabinsk, 454080, Russia. E-mail: pesinla@mail.ru

**Olga A. Mezhenina,**

Chelyabinsk State University, 129, Kashirin Brothers Street,  
Chelyabinsk, 454001, Russia. E-mail: ink1@list.ru

**Igor N. Kovalyov,**

Cand. Sc., Chelyabinsk State University, 129, Kashirin Brothers Street,  
Chelyabinsk, 454001, Russia. E-mail: ink1@list.ru

**Natalia A. Zlobina,**

Chelyabinsk State Pedagogical University, 69, Lenin Avenue,  
Chelyabinsk, 454080, Russia. E-mail: tasha558559@mail.ru

**Mikhail A. Gavrilov,**

Chelyabinsk State Pedagogical University, 69, Lenin Avenue,  
Chelyabinsk, 454080, Russia. E-mail: super.mig1212@ya.ru

**Viktoriya M. Morilova,**

Snezhinsk Institute of Physics and Technology, 8, Komsomolskaya Street,  
Snezhinsk, 456776, Russia. E-mail: vika\_m@list.ru.

**Olga V. Koryakova,**

Cand. Sc., Organic Chemistry Institute, 22, S. Kovalevskaya Street,  
Ekaterinburg, 620990, Russia. E-mail: ir@ios.uran.ru

**Relevance of the work:** Modern science and technology show interest to use of low-dimensional and nanodimensional materials based on carbon. One of the most prospective materials for synthesis of similar structures is poly (vinylidene fluoride). The same amount of fluorine and hydrogen in polymeric chains of this material allows achieving high extent of its dehydrofluorination by elimination of HF molecules. At gradual penetration of dehydrofluorinating chemical reagents in depth of a poly (vinylidene fluoride) film, carbon heterolayers are formed on its surface. They differ in residual fluorine content and electric conductivity. Such heterostructures with flexible polymeric basis substrate can be demanded by modern microelectronics. Therefore study of their physical and chemical properties seems to be urgent.

**The main aim of the research** is to study the effect of isothermal annealing duration at 250 °C on magnetic and structural characteristics of poly (vinylidene fluoride) samples partially dehydrofluorinated via a chemical way.

**The methods used in the study:** ESR-spectroscopy, differential thermal analysis, thermogravimetric and differential thermogravimetric analysis, X-ray diffraction.

**The results:** The authors have developed the method for producing a new magnetically active carbon material on a poly (vinylidene fluoride) film surface. The parameters of ESR spectra of poly (vinylidene fluoride) samples partially dehydrofluorinated via a chemical way were measured. The samples were subjected to subsequent heat treatment at 250 °C with various duration of isothermal annealing. Based on the data of differential thermal analysis the assumptions are drawn on possible mechanism of regular elevation in paramagnetic centers content at increase in time of isothermal annealing.

### Key words:

Poly (vinylidene fluoride), electron spin resonance (ESR), differential thermal analysis, X-ray diffraction, dehydrofluorination, isothermal annealing.

The authors appreciate the associate professor of radio-physics and electronics department of Chelyabinsk State University A.A. Fediy for invaluable help in repairing and adjusting radiospectrometer RE-1306.

The research was carried out within the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the field of scientific activity (NIR № 2531 «Synthesis and properties of magnetic layer on the surface of polyvinylidene fluoride film (PVDF)»).

## REFERENCES

1. Belenkov E.A., Shakhova I.V. Structure of Carbynoid Nanotubes and Carbynofullerenes. *Physics of the solid state*, 2011, vol. 53, Iss. 11, pp. 2385–2392.
2. Heimann R.B., Evsyukov S.E., Kavan L. *Carbyne and carbynoid structures*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1999. 446 p.
3. Shumilova T.G., Danilova Yu.V., Gorbunov M.V., Isaenko S.I. Natural Monocrystalline  $\beta$ -Carbyne. *Doklady Earth Sciences*, 2011, vol. 436, Iss. 3, pp. 152–154.
4. Kudryavtsev Yu. P., Evsyukov S.E., Babaev V.G. Effektivnaya degidrotoriruyushchaya sistema dlya polivinilidenftorida [An efficient dehydrofluorinating system for poly(vinylidene fluoride)]. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Seriya khimicheskaya – Reports of the Russian Academy of Sciences, Chemistry series*, 1992, Iss. 5, pp. 1223–1225.
5. Vointseva I.I., Gil'man L.M., Kudryavtsev Yu.P., Evsyukov S.E., Pesin L.A., Gribov I.V., Moskvina N.A., Khvostov V.V. Chemical dehydrochlorination of polytrichlorobutadienes. A new route to carbines. *Europ. Polymer Journal*, 1996, vol. 32, no. 1, pp. 61–68.
6. Evsyukov S.E., Kudryavtsev Yu.P., Korshak Yu.V. Chemical dehydrohalogenation of halogen-containing polymers. *Russ Chem. Rev.*, 1991, vol. 60, Iss. 4, pp. 373–390.
7. Volegov A.A., Pesin L.A., Margamov I.G., Evsyukov S.E., Koryakova O.V., Kochedykov V.A. Otsenka glubiny i skorosti proniknoveniya degidrotoriruyushchey smesi v polivinilidenftorid metodom IK-spektroskopii [Estimation of the depth and rate of dehydrofluorinating mixture penetration into polyvinylidene fluoride via IR technique]. *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra – Reports of the Chelyabinsk Scientific Center*, 2006, vol. 34, Iss. 4, pp. 26–31.
8. Mavrinskaya N.A., Pesin L.A., Baumgarten M., Baitinger E.M., Mavrinsky A.V., Evsyukov S.E., Opticheskie svoystva i EPR-pogloshchenie khimicheskii degidrotorirovannogo polivinilidenftorida [Optical properties and ESR absorption of chemically dehydrofluorinated polyvinylidene fluoride]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of the South Ural State University*, 2008, vol. 107, Iss. 7, pp. 80–88.
9. Mavrinskaya N.A., Mavrinsky A.V., Baumgarten M., Baitinger E.M., Evsyukov S.E., Pesin L.A., Vliyanie usloviy i prodolzhitel'nosti khraneniya na intensivnost signala EPR khimicheskii degidrotorirovannykh proizvodnykh polivinilidenftorida [Influence of conditions and period of storage of chemically dehydrofluorinated derivatives of the polyvinylidene fluoride on electron paramagnetic resonance signal strength]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of the South Ural State University* 2008, vol. 122, Iss. 22, pp. 89–91.
10. Zhivulin V.E., Pesin L.A., Morilova V.M., Koryakova O.V. Vliyanie termicheskoy obrabotki na magnitnyuyu aktivnost produktov khimicheskoy karbonizatsii polivinilidenftorida [Heat-treatment influence on magnetic activity of chemical polyvinylidene fluoride carbonification products]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo universiteta. Seriya Matematika. Mekhanika. Fizika – Bulletin of the South Ural State University (Series Mathematics. Mechanics. Physics)*, 2014, vol. 6, no. 2, pp. 56–62.
11. Kochervinsky V.V. The structure and properties of block polyvinylidene fluoride and systems based on it. *Russ Chem. Rev.*, 1996, vol. 65, Iss. 10, pp. 865–913.

Received: 24 May 2014.

УДК 369.223.256

## ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ ХИРУРГИИ, С ЦЕЛЮ УПРАВЛЕНИЯ СТЕПЕНЬЮ СМАЧИВАЕМОСТИ

**Ходыревская Юлия Ивановна,**

мл. науч. сотр. лаборатории новых биоматериалов  
ФГБУ «Научно-исследовательский институт комплексных проблем  
сердечно-сосудистых заболеваний» СО РАМН, Россия, 650002,  
г. Кемерово, Сосновый бульвар, 6. E-mail: aiger2350@yandex.ru

**Твердохлебов Сергей Иванович,**

канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры теоретической и экспериментальной  
физики ФГАО «Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет»,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: tverd@tpu.ru

**Кудрявцева Юлия Александровна,**

д-р биол. наук, заведующая лабораторией новых биоматериалов ФГБУ  
«Научно-исследовательский институт комплексных проблем  
сердечно-сосудистых заболеваний» СО РАМН, Россия, 650002,  
г. Кемерово, Сосновый бульвар, 6. E-mail: jackie1970@mail.ru

*Полимерные материалы характеризуются низкими значениями поверхностной энергии, плохо смачиваются растворителями и склеиваются, имеют низкую адгезию к материалам и прочие недостатки. Актуальность работы обусловлена необходимостью создания определенных поверхностных свойств полимерных протезов, используемых в сердечно-сосудистой хирургии, для повышения био- и гемосовместимости. Одним из наиболее перспективных и современных методов модифицирования поверхности полимеров является воздействие низкотемпературной плазмы. Современные плазмохимические методы имеют преимущества по сравнению с химическим модифицированием, при котором используются агрессивные реагенты и их соединения.*

**Цель работы:** изменение поверхностных свойств полимерных материалов, предназначенных для сердечно-сосудистой хирургии, методами плазмохимического модифицирования.

**Методы исследования:** использована современная технология изготовления полимерных изделий – метод электроспиннинга, позволяющий получать пористые структуры, добавлять в них живые клетки и активные вещества. Выбран экологически и химически безопасный метод воздействия на поверхность материала – плазмохимическое модифицирование, не оказывающее влияние на его объемные физические свойства. Модифицирование осуществлялось на разработанной в лаборатории № 1 ИФВТ ТПУ электродной системе с преионизатором (руководитель – Ремнев Г.Е.).

**Результаты:** предложен способ управления поверхностными свойствами полимерных изделий, ответственными за степень смачиваемости и свободную энергию поверхности. Показано, что плазмохимические методы воздействия газового разряда на поверхность полимерных материалов позволяют регулировать их контактные свойства. Основные изменения степени смачиваемости происходят в течение короткого времени воздействия импульсной плазмы атмосферного давления на поверхность полимерного материала (от одной до шестидесяти секунд). Значения краевого угла смачивания для модифицированных полимеров зависят от природы газовой среды и условий обработки в плазме. Изменяя мощность и частоту следования импульсов и время обработки, можно управлять свободной энергией поверхности, что позволяет регулировать смачиваемость, делая поверхность в большей степени гидрофобной, либо гидрофильной.

### **Ключевые слова:**

*Плазменное модифицирование, биосовместимые полимеры, свободная энергия поверхности, смачиваемость, гидрофильность, гидрофобность.*

### **Введение**

По мере развития сосудистой хирургии все больше больных с сердечно-сосудистыми заболеваниями подвергаются реконструктивно-восстановительным операциям. Лечение сердечных патологий зачастую выполняется с использованием аутотрансплантатов, однако во многих случаях применение синтетических протезов различных конструкций предпочтительно.

Актуальность работы определяется тем, что существующие модели протезов в недостаточной ме-

ре приближены по своим свойствам к естественным сосудам, что ведет к большому количеству послеоперационных осложнений.

В современной реконструктивной хирургии сердца и сосудов широко используются имплантаты из полимерных материалов, которые должны иметь требуемые морфологические, физико-механические и поверхностные свойства. Развитие методов изготовления и модифицирования полимеров и изделий на их основе поможет перейти к решению важнейших задач теоретической и практической кардиологии [1, 2].



Одним из перспективных и современных методов модифицирования поверхности полимеров является использование низкотемпературной плазмы, воздействие которой позволяет существенно изменять свойства их поверхности [3–6].

Экологически чистые современные плазмохимические методы значительно выигрывают по сравнению с химической модификацией, при которой используются такие агрессивные реагенты, как кислоты, гидроксиды, щелочноземельные металлы и их соединения [7].

Существенной характеристикой полимерных изделий является степень их смачиваемости. Воздействие плазмы на поверхность полимера позволяет изменять его контактные свойства – смачивание, адгезию, способность к склеиванию и другие. Как правило, изменение поверхностных свойств полимеров под воздействием плазмы сопровождается очисткой поверхности от различного рода загрязнений, образованием или перераспределением полярных групп различной химической природы, обеспечивающих определенные свойства модифицированных поверхностей. Состав, структура и свойства таких полярных групп зависят как от природы полимера, так и от характеристик плазмы, природы плазмообразующего газа. Если в качестве рабочего газа плазмы используется кислород или воздух, то на поверхности полимера образуются кислородсодержащие и другие полярные группы (карбонильные, спиртовые, перекисные, простые и сложные эфирные, лактонные и т. п.). В случае применения аммиака или его смесей с водородом на поверхности возникают азотсодержащие группы. Воздействие разряда в атмосфере инертных газов приводит к образованию активных свободных радикалов, которые на воздухе превращаются в гидроперекисные и перекисные, а затем – в стабильные кислородсодержащие полярные группы [8–10].

Таким образом, целью данного исследования являлось изменение методом плазмохимического модифицирования степени смачиваемости поверхности полимерных материалов, предназначенных для сердечно-сосудистой хирургии.

#### Материалы и методы исследования

Материалы, предназначенные для регенерации и временного замещения пораженных участков сердечно-сосудистой системы, должны отвечать многочисленным требованиям и представлять собой нетоксичные биосовместимые полимеры. Биополимеры медицинского назначения – это инертные или разлагаемые полимеры, способные длительно выполнять необходимые функции или разлагаться на простые метаболиты и выводиться организмом за установленный срок без вреда для человека в целом, что во многих случаях это сопровождается образованием новых тканей [2].

Биосовместимые полимеры, способные выступить в роли каркаса сосудистого имплантата малого диаметра, должны обладать рядом характери-

стик, которые, в конечном счете, позволят приблизить свойства изделия к свойствам естественных сосудов.

Одним из самых востребованных биомедицинских полимеров на сегодняшний день является полилактид (PLA – Poly Lactide Acid), представляющий собой продукт полимеризации молочной кислоты. Полимолочная кислота – биоразлагаемый, биосовместимый, термопластичный полиэфир. PLA обладает следующими свойствами: биологическая безопасность, нетоксичность, отсутствие усадки, нерастворимость в спиртах и воде, биоразлагаемость, растворимость в большинстве органических растворителей. Полимолочная кислота нашла свое применение для производства изделий с коротким сроком службы, хирургических нитей, имплантатов, штифтов и прочих изделий медицинского назначения [11].

Фторопласты характеризуются широким диапазоном механических свойств. Благодаря наличию атомов фтора они обладают высокой химической стойкостью к действию различных агрессивных сред, не растворяются многими органическими растворителями, имеют достаточно высокие диэлектрические свойства, низкий коэффициент трения и устойчивы к износу. Кроме того, фторопласт отличается малой пористостью и гидрофобностью, чем и обусловлен интерес к данному полимеру в научных исследованиях. Фторопласты используются для изготовления имплантатов с большим сроком службы [12].

Интерес для практической медицины представляют данные о влиянии плазмохимической обработки поверхности как материалов с различным сроком деградации, так и биостабильных. Для исследований были изготовлены пленочные образцы из разлагаемого и стабильного модельных материалов – полимолочной кислоты PL-38 (PURAC) и сополимера тетрафторэтилена с винилиденфторидом Ф-42 (Галополимер).

Плазмохимическое модифицирование поверхности исследуемых материалов проводили в атмосфере газового барьерного разряда на разработанной в лаборатории № 1 ИФВТ ТПУ электродной системе с преионизатором, электрические характеристики барьерного разряда которой приведены на рис. 1. Зажигание разряда в установке сопровождается заметным увеличением тока, пиковое значение которого достигается при напряжении порога зажигания (18 кВ). Этому процессу соответствует резкий рост проводимости, возникновение светящихся разрядных каналов и образование большого количества ионов озона.

Модифицирование поверхности образцов, закрепленных на аноде установки, проводилось в импульсной плазме озона атмосферного давления в двух режимах работы генератора. В первом режиме энергия в импульсе составила 0,1 Дж при частоте следования 350 Гц, во втором – 0,4 Дж при частоте следования 1000 Гц. Для обоих режимов длительность одного импульса была равна 100 нс,

напряжение на электродах 20 кВ, время воздействия плазмы барьерного разряда на материал изменялось от 2 до 120 секунд.

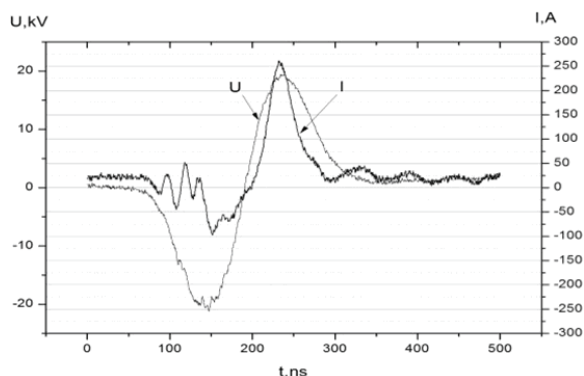


Рис. 1. Осциллограммы тока (I) и напряжения (U) барьерного разряда

Fig. 1. Oscillograph patterns of current (I) and voltage (V) of barrier discharge

Наиболее важным в практическом отношении результатом модифицирования полимерных материалов является изменение их поверхностных характеристик, в первую очередь смачиваемости, которая характеризуется краевым углом смачивания и свободной энергией поверхности [13].

Эксперименты по определению угла смачивания и свободной энергии поверхности проводили с помощью прибора DSA20 (EasyDrop) для измерения краевого угла, схема которого представлена на рис. 2.

Высота стандартного столика – 4, на котором помещается исследуемый образец, регулируется с помощью рукоятки. Видеокамера – 2 записывает изображение капли, подающей с помощью дозатора – 3, и передает его на компьютер – 5, далее программа производит расчет и анализ [14].

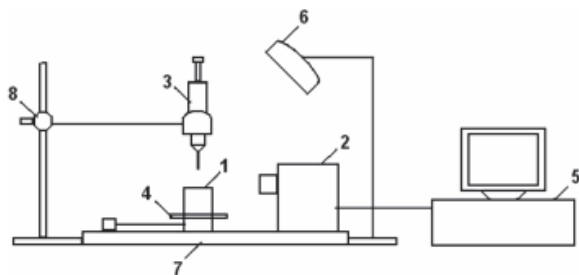


Рис. 2. Установка для определения краевого угла смачивания. 1 – исследуемый образец; 2 – цифровая видеокамера; 3 – шприц-дозатор; 4 – подвижная платформа; 5 – компьютер; 6 – светильник; 7 – стационарная платформа; 8 – лабораторный штатив

Fig. 2. Installation for determining wetting angle. 1 – the sample; 2 – digital camera; 3 – syringe-dispenser; 4 – mobile platform; 5 – computer; 6 – lamp; 7 – fixed platform; 8 – laboratory tripod

### Результаты и обсуждение

На каждый образец наносилось по три капли воды и глицерина объемом 3 мкл. Данные о краевых углах смачивания одного образца несколькоки-

ми жидкостями позволяют определить свободную энергию поверхности (СЭП) твердого образца. Средние значения краевых углов и СЭП исследуемых образцов из PL-38 приведены в таблице.

Таблица. Краевой угол смачивания и свободная энергия поверхности (СЭП) образцов PL-38 с различным временем обработки

Table. Wetting angle and surface free energy (SFE) of samples PL-38 with different processing time

Время обработки, с Processing time, sec	Краевой угол смачивания, ° Wetting angle, °		СЭП, мДж/м² DFE, mJ/m²		
	вода water	глицерин glycerine	дисперсная dispersed	поляризационная polarization	полная total
0	46,4±3,37	81,4±5,07	8,20±1,21	109,9±3,25	118,1±4,5
режим 1/mode 1					
2	79,9±4,05	62,5±6,5	11,2±2,07	25,6±2,7	36,8±4,8
15	65,0±8,10	70,1±4,7	3,7±0,9	35,9±2,9	39,6±3,8
30	74,1±19,5	66,8±9,3	15,9±4,4	15,08±4,28	31,0±8,7
50	61,3±4,9	60,2±10,31	10,11±2,6	29,9±3,19	40,01±5,8
120	58,0±2,7	62,8±0,6	5,07±0,28	40,0±0,9	45,07±1,2
режим 2/mode 2					
30	51,9±8,2	61,2±10,12	2,9±1,5	50,7±4,7	53,6±6,2
60	80,0±8,7	87,1±4,16	28,9±2,6	0,9±0,5	29,8±3,1
120	51,7±6,6	58,2±5,8	46,6±3,07	4,80±1,18	51,4±4,25

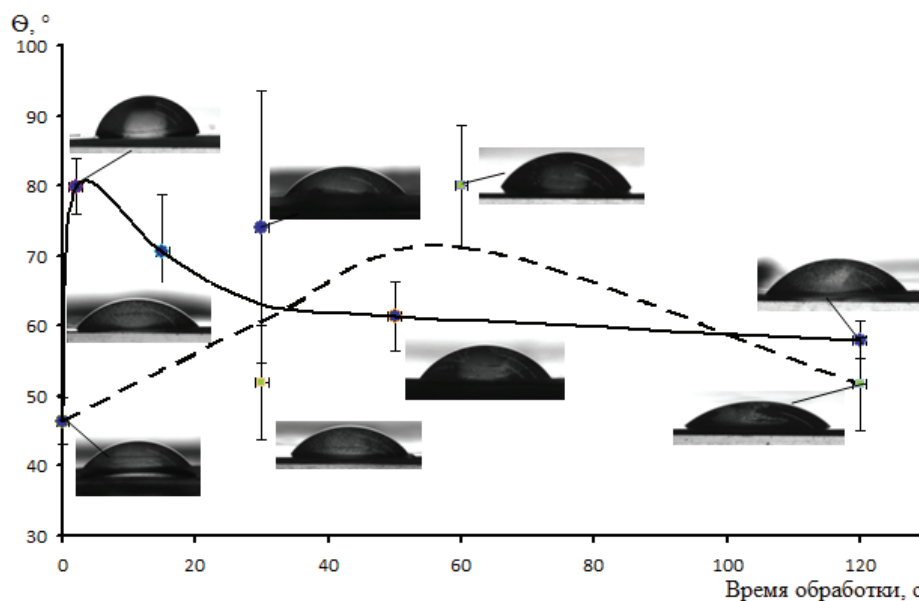
По данным таблицы была построена зависимость краевого угла от времени обработки полимерных материалов при разных режимах модифицирования (рис. 3).

Динамика изменения краевых углов смачивания показывает, что гидрофильность полимера при времени обработки порядка 2–5 секунд для меньшей энергии импульса (режим 1) и 50–60 секунд для энергии импульса, равной 0,4 Дж (режим 2), значительно снижается. При увеличении же времени воздействия атмосферного газового разряда на образец наблюдается постепенное восстановление гидрофильных свойств поверхности полимера. Можно предположить, что увеличение смачиваемости связано с образованием полярных групп в поверхностном слое полимера при взаимодействии с плазмой, содержащей озон [15].

Влияние плазменного модифицирования на свободную энергию поверхности продемонстрировано на рис. 4. Видно, что в начальный момент времени происходит значительное уменьшение свободной энергии поверхности. При увеличении времени обработки полимера в плазме происходит повышение СЭП, однако она остается ниже значения СЭП для образцов, не подвергающихся модифицированию [16].

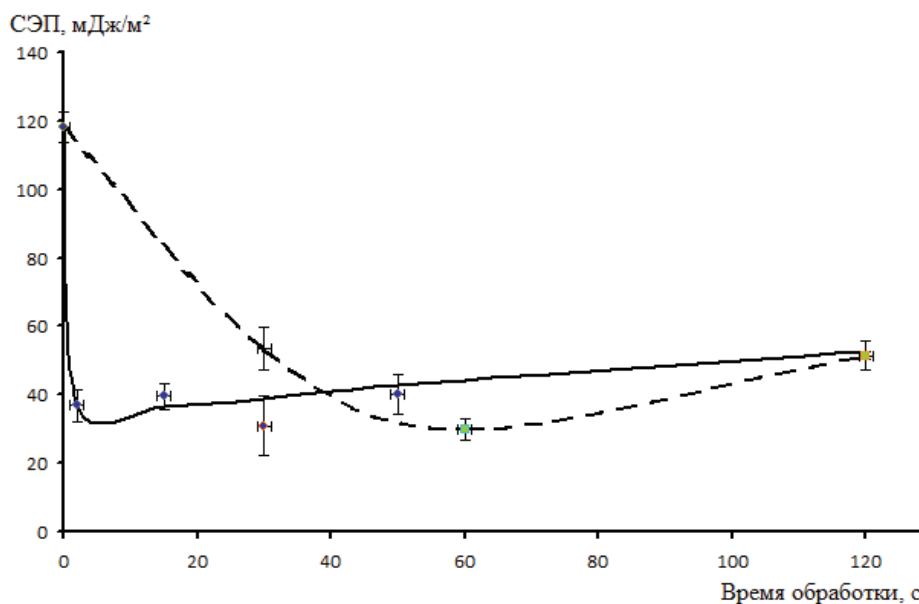
Изменение поверхностных свойств материалов из Ф-42 принципиально отличается от характеристик материалов из PL-38. На рис. 5 приведена зависимость краевого угла образцов из Ф-42 от времени обработки.

Гидрофобность полимера при увеличении времени обработки постепенно увеличивается, выходя на насыщение при времени воздействия разряда



**Рис. 3.** График зависимости краевого угла смачивания  $\theta$  от времени обработки образца. Для режима 1 – пунктир, для режима 2 – сплошная линия

**Fig. 3.** Diagram of wetting angle  $\theta$  dependence on sample processing time. Dotted line is for mode 1, full line is for mode 2



**Рис. 4.** График зависимости СЭП от времени обработки образца из полимолочной кислоты. Для режима 1 – пунктир, для режима 2 – сплошная линия

**Fig. 4.** Diagram of SFE dependence on polylactic acid sample processing time. Dotted line is for mode 1, full line is for mode 2

60 секунд. За уменьшение смачиваемости в данном случае, вероятно, отвечает переориентация полярных групп с поверхности вглубь полимера. При этом конечное состояние поверхности формируется вследствие двух процессов. Стремление к минимуму поверхностной энергии приводит к выходу на поверхность углеродных групп, а образование водородных связей между кислородсодержащими группами препятствуют этому [15, 17].

Значения СЭП, представленные на рис. 6, показывают пик при времени обработки порядка

50–60 секунд. При дальнейшем увеличении времени воздействия плазмы на поверхность полимера СЭП уменьшается.

Активными компонентами плазмы, способными инициировать химические реакции в поверхностных слоях полимера, являются короткоживущие частицы: свободные электроны, свободные атомы и радикалы, образующиеся в зоне электрического разряда [15, 18, 19]. Под воздействием плазмы поверхность полимера может становиться как более гидрофильной, так и более гидрофобной,

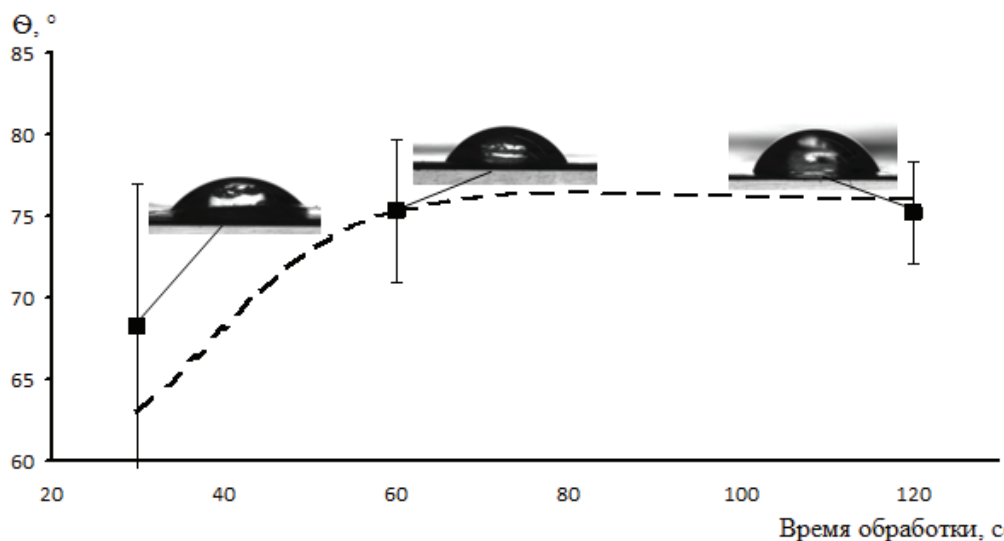


Рис. 5. График зависимости краевого угла смачивания от времени обработки образца из Ф-42 (режим 2)

Fig. 5. Diagram of wetting angle dependence on F-42 sample processing time (mode 2)

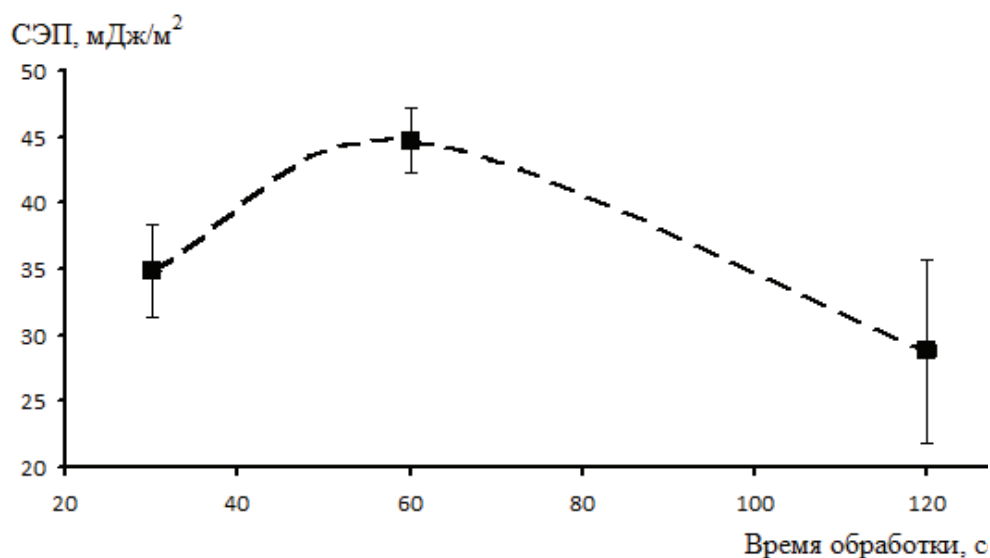


Рис. 6. График зависимости СЭП от времени обработки образца из Ф-42 (режим 2)

Fig. 6. Diagram of SFE dependence on F-42 sample processing time (mode 2)

что характеризуется степенью смачиваемости. В зависимости от значений краевого угла  $\theta$  различают следующие случаи:

- $0 < \theta < 90^\circ$  (острый угол) – смачивание твердой поверхности жидкостью (гидрофильность);
- $\theta > 90^\circ$  (тупой угол) – несмачивание или плохое смачивание (гидрофобность);
- $\theta \rightarrow 0$  (равновесный угол не устанавливается) – растекание (гидрофильность) [20].

Данные о СЭП демонстрируют ее снижение за счет уменьшения полярной компоненты. Дисперсная составляющая, наоборот, возрастает при увеличении времени воздействия газового разряда, что, как можно предположить, обусловлено увеличением шероховатости поверхности, появлением микро-рельефа и пр. Уменьшение полярной компоненты

объясняется изменением числа полярных групп, электрических зарядов и свободных радикалов.

#### Заключение

Было показано, что плазмохимические методы воздействия газового разряда на поверхность полимерных материалов позволяют регулировать её контактные свойства. Основные изменения степени смачиваемости (краевой угол смачивания и свободная энергия поверхности) происходят в течение короткого времени воздействия газового разряда на поверхность полимерного материала (от одной до шестидесяти секунд). Значения краевого угла смачивания для модифицированных полимеров зависят от природы газовой среды и условий обработки в плазме.



Уменьшение мощности и частоты следования импульсов позволяет резко увеличить гидрофобность изделий из полимолочной кислоты в начальный момент времени за счет снижения свободной энергии поверхности. Дальнейшее увеличение времени воздействия плазмы на полимер приводит к частичному восстановлению его гидрофильных свойств.

Модифицирование поверхности фторсодержащих полимеров импульсной плазмой атмосферного давления в течение первых 60 секунд повышает гидрофобность полимера, при увеличении времени воздействия значительных изменений не наблюдается.

Изменяя мощность и частоту следования импульсов, время обработки, можно управлять свободной энергией поверхности, что, в свою очередь, позволяет регулировать смачиваемость, делая поверхность в большей степени гидрофобной либо гидрофильной. Последнее обстоятельство позволит изготавливать изделия из полимерных материалов для различных медицинских приложений.

*Авторы выражают благодарность профессору Г.Е. Ремневу за организацию экспериментов по плазмохимическому модифицированию образцов.*

*Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы (соглашение № 14.578.21.0031), РФФИ (проект № 13-08-98052-р\_сибирь\_a).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воложин Г.А. Основные виды биосовместимых материалов. – М: МГМСУ, 2010. – 17 с.
2. Шереметьев С.В., Штейнберг Е.М. Использование функциональных полимеров в медицине. – Казань: СибАК, 2012. – 145 с.
3. Bryjak M., Gancarz I., Pozniak G. Plasma-modified porous membranes // Chem. Papers. – 2000. – V. 54 (6b) – P. 496–501.
4. Tran T.D, Mori S., Suzuki M. Plasma modification of polyacrylonitrile ultrafiltration membrane // Thin Solid Films. – 2007. – V. 515. – P. 4148–4152.
5. Surface modification of polymeric materials by plasma treatment / E.F. Castro Vidaurre, C.A. Achete, F. Gallo, D. Garcia, R. Simao, A.C. Habert // Materials Research. – 2002. – V. 5. – P. 37–41.
6. Chemical Workbench – integrated environment for materials science / M.A. Deminsky, V. Chorkov, G. Belov et al. // Computational Materials Science. – 2003. – V. 28. – Iss. 2. – P. 169–178.
7. Strobel M., Lyons C.S., Mittal K.L. Plasma Surface Modification of Polymers. Relevance to Adhesion. – The Netherlands: VSP BV, 1984. – 141 p.
8. Vlachopoulou M-E., Tserepi A. A low temperature surface modification assisted method for bonding plastic substrates // Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2009. – № 19. – 6 p.
9. Ефремов М.А., Светцов В.И., Рыбкин В.В. Вакуумно-плазменные процессы и технологии. – Иваново: ГОУВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2006. – 260 с.
10. Кириков А.В., Рыжов В.В., Суслов А.И. Кинетика свободных радикалов в плазме искрового разряда в метане // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25. – № 19. – С. 82–86.
11. Кузнецова И.Г., Северин С.Е. Использование сополимера молочной и гликолевой кислот для получения наноразмерных лекарственных форм // Разработка и регистрация лекарственных средств. Научно-производственный журнал. – 2013. – № 5. URL: <http://pharmjournal.ru/articles/stati/ispolzovanie-sopolimera-molochnoj-i-glikolevoj-kislot-dlya-polucheniya-nano-razmernykh-lekarstvennykh-form-5-noyabr-2013> (дата обращения: 08.08.2014).
12. Колесниченко В.В., Трофимов Д.Н. Фторопластовые покрытия. Опыт и перспективы применения. URL: <http://plastpolymer.org/dokl2.htm> (дата обращения 08.08.2014).
13. Kaelble D.H. Physical Chemistry of Adhesion. – N.Y.: Wiley Inc., 1971. – 141 p.
14. EasyDrop Contact Angle Measuring Instrument: Doubly simple / KRUSS Technical information. 2006. – 4 p.
15. Головатинский С.А. Модификация поверхности полимеров импульсной плазмой атмосферного давления // Вестник Харьковского университета. – 2004. – Т. 24. – № 628. – С. 80–86.
16. Ходыревская Ю.И., Твердохлебов С.И. Плазмохимическая модификация поверхности биополимеров // Актуальные вопросы биомедицинской инженерии: ??I Всероссийская заочная научная конференция для молодых ученых, студентов и школьников. – Саратов, 2013. – С. 10–16.
17. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Интеллект, 2009. – 736 с.
18. Импульсный барьерный разряд как метод обработки воды: активные частицы-окислители в водо-воздушном потоке / Н.А. Яворовский, Я.И. Корнев, С.В. Преис и др. // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 2. – С. 108–112.
19. Гришина И.А., Иванов В.А., Коврижных Л.М. Физика плазмы и плазменные методы // Успехи прикладной физики. – 2013. – Т. 1. – № 4. – С. 415–438.
20. Богданова Ю.Г. Адгезия и ее роль в обеспечении прочности полимерных композитов. – Москва: Изд-во Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, 2010. – 68 с.

*Поступила 15.08.2014 г.*

UDC 369.223.256

## PLASMA-CHEMICAL MODIFICATION OF POLYMER MATERIALS FOR CARDIOVASCULAR SURGERY IN ORDER TO CHANGE THEIR WETTABILITY

**Yuliya I. Khodyrevskaya,**

Federal State Budgetary Institution Research Institute for Complex Issues  
of Cardiovascular Diseases under the Siberian Branch of the Russian Academy  
of Medical Sciences, 6, Sosnovy blvd, Kemerovo, 650002, Russia.  
E-mail: aiger2350@yandex.ru

**Sergey I. Tverdokhlebov,**

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,  
634050, Russia. E-mail: tverd@tpu.ru

**Yuliya A. Kudryavtseva,**

Dr. Sc., Federal State Budgetary Institution Research Institute for Complex Issues  
of Cardiovascular Diseases under the Siberian Branch of the Russian Academy  
of Medical Sciences, 6, Sosnovy blvd, Kemerovo, 650002, Russia.  
E-mail: jackie1970@mail.ru

*Polymeric materials are characterized by low values of the surface energy; they are poorly wetted by solvents, and have low adhesion to different materials and other disadvantages. The relevance of the work stems from the need to develop specific surface properties of the polymer prostheses used in cardiovascular surgery, to increase the biocompatibility and hemocompatibility. One of the most promising and modern methods of surface modification of polymers is the impact of low-temperature plasma. Modern plasma-chemical methods have some advantages in comparison with chemical modification, where aggressive reagents and their compounds are used.*

**The main aim of the research** is to change surface properties of polymer materials for cardiovascular surgery by the plasma chemical modification methods.

**The research methods:** The authors have applied the modern technology of polymer compositions manufacture. This is electrospinning method, which allows obtaining porous structures, adding cells and active substances. The authors selected environmentally and chemically safe impact method to the surface of the obtained products. This is plasma chemical modification, which doesn't influence the physical properties of the final product. Modification was carried out on the electrode system with preionizers, which was developed by the laboratory № 1 of the Institute of Physics High Technologies at Tomsk Polytechnic University (head of the development is Remnev G.E.).

**The results:** The authors proposed the method of handling the surface properties of polymer products, which are responsible for wettability and surface free energy. It was shown that plasma-chemical methods of gas discharge influence on polymeric material surface allow regulating their contact properties. The main changes in wettability degree occur within a short exposure time of pulsed plasma at atmospheric pressure on polymeric material surface (from one to sixty seconds). The values of wettability contact angle for the modified polymers depend on gaseous medium nature and handling conditions in plasma. Changing pulse power and repetition rate and the processing time it is possible to control surface free energy, which allows adjusting wettability, making the surface more hydrophobic or hydrophilic.

### Key words:

Plasma modification, biocompatible polymers, surface free energy, wettability, hydrophilicity, hydrophobicity.

*The authors appreciate professor G.E. Remnev for arranging experiments on plasma-chemical modification of samples.*

*The research was supported by Federal target program (agreement no. 14.578.21.0031), RFBR (project no. 13–08–98052-р\_субирь\_а).*

### REFERENCES

1. Volozhin G.A. *Osnovnye vidy biosovmestimyykh materialov* [Basic types of bio-compatible materials]. Moscow, MSMSU Press, 2010. 17 p.
2. Sheremetev S.V., Shteynberg E.M. *Ispolzovanie funktsionalnykh polimerov v meditsine* [Application of functional polymers in medicine]. Kazan, SibAK Press, 2012. 145 p.
3. Bryjak M., Gancarz I., Pozniak G. Plasma-modified porous membranes. *Chem. Papers*, 2000, vol. 54 (6b), pp. 496–501.
4. Tran T.D, Mori S., Suzuki M. Plasma modification of polyacrylonitrile ultrafiltration membrane. *Thin Solid Films*, 2007, vol. 515, pp. 4148–4152.
5. Castro Vidaurre E.F., Achete C.A., Gallo F., Garcia D., Simao R., Habert A.C. Surface modification of polymeric materials by plasma treatment. *Materials Research*, 2002, vol. 5, pp. 37–41.
6. Deminsky M.A., Chorkov V., Belov G. Chemical Workbench – integrated environment for materials science. *Computational Materials Science*, 2003, vol. 28, Iss. 2, pp. 169–178.
7. Strobel M., Lyons C.S., Mittal K.L. *Plasma Surface Modification of Polymers. Relevance to Adhesion*. The Netherlands, VSP BV, 1984. 141 p.
8. Vlachopoulou M-E, Tserepi A. A low temperature surface modification assisted method for bonding plastic substrates. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, no. 19, 6 p.
9. Efremov M.A., Svetsov V.I., Rybkin V.V. *Vakuumno-plazmennye protsessy i tekhnologii* [Vacuum-plasma processes and techniques]. Ivanovo, GOUVPO Ivan. gos. khim.-tekhnl. un-t Press, 2006. 260 p.
10. Kirikov A.V., Ryzhov V.V., Suslov A.I. Kinetika svobodnykh radikalov v plazme iskrovogo razryada v metane [Kinetics of free

- radicals in plasma of spark discharge in methane]. *Pisma v ZhTF*, 1999, vol. 25, no. 19, pp. 82–86.
11. Kuznetsova I.G., Severin S.E. Ispolzovanie sopolimera molochnoy i glikolevoy kislot dlya polucheniya nanorazmernykh lekarstvennykh form [Application of lactic and glicolic acid sopolymers to obtain nanosized dosage forms]. *Razrabotka i registratsiya lekarstvennykh sredstv. Nauchno-proizvodstvennyy zhurnal*, 2013, no. 5. Available at: <http://pharmjournal.ru/articles/stati/ispolzovanie-sopolimera-molochnoj-i-glikolevoj-kislot-dlya-polucheniya-nanorazmernykh-lekarstvennykh-form-5-noyabr-2013> (accessed 08 August 2014).
  12. Kolesnichenko V.V., Trofimov D.N. *Ftoroplastovye pokrytiya. Opyt i perspektivy primeneniya* [Fluoropolymer covers. Experience and prospects of applying]. Available at: <http://plastpolymer.org/dokl2.htm> (accessed 08 August 2014).
  13. Kaelble D.H. *Physical Chemistry of Adhesion*. N.Y., Wiley Inc., 1971. 141 p.
  14. *EasyDrop Contact Angle Measuring Instrument: Doubly simple / KRUSS Technical information*. 2006. 4 p.
  15. Golovyatinskiy S.A. Modifikatsiya poverkhnosti polimerov impulsnoy plazmoy atmosfernogo davleniya [Modification of polymeric surface by pulse plasma of atmospheric pressure]. *Vestnik Hkarkovskogo universiteta*, 2004, vol. 24, no. 628, pp. 80–86.
  16. Khodyrevskaya Yu.I., Tverdokhlebov S.I. Plazmokhimicheskaya modifikatsiya poverkhnosti biopolimerov [Plasma-chemical modification of bio-polymer surface]. *Aktualnye voprosy biomeditsinskoy inzhenerii: III Vserossiyskaya zaochnaya naychnaya konferentsiya dlya molodykh uchenykh, studentov i shkolnikov* [Current issues in biomedical engineering. Proc. III All-Russian external scientific conference for young researches, students and pupils]. Saratov, 2013. pp. 10–16.
  17. Raizer Yu.P. *Fizika gazovogo razryada* [Gas discharge physics]. Moscow, Intellect Publ., 2009. 736 p.
  18. Yavorovskiy N.A., Kornev Ya.I., Preis S.V. Impulsny barerny razryad kak metod obrabotki vody: aktivnye chastitsy-okislitely v vodo-vozdushnom potoke [Pulse barrier discharge as a method of water treatment: active oxidizer particles in water-air flow]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol. 309, no. 2, pp. 108–112.
  19. Grishina I.A., Ivanov V.A., Kovrizhnykh L.M. Fizika plazmy i plazmennye metody [Plasma physics and plasma methods]. *Uspekhi prikladnoy fiziki*, 2013, vol. 1, no. 4, pp. 415–438.
  20. Bogdanova Yu.G. *Adgesiya i ee rol v obespechenii prochnosti polimernykh kompozitov* [Adhesion and its role in securing strength of polymeric composites]. Moscow, M.V. Lomonosov Moscow State University Press, 2010. 68 p.

Received: 15 August 2014.

УДК 539.9...15

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В He-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> ПЛАЗМЕ, ВОЗБУЖДАЕМОЙ ОСКОЛКАМИ ДЕЛЕНИЯ УРАНА

**Будник Александр Петрович,**

канд. физ.-мат. наук, начальник лаборатории Физических проблем  
ГНЦ РФ – Физико-энергетического института им. А.И. Лейпунского,  
Россия, 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1. E-mail: budnik@ippe.ru

**Кузнецова Елена Эдуардовна,**

науч. сотр. лаборатории Физических проблем ГНЦ РФ –  
Физико-энергетического института им. А.И. Лейпунского, Россия, 249033,  
г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1. E-mail: Kuznetsova.Elena\_IPPEmail.ru

*Создание высокоэнергетических лазеров с ядерной накачкой до сих пор остаётся перспективной и актуальной, но пока не реализованной задачей совместного применения двух высоких технологий: ядерной и лазерной. Экспериментальные исследования являются крайне затратными и небезопасными. Это существенно тормозит прогресс в этой области исследований. Детально разработанные кинетические модели ядерно-возбуждаемой плазмы могут существенно ускорить разработку высокоэнергетических лазеров с ядерной накачкой. Авторами разработана оригинальная многокомпонентная кинетическая модель гелий-азот-водородной активной среды, возбуждаемой осколками деления урана, в которой учитываются все основные процессы селективного заселения рабочих лазерных уровней. Методами математического моделирования установлено, что заселение верхнего лазерного уровня примерно в равной степени определяется как процессами перезарядки атомарных и молекулярных ионов гелия в столкновениях с участием молекулы азота, так и процессами Пеннинга при столкновениях молекулярного азота с возбужденными атомами гелия.*

*Учитывая тот факт, что в типичных условиях ядерной накачки возбуждаемая осколками деления гелий-азот-водородная активная лазерная среда является сильно неоднородной, в настоящей работе был проведен анализ полученных данных математического моделирования. В условиях реального эксперимента по ядерной накачке среды коэффициент усиления мощности пучка лазерного излучения за один проход не сильно отличается как при учете неоднородного распределения энерговклада в активную среду, так и при замене его однородным. При этом мгновенный общий энерговклад в активную среду должен совпадать. Эти отличия приближенно можно учесть, введя эффективный линейный коэффициент потерь  $\beta$ , который равен, согласно расчетам настоящей работы,  $10^{-5} \text{ см}^{-1}$ .*

### **Ключевые слова:**

*Кинетическая модель, коэффициент усиления слабого сигнала, кинетические процессы, генерационные характеристики, лазерное излучение.*

Гелий-азотная смесь, генерирующая лазерное излучение на  $1^-$  системе азота, используется в лазерах как активная среда более 35 лет [1]. Последние четверть века в качестве активной среды преимущественно стала использоваться гелий-азот-водородная активная среда [2].

За это время были выполнены обширные исследования по изучению кинетических процессов гелий-азот-водородной плазмы при накачке среды как традиционными методами [1–5], так и при ядерной накачке [6–8]. Максимальный КПД преобразования энергии, вложенной в такую среду традиционными способами (электронным пучком, разрядом и т. д.), в энергию лазерного излучения был достигнут на длине волны 427,8 нм и составлял около 3 % (например, [2, 4]). При ядерной накачке максимальный достигнутый КПД был на порядок меньше [7, 8].

Существуют две основные точки зрения о том, какие процессы создают инверсную населенность в гелий-азот-водородной активной среде. С одной стороны (например, [4]), считается, что доминирующими каналами накачки верхнего лазерного уровня являются процессы перезарядки при столкновениях с участием ионов He<sup>+</sup> или He<sup>2+</sup> с молекулами N<sub>2</sub>. Согласно другой точке зрения [1, 2], главная роль

отводится процессам Пеннинга при столкновениях молекул азота с возбужденными атомами гелия. При этом при ядерной накачке предсказанные теорией значения КПД преобразования ядерной энергии в энергию лазерного излучения в гелий-азот-водородной активной среде существенно расходились с экспериментальными данными [4, 6–8].

Настоящая работа посвящена изучению кинетических процессов в гелий-азот-водородной активной среде, возбуждаемой осколками деления. Следует отметить, что в настоящее время это единственная активная среда, на которой при ядерной накачке была получена генерация лазерного излучения как в УФ, так и в видимом диапазоне. Целью работы является создание многокомпонентной кинетической модели, позволяющей методами математического моделирования определить достижимые на длине волны 428 нм генерационные характеристики (линейный коэффициент усиления слабого сигнала, максимальный КПД преобразования вложенной в среду осколками деления энергии и др.).

В результате исследований установлено, для корректного описания кинетических процессов в гелий-азот-водородной активной среде в широком диапазоне как начальных давлений газовой смеси,





**Таблица 1.** Основные плазмохимические реакции кинетики верхнего лазерного уровня**Table 1.** The main plasma-chemical reactions of the upper laser level kinetics

№	Плазмохимический процесс Plasma-chemical process	Константа скорости процесса, см <sup>3(n-1)</sup> /с* Process rate constant, cm <sup>3(n-1)</sup> /sec*
1	$N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + H_2 \rightarrow N_2H^+ + H$	$3,38 \times 10^{-16}$
2	$N_2^+(B^2\Sigma_u^+) \rightarrow N_2^+(X^2\Sigma_g^+) + hv_{391}$	$4,00 \times 10^6$
3	$N_2 + He^+ \rightarrow N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + He$	$1,60 \times 10^{-9}$
4	$N_2 + He_2^+ \rightarrow N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + He + He$	$8,25 \times 10^{-10}$
5	$N_2 + He(2^3S) \rightarrow He + N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + e$	$7,23 \times 10^{-10}$
6	$N_2 + He(2^1S) \rightarrow He + N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + e$	$8,50 \times 10^{-11}$
7	$N_2 + He(2^1P) \rightarrow He + N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + e$	$5,95 \times 10^{-10}$
8	$He_2^+ + N_2 + He \rightarrow N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + He + He + He$	$9,70 \times 10^{-30}$
9	$N_2^+(B^2\Sigma_u^+) \rightarrow N_2^+(X^2\Sigma_g^+(v=1)) + hv_{428}$	$1,60 \times 10^7$
10	$N_2^+(B^2\Sigma_u^+) \rightarrow N_2^+(X^2\Sigma_g^+(v=2)) + hv_{470}$	$8,00 \times 10^5$
11	$N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + He \rightarrow N_2^+(X^2\Sigma_g^+) + He$	$8,00 \times 10^{-13}$
12	$N_2 + He(2^3P) \rightarrow He + N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + e$	$5,95 \times 10^{-10}$
13	$N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + N \rightarrow N^+ + N_2$	$5,00 \times 10^{-12}$
14*	$N_2 + FF \rightarrow N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + e + FF^{**}$	$4,62 \times 10^{-15***}$
15	$N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + N_2 \rightarrow N_2^+(X^2\Sigma_g^+) + N_2$	$4,53 \times 10^{-10***}$
16	$N_2 + e \rightarrow N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + e + e$	—***
17	$He_2(a^3\Sigma_u^+) + N_2 \rightarrow He + N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + e$	$8,50 \times 10^{-11}$
18	$N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + H_2 \rightarrow N_2 + H_2^+$	$1,13 \times 10^{-16}$

Примечание: \*n – число компонент участвующих в прямой реакции; \*\* FF – осколок деления (fission fragment); \*\*\* – константы скорости рассчитываются согласно сечениям

Notes: \* n –; \*\*FF is the fission fragment; \*\*\* rate constants are calculated according to sections

рех нижних возбужденных состояниях суммарно составляет 24–30 % при P=0,5–9,0 атм. Причем вклад в скорость заселения этих четырех процессов существенно перераспределяется в зависимости от состава среды.

Следует отметить, что расселение N<sub>2</sub><sup>+</sup>(B<sup>2</sup>Σ<sub>u</sub><sup>+</sup>)-состояния происходит в основном путем излучения квантов с длиной волны 391,4 нм.

#### Моделирование генерационных характеристик гелий-азот-водородной активной среды

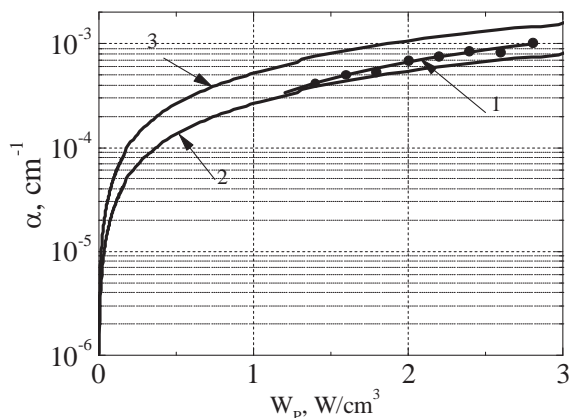
Верификация разработанной многокомпонентной кинетической модели проводилась путем сравнения экспериментальных данных с рассчитанными значениями линейных коэффициентов усиления слабого сигнала, зависимости мощности генерируемого лазерного излучения от времени, а также энергии лазерного излучения в импульсе. Ввиду скудости данных экспериментов по ядерной накачке сравнение было также проведено с данными по накачке электронным пучком, как наиболее близкой по основным процессам к ядерной накачке. При расчетах использовались два различных

варианта данных о сечении вынужденного перехода, определенные в работах [4, 12].

Экспериментальные и расчетные данные о линейных коэффициентах усиления слабого сигнала представлены на рис. 2 (ядерная накачка [7]) и в табл. 2 (накачка электронным пучком [12, 13]).

Экспериментальные данные получены путем обработки генерационных экспериментов [9] для следующих условий: начальное давление смеси 5 атм, состав смеси He/N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>=3786/7/7. В пределах погрешностей экспериментальных данных согласие можно признать удовлетворительным. При моделировании условий ядерной накачки расхождение теоретических и экспериментальных данных меньше при использовании данных о сечении вынужденного излучения [4]. В случае электронно-пучковой накачки (табл. 2), наоборот, расхождение меньше при использовании данных о сечении вынужденного излучения [12].

Расчетные и экспериментальные данные о зависимости мощности генерируемого в гелий-азот-водородной активной среде лазерного излучения от времени, а также энергии лазерного излучения в импульсе представлены на рис. 3.



**Рис. 2.** Зависимость коэффициента усиления слабого сигнала от максимальной удельной мощности энергоклада (длина импульса  $\tau=300$  мкс; коэффициент нерезонансных потерь  $2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ ): 1 – экспериментальные данные работы [7], результаты математического моделирования с сечениями вынужденного перехода, взятыми из работ: 2 – [12]; 3 – [4]

**Fig. 2.** Dependence of low signal gain coefficient on the maximum specific capacity of energy deposition (pulse length is  $\tau=300$  mks; nonresonant loss ratio is  $2 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ ): 1 – experimental data of the paper [7], results of mathematical modeling with induced transition sections taken in papers: 2 – [12]; 3 – [4]

**Таблица 2.** Сравнение значений коэффициентов усиления слабого сигнала и достигнутой эффективности генерации с экспериментальными данными для  $\lambda=427,8$  нм

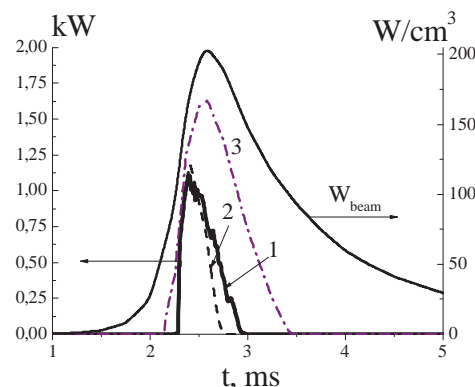
**Table 2.** Comparison of low signal gain coefficient values and generation efficiency obtained with the experimental data for  $\lambda=427,8$  nm

Давление, атм Pressure, atm	Состав He/N <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> среды Composition of He/N <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> medium	$\alpha, 10^{-3}, \text{ см}^{-1}$				$\eta, \%$				
		Эксперимент Experiment [12]		Расчет с сечением Calculation with section		Эксперимент Experiment [12]		Расчет с сечением Calculation with section		
			[12]	[4]		[12]	[4]		[12]	[4]
4	4атм/4тор/3тор	2,8±0,3	2,5	1,3	1,7	2,1	1,8			
6	6атм/4тор/3тор	3,1±0,3	3,3	1,7	2,0	2,6	2,2			

На рис. 3 представлены расчетные и экспериментальные данные о зависимости мощности генерируемого в гелий-азот-водородной активной среде лазерного излучения от времени, а также энергии лазерного излучения в импульсе.

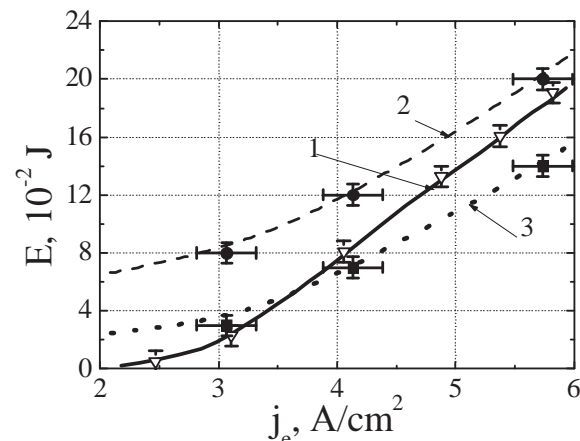
На рис. 3 приведены данные по ядерной накачке, соответствующие условиям эксперимента [8]. Длина лазерно-активного элемента составляла 2,5 м; его внутренний диаметр 4,8 см, толщина слоя уранового покрытия составляла 5 мкм; коэффициент пропускания зеркал резонатора  $R_1=0,7 \%$ ,  $R_2=0,7 \%$ ; длительность импульса накачки ~6 мс; максимальная удельная мощность энергоклада  $200 \text{ Вт/см}^3$ , состав гелий-азот-водородной активной среды: He/N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>=1000/1,22/1,88, начальное давление  $P=1,6$  атм. Согласно экспериментальным данным [8] линейный коэффициент нерезонансных по-

терь  $\beta=10^{-5} \text{ см}^{-1}$ . Расчеты зависимости мощности генерации от времени, выполненные с учетом такого значения  $\beta$ , вполне удовлетворительно согласуются с данными эксперимента (рис. 3).



**Рис. 3.** Зависимость мощности лазерной генерации P и удельной мощности энергоклада W от времени для условий работы [8] (He/N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>=1000/1,22/1,88, начальное давление 1,6 атм): 1 – экспериментальные данные работы [8], результаты математического моделирования с сечениями вынужденного перехода, взятыми из работ: 2 – [12]; 3 – [4]

**Fig. 3.** Dependence of laser generation P power and specific capacity of energy deposition W on time for operation conditions [8] (He/N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>=1000/1,22/1,88, initial pressure 1,6 atm): 1 – experimental data of the paper [8], results of mathematical modeling with induced transition sections taken in papers: 2 – [12]; 3 – [4]



**Рис. 4.** Энергетические характеристики гелий-азот-водородной активной среды: 1 – зависимость энергии импульса E генерируемого лазерного излучения от плотности тока электронного пучка  $j_e$ ; 2 – расчет с сечением [4]; 3 – с сечением [12]

**Fig. 4.** Output performance of helium-nitrogen-hydrogen active medium: 1 is the dependence of energy of E pulse, generated laser radiation on density of  $j_e$  electron beam current: 2 – calculation with section [4]; 3 – with section [12]

В типичных условиях ядерной накачки возбуждаемая осколками деления гелий-азот-водородной активной среда является сильно неоднородной (например, [14]). Согласие экспериментальных данных с результатами расчетов, выполненных в пренебрежении неоднородностью гелий-азот-водородной ак-

тивной среды, на наш взгляд, объясняется следующим. Как показали выполненные по методике [14, 15] расчетные исследования в условиях эксперимента [8] коэффициент усиления мощности пучка лазерного излучения за один проход не сильно отличается как при учете неоднородного распределения энерговклада в активную среду, так и при замене его однородным при совпадении мгновенного общего энерговклада в среду. Эти отличия приближенно можно учесть, введя эффективный линейный коэффициент потерь  $\beta$ . Подробному обоснованию этого положения будет посвящена отдельная работа.

Отметим, что широко используемое при математическом моделировании кинетических процессов в лазерах с ядерной накачкой «нульмерное» приближение, как правило, удовлетворительно согласуется с результатами экспериментов [13], несмотря на сильную неоднородность активной среды.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Газовый лазер высокого давления в фиолетовой области спектра на ионах молекулярного азота / Н.Г. Басов, Л.А. Васильев, В.А. Данилычев и др. // Квантовая электроника. – 1975. – Т. 2. – № 7. – С. 1591–1593.
- Эффективный квазипрерывный лазер высокого давления на первой отрицательной системе азота / Н.Г. Басов, А.Ю. Александров, В.А. Данилычев и др. // Письма в ЖЭТФ. – 1985. – Т. 42. – № 1. – С. 39–42.
- Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. Импульсные лазеры в плазме, создаваемой электронными пучками и разрядами // Квантовая электроника. – 2003. – Т. 33. – № 2. – С. 117–128.
- Collins C.B. The nitrogen ion laser pumped by charge transfer // Journal of Quantum Electronics. – 1984. – V. QE-20. – № 1. – P. 47–62.
- Хасенов М.У. Излучение смесей He-Ne-H<sub>2</sub> (Ar, Kr) при слабой накачке жестким ионизатором // Известия ТПУ. – 2010. – Т. 316. – № 4. – С. 119–122.
- Скорость образования молекулярных ионов гелия в плазме высокого давления, возбуждаемой осколками деления / Н.М. Барышева, А.В. Бочков, Н.В. Бочкова и др. // Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой: Труды конф. – Арзамас-16, 1995. – Т. 1. – С. 114–120.
- Параметры усиления лазера на 1-ой отрицательной полосе азота / А.В. Бочков, А.В. Зигидулин, Э.П. Магда и др. // Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы: Сб. докл. IV Междунар. конф. (ЛЯН-ИР-2007). – Обнинск, 18–21 сентября 2007. – С. 156–159.
- Дюжов Ю.А. Полетаев Е.Д., Смольский В.Н. Исследование генерации на переходах 1-й отрицательной системы азота ( $\lambda=391,4, 428,1$  нм) в He-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> смесях при накачке осколками деления от импульсного реактора БАРС-6 // Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы: Сб. докл. IV Междунар. конф. (ЛЯН-ИР-2007). – Обнинск, 18–21 сентября 2007. – С. 151–155.
- Будник А.П., Кузнецова Е.Э. Модель физико-химической кинетики гелий-азот-водородной ядерно-возбуждаемой плазмы // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2010. – Т. 9. URL: <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-010.pdf> (дата обращения: 20.12.2013).
- Будник А.П., Кузнецова Е.Э. Тестирование математической модели кинетических процессов в газовой гелий-азот-водородной плазме // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2011. – Т. 11. URL: <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2011-02-01-005.pdf> (дата обращения: 20.12.2013).
- Дятко Н.А., Кочетов И.В., Напартович А.П. Функция распределения электронов по энергии в распадающейся плазме азота // Физика плазмы. – 1992. – Т. 18. – Вып. 7. – С. 888–900.
- Эффективные столкновительные лазеры в видимой и УФ-областях спектра / А.Ю. Александров, В.А. Долгих, О.М. Керимов и др. // Известия АН СССР. Серия физическая. – 1989. – Т. 53. – № 8. – С. 1474–1482.
- Басов Н.Г., Данилычев В.А. Лазеры на конденсированных и сжатых газах // УФН. – 1986. – Т. 148. – Вып. 1. – С. 55–99.
- Алексеева И.В., Будник А.П., Сипачев А.В. Неравновесная радиационная плазмодинамика в газовых активных средах оптических квантовых усилителей с ядерной накачкой // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2010. – Т. 9. URL: <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-009.pdf> (дата обращения: 20.12.2013).
- Карелин А.В. Физические основы реактора-лазера. – М.: ВНИЭМ, 2007. – 259 с.

Поступила 26.12.2013 г.



UDC 539.9...15

## MATHEMATICAL MODELING OF LASER RADIATION GENERATION IN He-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> PLASMA EXCITED BY URANIUM FISSION FRAGMENTS

Aleksandr P. Budnik,

Cand. Sc., State Scientific Center of the Russian Federation  
«Physics and Power Engineering», 1, Bondarenko Sq., Obninsk, 249033, Russia.  
E-mail: budnik@ippe.ru

Elena E. Kuznetsova,

State Scientific Center of the Russian Federation «Physics and Power  
Engineering», 1, Bondarenko Sq., Obninsk, 249033, Russia.  
E-mail: Kuznetsova.Elena\_IPPEmail.ru

Development of high-energy nuclear-pumped lasers is still a challenging and actual, but not yet implemented task of the joint application of two high technologies: nuclear and laser. Experimental studies are extremely cost-based and unsafe. It balks greatly the progress in this research area. The detailed kinetic models of nuclear-excited plasma can significantly accelerate the development of high-energy nuclear-pumped lasers. The authors developed a unique multi-component kinetic model of helium-nitrogen-hydrogen active medium excited by uranium fission fragments, which takes into account all the major processes of selective check-working laser levels. It was ascertained by the methods of mathematical modeling that the upper laser level population is defined almost equally both by the charge exchange processes of atomic and molecular helium ions in collisions with nitrogen molecules and by the Penning processes at molecular nitrogen collision with the excited helium atoms. Considering the fact that in typical conditions of nuclear pumping the helium-nitrogen-hydrogen active laser medium excited by fission fragments is strongly inhomogeneous, the mathematical modeling data were analyzed. Under real nuclear pumping medium experiment the power gain coefficient of laser beam per a pass does not differ greatly both when taking into account the inhomogeneous energy input distribution to the active medium, and when replacing it by the uniform one. At this time the instant total energy input into the active medium must be the same. These differences can be approximately taken into account by introducing an effective linear loss factor  $b$ , which is  $10^{-5} \text{ cm}^{-1}$  according to the calculations of the research.

### Key words:

Kinetic model, small signal laser gain, kinetic processes, generation characteristics, laser radiation.

The research is financially supported by RFBR grant № 12-08-31319.

### REFERENCES

- Basov N.G., Vasiliev L.A., Danilychev V.A. High-Pressure Gas Laser Emitting in the Ultraviolet Spectral Region from Molecular Ions of Nitrogen. *Journal of Quantum Electronics*, 1975, vol. 2, no. 7, pp. 1591–1593.
- Basov N.G., Alexandrov A.Yu., Danilychev V.A. Efficient high-pressure quasi-cw laser using the first negative system of nitrogen. *Letters in JETPHYS*, 1985, vol. 42, no. 1, pp. 47–50.
- Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I. Pulsed lasers on plasmas produced by electron beams and discharges. *Journal of Quantum Electronics*, 2003, vol. 33, no. 2, pp. 117–128.
- Collins C.B. The nitrogen ion laser pumped by charge transfer. *Journal of Quantum Electronics*, 1984, vol. QE-20, no. 1, pp. 47–62.
- Khasenov M. U. Radiation mixtures He-Ne-H<sub>2</sub> (Ar, Kr) with weak pumping hard ionizer. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, Iss. 4, pp. 12–17.
- Barysheva N.M., Bochkov A.V., Bochkova N.V. Skorost obrazovaniya molekulyarnykh ionov geliya v plazme vysokogo davleniya, vzbuzhdaemoy oskolkami deleniya [The rate of helium molecular ions formation in high-pressure plasma excited by fission fragments]. *Fizika yadernykh vzbuzhdaemoy plazmy i problem lazerev s yadernoy nakachkoy. Trudy konferentsii* [Proc. of the conference Physics of nuclear-induced plasma, and the problem of nuclear-pumped lasers. Arzamas-16, 1995. – Vol. 1, pp. 114–120.
- Bochkov A.V., Zigidulin A.V., Magda E.P. Parametry usileniya lazera na pervoy otritsatelnoy polose azota [Parameters of laser gain on the first negative band of nitrogen]. *Fizika lazerev s yadernoy nakachkoy i impulsnye reaktory. Sbornik dokladov IV Mezhdunarodnoy konferentsii* [Proc. of IV International Conference Physics of nuclear-pumped lasers and pulsed reactors (NPL-2007-IR)]. Obninsk, 18–21 September 2007. pp. 156–159.
- Dyuzhov Yu.A., Poletaev E.D., Smolskiy V.N. Issledovanie generatsii na perekhodakh pervoy otritsatelnoy sistemy azota ( $\lambda=391,4, 428,1 \text{ nm}$ ) v He-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> smesyakh pri nakachke oskolkami deleniya ot impulsnogo reaktora BARS-6 [Investigation of generation at crossings 1<sup>st</sup> negative system of nitrogen ( $\lambda=391,4, 428,1 \text{ nm}$ ) in He-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> mixtures pumped by fission fragments from a pulsed reactor BARS-6]. *Fizika lazerev s yadernoy nakachkoy i impulsnye reaktory. Sbornik dokladov IV Mezhdunarodnoy konferentsii* [Proc. of IV Intern. Conf. Physics of nuclear-pumped lasers and pulsed reactors (NPL-2007-IR)]. Obninsk, 18–21 September 2007. pp. 151–155.
- Budnik A.P., Kuznetsova E.E. Model fiziko-khimicheskoy kinetiki geliya-azot-vodorodnoy yadernykh vzbuzhdaemoy plazmy [Model of physical and chemical kinetics of helium-nitrogen-hydrogen nuclear-induced plasma]. *Physical and chemical kinetics in gas dynamics*, 2010, vol. 9. Available at: <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-010.pdf> (accessed 20 December 2013).
- Budnik A.P., Kuznetsova E.E. Testirovanie matematicheskoy modeli kineticheskikh protsessov v geliya-azot-vodorodnoy plazme [Testing a mathematical model of kinetic processes in gas helium-nitrogen-hydrogen plasma]. *Physical and chemical kinetics in gas dynamics*, 2011, vol. 11. Available at: <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2011-02-01-005.pdf> (accessed 20 December 2013).
- Dyatko N.A., Kochetov I.V., Napartovich A.P. Electron energy distribution function in a decaying nitrogen plasma. *Journal of Plasma Physics*, 1992, vol. 18, Iss. 7, pp. 888–900.

12. Alexandrov A.Yu, Dolgikh V.A., Kerimov O.M. et al. Efficient collisional lasers in the visible and ultraviolet spectral regions. *Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Physics Series*, 1989, vol. 53, no. 8, pp. 1474–1482.
13. Basov N.G., Danilychev V.A. Condensed and compressed gas lasers. *Sov. Phys. Usp.*, 1986, vol. 29, pp. 31–56.
14. Alekseeva I.V., Budnik A.P., Sipachev A.V. Neravnovesnaya radiatsionnaya plazmodinamika v gazovykh aktivnykh sredakh opticheskikh kvantovykh usiliteley s yadernoy nakachkoy [Nonthermal radiation plasmadynamics in gas active media of lasers nuclear-pumped amplifiers]. *Physical and chemical kinetics in gas dynamics*, 2010, vol. 9. Available at: <http://www/chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-009.pdf> (accessed 20 December 2013).
15. Karelin A.V. *Fizicheskie osnovy reaktora-lazera* [Physical bases of the reactor-laser]. Moscow, VNIEM publ., 2007. 259 p.

*Received: 26 December 2013.*

## К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Принимаются статьи, подготовленные в MS Word-2003 (файл и распечатка). Статья должна быть подписана авторами и иметь сопроводительное письмо на бланке организации.

Объем статьи не менее 8 стр., но не более 20 стр., включая рисунки и таблицы, размещенные в тексте по упоминанию. Размер бумаги А4, поля по 25 мм. Текст в 1 интервал **без переносов, лишних пробелов и абзацных интервалов**, шрифт Times New Roman, 12 пунктов. Файлы рисунков (в градациях серого) в jpg, tif, cdr или иных форматах редакторов Photoshop, Corel Draw с разрешением 300 dpi прилагаются к статье. Рисунки и таблицы: **Рис. 1. Название; Таблица. Название.** Кавычки вида «...». Интервалы – 1,2...1,8 мм или 5–7 шт. Формулы – в MathType, настройка по умолчанию. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылка в тексте.

Курсивом – буквы латинского и греческого алфавита, кроме входящих в имена собственные, обозначения стандартных математических функций и химических элементов ( $U_{пр.}$ ,  $\Phi_i$ , но  $Al_2O_3$ ,  $\cos\alpha_i$ , max, lg, «BASF»). Векторы – полужирным курсивом. Список литературы – по ГОСТ Р 7.0.5–2008 (см. пример). Литература – по упоминанию: [1, 2], [2. С. 245], [3–7]. Список литературы должен включать не менее 20 источников.

УДК 621.37 (Пример оформления статьи)

### АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ (название на английском языке)

**Петров Иван Иванович**, канд. техн. наук, доцент каф. обработки металлов давлением факультета стандартизации, химии и биотехнологии ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38. E-mail: vip111@yandex.ru

**Иванов Андрей Андреевич**, д-р хим. наук, профессор каф. химической технологии топлива и химической кибернетики Института природных ресурсов ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: iip@tpu.ru

Показана возможность расчета ... Установлено, что ... Сделан вывод о том, что ... (Аннотация, 10 кегль, не менее 150 слов).

**Ключевые слова:** (ниже ключевые слова на английском языке)

Усилительный каскад, регулировка тока

В [1, 2] показано, что усилительный каскад с автоматической регулировкой потребляемого тока (АРПТ) позволяет получить ...

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фамилия И.О. Название книги. – М.: Издательство, 2014. – 123 с.
2. Название книги / под ред. И.О. Фамилия. – М.: Издательство, 2014. – 123 с.
3. Фамилия И.О. Название статьи // Журнал. – 2014. – Т. 316. – № 1. – С. 71–77.
4. Фамилия И.О. Название диссертации: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2008. – 19 с.
5. Название изобретения: пат. 2000000 Рос. Федерация. № 2009129009/10; заявл. 27.07.13; опубл. 10.10.14, Бюл. № 4. – 3 с.
6. Фамилия И.О. Название статьи // Наименование конференции: Труды VII Междунар. научно-практ. конф. молодых ученых. – Томск, 2014. – Т. 1. – С. 226–228.
7. Фамилия И.О. Название статьи // Наименование ресурса. 2013. URL: <http://www.tpu.ru/html/izvestia.htm> (дата обращения: 25.09.2014).

### REFERENCES

Поступила 25.01.2013 г.

Руководство для авторов и образец оформления статьи: [izvestiya.tpu.ru](http://izvestiya.tpu.ru)


**Редактирование** *А.С. Глазырин*  
**Компьютерная верстка** *О.Ю. Аршинова*  
**Перевод на англ. язык и корректура** *С.В. Жаркова*

Подписано к печати *xx.xx.2014*. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 18,38. Уч.-изд. л. 16,62.  
Заказ *xxx-14*. Тираж 500 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Издательства Томского политехнического университета  
сертифицирована в соответствии с требованиями ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.  
Тел./факс: 8(3822) 563-291, [www.tpu.ru](http://www.tpu.ru), [izv@tpu.ru](mailto:izv@tpu.ru)