



РОССИЙСКИЙ
ФОНД
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

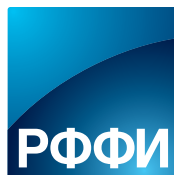
ISSN 1605-8070
eISSN 2410-4639

ВЕСТНИК РФФИ

№3 (87) июль–сентябрь 2015 г.

**ТЕМАТИЧЕСКИЙ БЛОК:
ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
ИНЖЕНЕРИЯ**

**стр.
15**



Вестник Российского фонда фундаментальных исследований

№ 3 (87) июль–сентябрь 2015 года

Основан в 1994 году

Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, рег. № 012620 от 03.06.1994

Сетевая версия зарегистрирована Роскомнадзором, рег. № ФС77-61404 от 10.04.2015

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Российский фонд фундаментальных исследований»

Главный редактор В.Я. Панченко,
заместитель главного редактора В.В. Квардаков.

Редакционная коллегия:

В.А. Геловани, Ю.Н. Кульчин, В.П. Матвеев, Е.И. Моисеев,
А.С. Сигов, Р.В. Петров, И.Б. Федоров, В.В. Ярмолюк,
П.П. Пашинин, В.П. Кандидов, В.А. Шахнов

Редакция:

А.П. Симакова, Н.В. Круковская

Адрес редакции:

119991, г. Москва, Ленинский проспект, 32а

Тел.: (499) 995-16-05

e-mail: pressa@rfbr.ru



Russian Foundation for Basic Research Journal

N 3 (87) July–September 2015

Founded in 1994

Registered by the Committee of the Russian Federation for Printed Media, 012620 of 03.06.1994 (print)

Registered by the Roskomnadzor FS77-61404 of 10.04.2015 (online)

The Founder

Federal State Institution

“Russian Foundation for Basic Research”

Editor-in-Chief V. Panchenko,

Deputy Chief Editor V. Kvardakov.

Editorial Board:

V. Gelovani, J. Kulchin, V. Matveenko, E. Moiseev,

A. Sigov, R. Petrov, I. Fedorov, V. Yarmolyuk,

P. Pashinin, V. Kandidov, V. Shakhnov

Editorial staff:

A. Simakova, N. Krukovskaya

Editorial address:

32a, Leninsky Prospect, Moscow, 119991, Russia

Tel.: (499) 995-16-05

e-mail: pressa@rfbr.ru

КОЛОНКА ТЕМАТИЧЕСКОГО РЕДАКТОРА

О редакторе тематического блока академике И.Б. Федорове	6
<i>И.Б. Федоров</i>	
Аннотация к тематическому блоку	9

ТЕМАТИЧЕСКИЙ БЛОК: ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

<i>А.Л. Свистков, В.Н. Солодько, С.Е. Евлампиева, Н.И. Ужегова, К.А. Мохирева</i> Разработка методов компьютерного моделирования механического поведения эластомерного нанокompозита на основе знаний о структуре материала и активности наполнителя.....	15
<i>А.И. Простомолотов, Н.А. Верезуб, В.С. Бердников</i> Явление образования «холодных термик» при выращивании кристаллов методом Чохральского	23
<i>А.М. Ефремов, А.А. Жерлицын, Б.М. Ковальчук, Н.Н. Педин, А.В. Харлов</i> Источник сильноточного релятивистского сфокусированного электронного пучка на основе плазмонаполненного диода.....	32
<i>Г.Ю. Гончарова, И.Г. Никифорова, Т.Г. Устюгова, Н.Д. Разомасов</i> Исследование возможностей снижения фрикционного взаимодействия в паре «конек-лед» путем модификации структуры обеих контактирующих поверхностей	45
<i>Г.А. Филиппов, А.Р. Аветисян</i> Эйлеровые методы моделирования полидисперсных турбулентных течений влажного пара в турбинных решетках и соплах Лавалья с учетом нестационарных фазовых переходов	54
<i>В.Г. Гришина, Е.П. Дербак ова, О.И. Додулад, Ю.Ю. Клосс, П.В. Шувалов, А.В. Морозов, Ф.Г. Черемисин</i> Моделирование и анализ газокинетических процессов на основе кинетического уравнения Больцмана для решения проблем ядерных технологий.....	62
<i>В.Н. Евдокименков, М.Н. Красильщиков</i> Управление смешанными группами пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов в условиях единого информационно-управляющего поля	74
<i>В.А. Матвеев, М.А. Басараб, Б.С. Лунин, Е.А. Чуманкин, А.В. Юрин</i> Развитие теории создания волновых твердотельных гироскопов с металлическим резонатором.....	84
<i>Л.А. Зинченко, А.И. Власов, Е.В. Резчикова, В.А. Шахнов</i> Нанотехнологии и инфокоммуникационные технологии	97

"RFBR Journal"**N 3 (87) July–September 2015** (Supplement to "Information Bulletin" of RFBR N 23)**THEMED ISSUE EDITOR'S COLUMN**

About the Editor of the Themed Section Academician I. Fedorov	6
<i>I.B. Fedorov</i>	
Abstract of the Themed Section	9

THEMED SECTION: FUNDAMENTAL ENGINEERING

<i>A.L. Svistkov, V.N. Solodko, S.E. Evlampieva, N.I. Uzhegova, K.A. Mokhireva</i> Development of Methods for Computer Modeling for the Mechanical Behavior of an Elastomeric Nanocomposite Based on Knowledge of the Material Structure and Activity of the Filler.....	15
<i>A.I. Prostomolotov, N.A. Verezub, V.S. Berdnikov</i> The Phenomenon of «Cold Plume» Formation in Czochralski Crystal Growing.....	23
<i>A.M. Efremov, A.A. Zherlitsyn, B.M. Kovalchuk, N.N. Pedin, A.V. Kharlov</i> Source of the Focused High-Current Relativistic E-Beam based on a Plasma-Filled Diode	32
<i>G.Yu. Goncharova, I.G. Nikiforova, T.G. Ustyugova, N.D. Razomasov</i> Investigation of Possibilities for Reduction of Frictional Engagement in the «Skate-Ice» Pair Via Modification of the Structure of Both Contacting Surfaces.....	45
<i>G.A. Filippov, A.R. Avetisyan</i> Eulerian Methods for Modelling of Polydispersed Turbulent Wet Steam Flows in Turbine Blade Cascades and Laval Nozzles with Unsteady Phase Transitions	54
<i>V.G. Grishina, E.P. Derbakova, O.I. Dodulad, Yu.Yu. Kloss, D.V. Martynov, A.V. Morozov, F.G. Tcheremissine</i> Modeling and Analysis of Gas-Kinetic Flow Processes on the Base of Boltzmann Kinetic Equation for the Solution of Nuclear Technology Problems.....	62
<i>V.N. Evdokimov, M.N. Krasilschikov</i> Smart Control of Mixed Groups of Manned and Unmanned Aircraft within a United Information and Control Field	74
<i>V.A. Matveev, M.A. Basarab, B.S. Lunin, E.A. Chumankin, A.V. Yurin</i> Development of The Theory of Cylindrical Vibratory Gyroscopes with Metallic Resonators.....	84
<i>L.A. Zinchenko, A.I. Vlasov, E.V. Rezchikova, V.A. Shakhnov</i> Nanoengineering and Infocommunication Technology	97

Игорь Борисович Федоров родился 15 апреля 1940 г. в Москве. В 1957 г. он с золотой медалью окончил среднюю школу и поступил в Московское высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана, которое окончил в 1963 г. по специальности «Радиоэлектронные системы», и был распределен на работу инженером профилирующей кафедры «Радиоэлектронные устройства». Он прошел все этапы вузовского творческого пути от инженера и ассистента кафедры до ректора и президента МГТУ им. Н.Э. Баумана. Пост ректора МГТУ И.Б. Федоров принял в 1991 г., став первым с 20-х гг. выборным ректором старейшего технического вуза России.

И.Б. Федоров – известный ученый в области теории загоризонтной радиолокации и проектирования комплексов многопозиционных локационных станций. Им создана научная школа в области радиолокационных систем повышенной помехозащищенности и информативности, работающих в условиях воздействия интенсивных помех и сложной геофизической обстановки на трассе распространения сигнала. Результаты работ И.Б. Федорова внедрены в серийные и уникальные изделия промышленности. Признанием научных достижений радиотехнической школы МГТУ им. Н.Э. Баумана в области развития современных информационных технологий является создание в 1998 г. в МГТУ под председательством И.Б. Федорова секции «Информационные технологии в радиолокации» Научного совета

Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук.

И.Б. Федоров – автор более 230 научных работ, в числе которых 15 монографий и 16 авторских свидетельств. Он ведет активную плодотворную работу по подготовке кадров высшей квалификации (докторов и кандидатов наук); при его непосредственном участии подготовлено более 2000 радиоинженеров.

В 1992 г. по инициативе И.Б. Федорова в МГТУ им. Н.Э. Баумана была создана научно-социальная программа для молодежи и школьников «Шаг в будущее», ныне охватывающая сотни тысяч юных исследователей почти всех регионов России. Примеру МГТУ последовали десятки вузов страны, создав аналогичные программы поиска одаренных молодых людей.

В том же 1992 г. И.Б. Федорова избрали председателем Совета ректоров высших учебных заведений Москвы и Московской области, которым он руководил в течение двадцати лет. За годы работы Совет при поддержке Правительства Москвы смог сделать многое для развития высшего образования столицы. В 2001 г. был создан Совет ректоров высших учебных заведений Центрального федерального округа в составе 17 регионов России; на их территории функционирует свыше 300 вузов. Тогда же Совет возглавил И.Б. Федоров, став его первым председателем. На протяжении многих лет он также является вице-президентом Российского Союза ректоров.

В 2008 г. И.Б. Федорова избрали действительным членом (академиком) Российской академии наук. И.Б. Федоров – вице-президент Международной академии наук высшей школы, действительный член ряда российских и зарубежных академий.

В 1994 г. была создана Ассоциация технических университетов, ныне объединяющая 145 технических вузов России и ближнего зарубежья. И.Б. Федоров тогда же стал ее первым президентом, а с 2012 г. он является вице-президентом Ассоциации.

25 марта 2010 г. Игорь Борисович Федоров был избран президентом МГТУ им. Н.Э. Баумана, эта должность введена в МГТУ впервые.

About Editor of the Themed Section Academician of RAS, Doctor of Technical Science, Professor I. Fedorov

Igor Borisovich Fedorov was born on April 15, 1940 in Moscow. In 1957, he graduated the secondary school with a gold medal and applied to the Bauman Moscow State Technical University, and graduated it in 1963 with a specialty "Radio-electronic systems". Then he was appointed to the engineer position in the "Radio-electronic systems" profile department. He has passed all stages of the university creative development from engineer and assistant professor to rector and president of BMSTU. He got the BMSTU rector position in 1991, thus becoming the first elective rector of the oldest technical university of Russia since the 1920s.

I.B. Fedorov is well-known scientist in the theory of the over-the-horizon radar and the design of multiple-position radar stations. He founded the scientific school in the area of radar systems with an advanced noise-immunity and information capability, which operate under conditions of high-intensity noise effect and in harsh geophysical environments along the signal propagation line. The results of I.B. Fedorov studies have been implemented in serial production and unique engineering goods. As recognition of scientific achievements of the BMSTU radio-engineering school in the modern information technologies development, was creation of the section of "Information technologies in radiolocation" of the Scientific council of nanotechnology and information technology department of the Russian Academy of Sciences in the BMSTU under the chairmanship of I.B. Fedorov in 1998.

I.B. Fedorov is author of more than 230 scientific publications, which include 15 monographies and 16 inventor's certificates. He carries out active fruitful activities of personnel training with highest professional skills (doctors and candidates of science). More than 2 000 radio-engineers have been trained under his direct participation.

In 1992, upon I.B. Fedorov's initiative the scientific-social program for young people and schoolchildren "Step into the Future" was founded. Now it involves hundreds of thousands of young researchers from almost all re-

gions of Russia. The BMSTU example was followed by tens of universities. Similar programs for the search for the gifted young have been created.

In the same 1992, I.B. Fedorov was elected the chairman of the Rector Commission of Universities of Moscow and the Moscow region. He was the head of it for more than 20 years. During these years, the Commission managed to accomplish a lot for the higher education of Moscow under the assistance of the Government of Moscow. In 2001, the Rector Commission of Universities of Central Federal District was founded including 17 regions of Russia. 300 universities are functioning within its territory. At the same time, I.B. Fedorov took charge of the Commission and became its first chairman. For many years, he is the Vice-president of the Council of Rectors of Russia as well.

In 2008, I.B. Fedorov was elected full member (academician) of the Russian Academy of Sciences. I.B. Fedorov is the Vice-president of the International Academy of Sciences of High School, full member of several Russian and foreign academies.

In 1994, the Association of technical Universities was organized. Now it unites 145 technical universities of Russia and countries of the near abroad. I.B. Fedorov at the same time became its first President, and since 2012 he serves is the vice-president of the Association.

On March 25, 2010, Igor Borisovich Fedorov was elected the president of the BMSTU. This position was introduced at the BMSTU for the first time.

Аннотация к тематическому блоку

И.Б. Федоров

Настоящий выпуск журнала «Вестник РФФИ» посвящен работам, выполненным в рамках научного направления «Фундаментальные основы инженерных наук». Данное направление сравнительно новое в структуре РФФИ; его появление неслучайно и отражает современные тенденции в развитии инженерных наук.

Прежде в инженерном творчестве существовало четкое разделение по времени разных этапов исследований: 1) фундаментальный (поисковые исследования); 2) прикладной. Затем на основе результатов исследований второго этапа проводили конкретные инженерные разработки.

В настоящее время в результате расширения спектра инженерной деятельности эти этапы все больше и больше сливаются. Например, в высокотехнологичных областях поисковые исследования нередко переходят сразу в конкретные инженерные разработки, которые проводит тот же коллектив.

Все это существенно меняет характер деятельности инженера, вносит новые требования к его университетской подготовке, где все большее значение приобретают фундаментальные знания. Существовавшее прежде жесткое разделение теоретических, поисковых работ и их практической реализации в современных технологиях не всегда приводит к высоким результатам и порой непродуктивно.

Этот тезис хорошо иллюстрируется публикациями в данном тематическом блоке статей, где авторами являются доктора и кандидаты наук, имеющие инженерное образование, а также молодые инженеры, получившие современную инженерную университетскую подготовку.

В тематическом блоке настоящего выпуска отражены результаты фундаментальных исследований во всех научных направлениях классификатора РФФИ в области инженерных наук.

В статье А.Л. Свисткова, В.Н. Солодько, С.Е. Евлампиевой, Н.И. Ужеговой, К.А. Мохиревой «Разработка методов компьютерного моделирования механического поведения эластомерного нанокompозита на основе знаний о структуре материала и активности наполнителя» предложена новая модель поведения эластомерной сетки, учитывающая длины полимерных цепей, их гибкость, функциональность химических сшивок, ориентационные эффекты, разработан метод многоуровневого анализа экспериментальных данных рельефа поверхности, получаемого с помощью атомно-силового микроскопа. Проведены экспериментальные исследования особенностей вязкоупругого поведения нанокompозитов. На основании результатов численных экспериментов и экспериментальной проверки предложена новая веерообразная форма образцов для исследования механических свойств в условиях двухосного деформирования.

В работе А.И. Простомолотова, Н.А. Вerezуб, В.С. Бердникова «Явление образования «холодных термиков» при выращивании кристаллов методом Чохральского» исследовано образование полосчатых микродефектов в кристаллах, выращиваемых методом Чохральского, связанное с неустойчивостью течения расплава, вызванное нестабильностью во времени фронта кристаллизации и пульсирующего потока легирующей примеси из расплава в кристалл. Исследование проведено с использованием некристаллизующейся модельной жидкости – этилового спирта, и расплава гептадекана, имеющего комнатную температуру плавления. Прозрачность расплава гептадекана позволила визуализировать как структуру течения расплава, так и форму его закристаллизовавшейся части в лабораторном эксперименте.

Статья А.М. Ефремова, А.А. Жерлицына, Б.М. Ковальчука, Н.Н. Педина, А.В. Харлова «Источник сильноточного релятивистского сфокусированного электронного пучка на основе плазмонаполненного диода» посвящена проблеме увеличения мощности электронного источника на основе плазмонаполненного диода, которая сводится к сохранению

В статье «Управление смешанными группами пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов в условиях единого информационно-управляющего поля» авторов В.Н. Евдокименкова, М.Н. Красильщикова описана концептуальная математическая модель единого информационно-управляющего поля как среды функционирования смешанной группы пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов. Опираясь на отдельные свойства этой модели, сформирован облик распределенной системы интеллектуального управления смешанной группой летательных аппаратов, объединяющей внебортную и бортовую компоненты. Рассмотрены алгоритмы предполетного планирования действий смешанной группы, составляющие основу внебортной компоненты. Изложены алгоритмы распознавания тактических ситуаций и выработки управляющих решений, реализованные в составе бортовой компоненты.

В статье В.А. Матвеева, М.А. Басараба, Б.С. Лунина, Е.А. Чуманкина,

А.В. Юрина «Развитие теории создания волновых твердотельных гироскопов с металлическим резонатором» рассмотрен ряд вопросов, возникающих при разработке таких гироскопов: конечно-элементное моделирование колебательных процессов в резонаторе, проводимое с целью оптимизации его параметров; влияние массового дисбаланса резонатора на его характеристики. Предложена методика балансировки резонатора, позволяющая реализовать массовое производство недорогих гироскопических датчиков общего применения при низкой трудоемкости и себестоимости процесса.

Работа Л.А. Зинченко, А.И. Власова, Е.В. Резчиковой, В.А. Шахнова «Наноинженерия и инфокоммуникационные технологии» посвящена нанотехнологической информатике – новому направлению в науке. В статье рассмотрены подходы к представлению знаний в информационных системах с учетом свойств наноразмерных объектов и материалов. Отличительной особенностью предложенных подходов является использование онтологий, концептуальных карт и когнитивных технологий при представлении знаний.

Авторы работ настоящего выпуска представляют ведущие научные школы научно-исследовательских институтов и вузов из различных регионов России, а содержание статей отвечает мировым тенденциям развития исследований в области инженерных наук.

Abstract of the Themed Section

I. Fedorov

The present issue of "RFBR Journal" is dedicated to the researches carried out within the frames of scientific area of the engineering science fundamentals. This area is comparatively new in the RFBR structure which is not accidentally and it reflects modern trends in the engineering science development.

Earlier, there has been a clear time differentiation in the scientific work on different stages of the research: 1) fundamental (exploratory) study; 2) applied study. After that, specific technical projects had to be elaborated on the basis of the second stage of the research results.

Now, as a result of the engineering activity spectrum increase, these stages progressively merge. For example, exploratory researches in high-technology areas quite often directly turn into specific engineering design projects performed by the same scientific team.

This fact has significantly changed the nature of the engineer activity, adding new requirements to his/her university training, and the fundamental knowledge brings on special importance to it. The existent earlier unique separation of theoretical, exploration researches and their practical application in the modern technology not necessarily leads to high performance and sometimes is inefficient.

The aforesaid is well indicated by the example of publications included in the present themed section, where the authors possess candidate of science or doctoral degrees with an engineering background. Young engineers with the modern technical university training are authors of the articles as well.

The present themed section includes the fundamental research results of all scientific topics of the RFBR classifier in the engineering science.

In the article by A.L. Svistkov, V.N. Solodko, S.E. Evlampieva, N.I. Uzhegova and K.A. Mokhireva "Development of methods for computer modeling of mechanical behavior of elastomeric nanocomposite based on the knowledge of the material structure and activity of the filler", a new model of behavior of the elastomeric network is proposed which takes into account polymer chains length and flexibility, chemical cross-linking functionality, and orientation effects. The structure of material is analyzed by a multi-level simulation technique using the experimental data on the surface relief

obtained by the atomic-force microscope. Specific features of viscoelastic behavior of nanocomposites were studied experimentally. Based on the results of numerical simulations and experimental observations, a specific fan-like shape of specimens was elaborated to examine the material mechanical properties under biaxial deformation.

In the article by A.I. Prostomolotov, N.A. Verezub, V.S. Berdnikov "The phenomenon of "cold plume" formation by Czochralski method crystal growing", under discussion is the generation of striated microdefects in crystals growing by Czochralski method related to the melt flow instability induced by the instability in time of the crystallization front and the alloying additive pulsing flow from the melt into the crystal. The research was carried out using the noncrystallizable model liquid – ethanol, and the heptadecan melt with the room temperature of melting. Transparency of the heptadecan melt permitted to visualize both the structure of the melt flow and the shape of its crystallized part in a laboratory experiment as well.

The article by A.M. Efremov, A.A. Zherlitsyn, B.M. Kovalchuk, N.N. Pedin, A.V. Kharlov "Source of the focused high-current relativistic e-beam on the basis of the plasma-filled diode" is devoted to the problem of increasing the beam power of the electron source on the basis of the plasma-filled diode. The problem of the power rise can be solved by increasing the stored energy in the circuit inductance provided that the diode resistance rise rate is constant. In experiments on the linear transformer driver, the possibility of saving the diode resistance output characteristics has been checked out for the

fixed initial parameters of the plasma channel. A series of contour modifications was performed which permits to change the rate of the current increase in the diode at the low-resistance phase nearly 5 times. The experiments prove that the resistance rise rate of the plasma-filled diode is constant on increasing the stored energy in the inductance up to 7 kJ. It allows scaling the power of the electron source based on the plasma-filled diode. The set of electronic sources design with power more than 250 GW applied as a linear transformer driver was analyzed.

The article "Study of possibilities of reducing the frictional engagement in the "ice-skate" pair by modifying the structure of the two contacting surfaces" by G.Yu. Goncharova, I.G. Nikiforova, T.G. Ustyugova, N.D. Razomasov offered a comprehensive approach to solve the problem of reducing the resistance force of the blade sliding on ice: from the ice surface and from the sliding surface of the skate or sports apparatus. The developed technology of creating a modified ice massif provides its best sliding and mechanical properties as a result of the ice molecular restructuring by introducing microdoses of high molecular compounds into water to be filled. For the first time ever, the impact of the modifiers' physical and mechanical properties on the heat and mass transfer processes during crystallization was experimentally confirmed. The cryomicroscopic study confirmed the hypothesis of agglomeration of probable impurities on macromolecules of fluorine-containing suspensions and their role as additional "molecular" stage water purification. Experimental studies of the primary distribution modifiers diagram in the massif of ice and subsequent redeployment confirmed the effect of the concentration and thermal component of the mass transfer mechanisms.

In the paper by G.A. Filippov, A.R. Avetisyan "Eulerian methods for modelling of polydispersed turbulent wet steam flows in the turbine blade

cascades and Laval nozzles with unsteady phase transitions" three methods of evolution modeling of the moisture distribution by size as the result of compound running nucleation processes (spontaneous condensation), heterogeneous condensation (vaporization) and coagulation are analyzed. The results of comparisons of the effectiveness of the methods by the example of analytical solution of equations for probability density function for wetness size spectrum are presented. The results of the calculations on the models are compared with experimental data and their good conformity is shown.

Researches coupled with the analysis of nonequilibrium gas-kinetic flow processes of diluted gas in macro- and micro-systems applying modern computer modeling methods, are presented in the paper "Modeling and analysis of gas-kinetic flow processes on the basis of the Boltzmann kinetic equation for the solution of nuclear technology problems", by V.G. Grishina, E.P. Derbakova, O.I. Dodulad, Y.Y. Kloss, D.V. Martynov, A.V. Morozov, F.G. Tcheremissine. The main goal for such kind of problems solution is the necessity to use the Boltzmann kinetic equation for gas of actual physical properties applied for most difficult area of analysis, for which hydrodynamic equations are inapplicable. The solution of above mentioned problems was obtained on the basis of the numeric solution of the Boltzmann kinetic equation by the finite-difference method applying the projection method of collision integral calculation. It strictly keeps mass, impulse and energy of molecules collision, thus satisfying the Boltzmann H-theorem. The finite-difference method of the second order of precision is applied for non-structuralized 2-D and 3-D nets. The problem-modeling medium and advanced parallel algorithm of high-level scaling at cluster computer systems were elaborated.

In the article "Manned and unmanned aircrafts mixed group intellectual control under condition of united Information & control field existence" by authors V.N. Evdokimov, M.N. Krasilschikov the conceptual mathematical model of the United Information & Control Field (UICF) is under consideration. The field mentioned is interpreted in the paper as a specific environment of the so called mixed flying vehicles group operation. The distributed intellectual system of the mixed group control architecture and algorithms are generated based on conceptual mathematical model UICF performances. The distributed intellectual system includes two components: on-board and out-board ones. The operation algorithms of the out-board component suggested, which are used for the preliminary mixed group mission planning. The on-board component includes algorithms of both actual tactical situation recognizing and control decision making.

In the paper by V.A. Matveev, M.A. Basarab, B.S. Lunin, E.A. Chumankin, A.V. Yurin "Development of the theory of cylindrical vibratory gyroscopes with metallic resonators" a number of problems arising in process of developing the solid-state gyroscope with a metallic resonator: the finite-element modeling of oscillation process in the resonator performed for its parameters optimization; the influence of the resonator mass disbalance on its characteristics was analyzed. The resonator balancing methodic is proposed that allows realizing the mass production of inexpensive gyroscopic sensors of the general use with low labor intensity and process costs.

The article by L.A. Zinchenko, A.I. Vlasov, E.V. Rezhikova, V.A. Shakhnov "Nanoengineering and infocommunication technology" is devoted to nanoinformatics. Approaches to nanotechnology knowledge representa-

tion are discussed in detail. Ontological level and concept maps have been chosen as nanotechnology knowledge representation models. It is shown that the open world assumption is more suitable for nanotechnology knowledge representation applications. Additionally, cognitive technologies have been incorporated for knowledge representation.

Authors of the present issue articles are representatives of the leading scientific schools of the scientific-research institutes and universities from various regions of Russia. The content of the papers reflects the world trends of researches in the area of engineering science.

Разработка методов компьютерного моделирования механического поведения эластомерного нанокompозита на основе знаний о структуре материала и активности наполнителя*

А.Л. Свистков, В.Н. Солодько, С.Е. Евлампиева, Н.И. Ужегова, К.А. Мохирева

Предложена новая модель поведения эластомерной сетки, учитывающая длины полимерных цепей, их гибкость, функциональность химических сшивок, ориентационные эффекты. С целью анализа структуры материала разработан метод многоуровневого анализа экспериментальных данных рельефа поверхности, получаемого с помощью атомно-силового микроскопа. В основе его лежит представление о рельефе поверхности как о сумме рельефов, каждый из которых выделяет объекты определенного масштабного уровня. Решены задачи двумерной теории упругости по расчету напряженно-деформированного состояния и найдены эффективные упругие модули композитного материала, содержащего большое число включений, которые образуют регулярные и случайные структуры, материалы с агрегатным расположением включений. Проведены исследования особенностей вязкоупругого поведения нанокompозитов. На основании результатов численных экспериментов и опытной проверки предложена новая веерообразная форма образцов для исследования механических свойств в условиях двухосного деформирования. Разработана модель макроскопического уровня поведения эластомерного нанокompозита, которая представляет собой систему определяющих уравнений упруговязкопластического поведения материала, работающего в условиях конечных деформаций. Для объяснения эффектов усиления эластомерных нанокompозитов использована гипотеза о формировании высокопрочных связей из ориентированного полимера в зазорах между близкорасположенными агрегатами частиц наполнителя.

Ключевые слова: многоуровневое моделирование, определяющие уравнения, вязкоупругость, размягчение, конечные деформации, эластомерный нанокompозит.

*

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 09-08-00530-а и 12-08-00740-а).

Введение

Приоритетным направлением развития науки, технологии и техники является компьютерное моделирование наноматериалов, наноустройств и нанотехнологий. Развитие этого направления возможно только на основе глубоких фундаментальных исследований. Необходимо понимать, что происходит на наноуровне материала и воспроизводить все процессы этого уровня с помощью

математических моделей. Последние должны создаваться на стыке наук: молекулярной физики, химии и механики сплошной среды. В этом отличие моделей наноматериалов от классических моделей механики сплошной среды.

Научной проблемой настоящей работы являлась разработка основ, которые в дальнейшем позволят осуществить шаги к виртуальному проектированию рецептуры эластомерных материалов. Эффективный способ улучшения их механических свойств – наполнение полимеров ультра- и высокодисперсными наполнителями органического или неорганического происхождения. В настоящее время для этих целей



СВИСКОВ

Александр Львович

Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук



СОЛОДЬКО

Владислав Николаевич

Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук



ЕВЛАМПИЕВА

Светлана Евгеньевна

Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук



УЖЕГОВА

Надежда Ивановна

Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук



МОХИРЕВА

Ксения Александровна

Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук

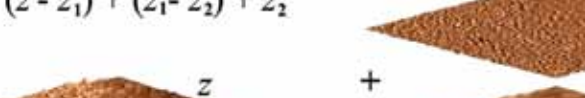
Молекулярная модель формирования упругого поведения эластомерного связующего

Скорость деформирования материала

- 100 % / мин
- 50 % / мин
- 20 % / мин
- 5 % / мин

○ – равновесные точки

$z = (z - z_1) + (z_1 - z_2) + z_2$



№ 3 (87) июль-сентябрь 2015 г. |||||

макроскопические свойства материала. Удобнее всего для этого проводить исследования в двумерной постановке математической задачи (плоское деформированное состояние). В этом случае появляется возможность использовать для вычислений эффективные аналитические методы. Безусловно, количественные результаты будут отличаться от результатов, которые появляются при решении трехмерных задач. Однако качественная картина зависимостей останется такой же. В рамках плоской задачи теории упругости с использованием теории функций комплексного переменного Колосова–Мусхелишвили можно определить с высокой точностью поля напряжений и деформаций в ансамблях, состоящих из нескольких сотен включений. По найденному напряженно-деформированному состоянию в ансамблях включений не представляет труда вычислить эффективные макроскопические свойства структурно неоднородного материала, что и было сделано.

Проведен анализ напряженно-деформированного состояния около круглых включений. Матрицу рассматривали как гуковой несжимаемый материал. Включения представляли собой абсолютно твердые частицы. Для нахождения решений задач применяли разработанный нами ранее итерационный метод [5]. Для осуществления вычислительных экспериментов создан программный пакет «COMPOSITE 2D» [6]. Задача нахождения структурных напряжений и деформаций в многосвязных областях подробно изложена в работе [7].

На рисунке 5 представлены примеры рассматриваемых ансамблей частиц наполнителя с регулярным, агрегатным и случайным расположением включений, а также с материалом, в котором частицы наполнителя собраны в агломераты. Результаты вычислительного эксперимента представлены на рисунке 6. Показано, что в рассмотренных вариантах минимальное и максимальное значения модуля заключены между модулями,

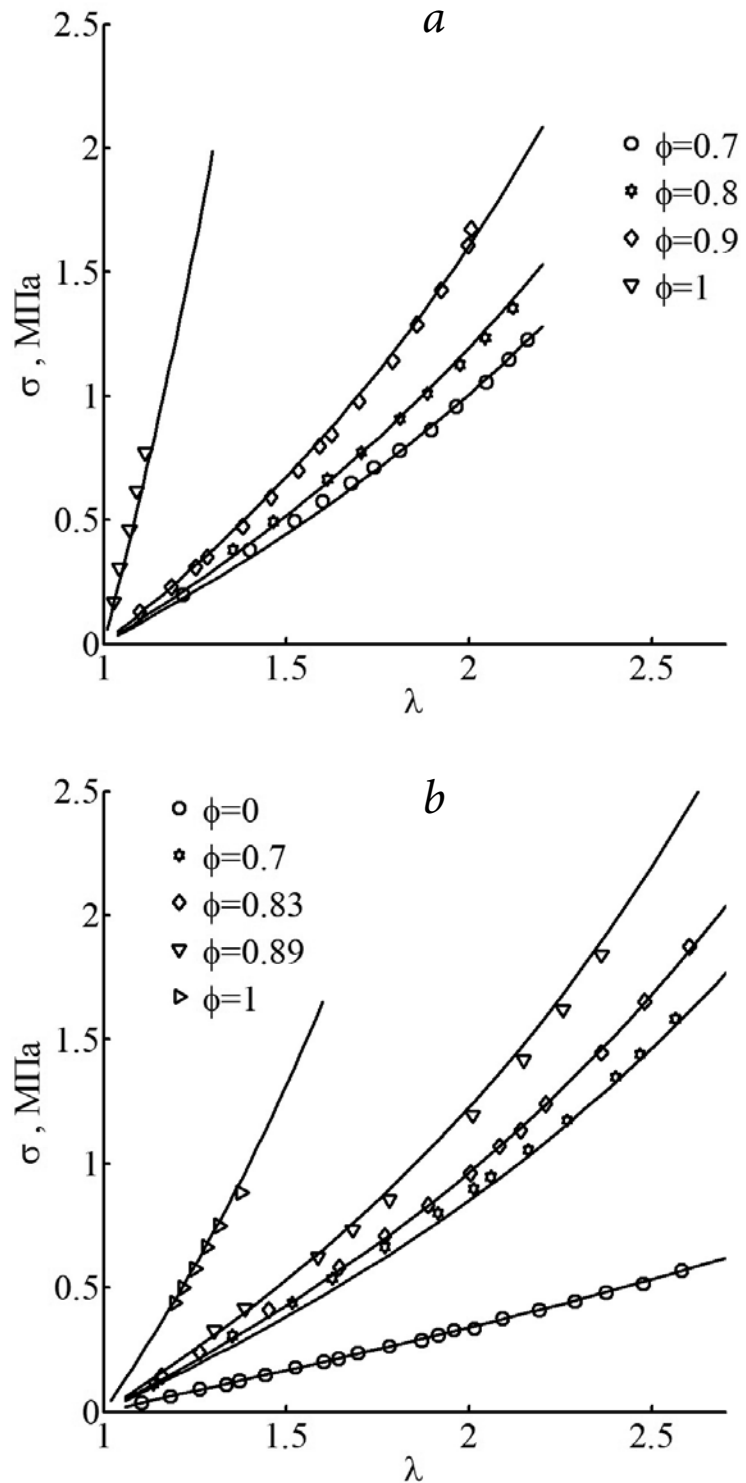


Рис. 4. Зависимость напряжения от удлинения материала в условиях одноосного нагружения полидиметилсилоксана. Сплошными линиями показаны теоретические кривые, точками – экспериментальные данные. Использованы полимерные цепи с молекулярными массами 660 и 18500 г/моль (а), 1100 и 18500 г/моль (б).

вычисленными для правильных треугольной и четырехугольной решеток. Из этого следует, что границы изменения свойств материалов можно определять, решая относительно простые задачи с ячейками периодичности композиционного материала. Для высоких наполнений эффективный модуль для пря-

В материале частицы нанонаполнителя объединены в агрегаты, расположенные на близком расстоянии друг к другу. Согласно высказанной нами гипотезе при деформировании материала связанный каучук выступает в качестве зародыша новой фазы – в виде областей ориентированного полимера. Эти зародыши увеличиваются в размере и приводят к появлению волокон в материале, ориентированных в направлении действующей нагрузки [8, 9]. Их можно обнаружить с помощью атомно-силовой микроскопии в вершине макротрещины. Пример использования модели для вычисления равновесных кривых деформирования материала показан на *рисунке 8*. Предложенные определяющие уравнения модели позволили с хорошей точностью получить соответствие теории экспериментальным данным. На всех приведенных рисунках использо-

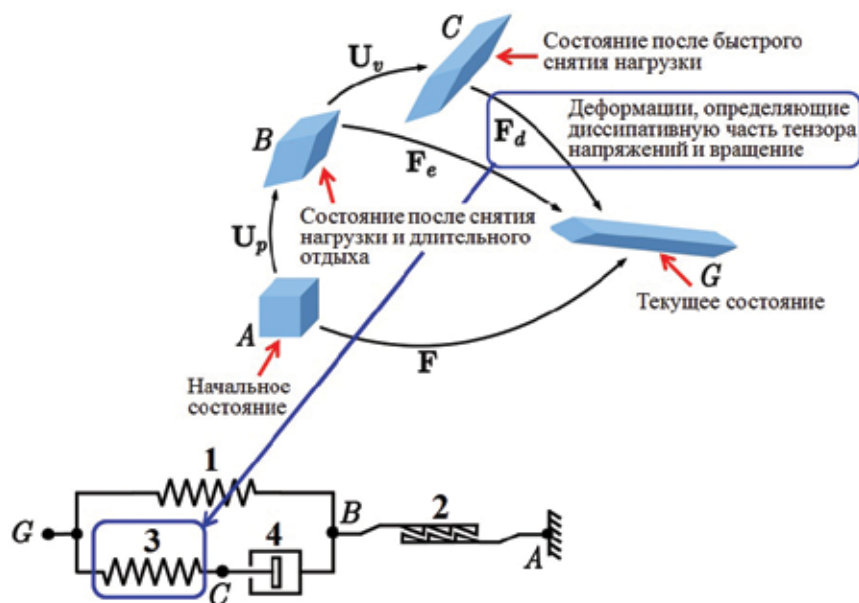


Рис. 7. Иллюстрация идеи использования множества конфигураций для построения определяющих уравнений среды, обладающей упруговязкопластическими свойствами и работающей в условиях конечных деформаций. Точками А, В, С, G на схеме обозначены состояния материала, а два упругих, вязкий и пластический элементы показывают, что переходы между этими состояниями определяются соответственно с помощью уравнений теории гиперупругости, вязкого и пластического течения континуума.

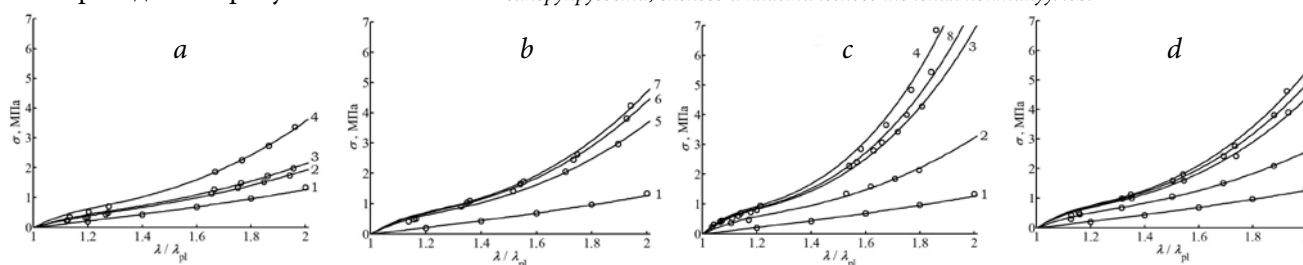


Рис. 8. Зависимость напряжения от отношения кратности удлинения материала λ к кратности остаточного удлинения λ_{pl} для наполненных эластомеров с массовыми долями наполнителя $phr=30$ (a), 40 (b,c) и 50 (d). Кривые для материалов с наполнителем: 1 – ненаполненный эластомер; 2 – Aerosil R974; 3 – Aerosil 200; 4 – Aerosil 200 + SI69; 5 – Ultrasil VN3; 6 – Coupsil 8113; 7 – Ultrasil VN3 + SI69; 8 – Carbon Black N330.

ван один и тот же полимер в качестве связующего материала – бутадиен-стирольный каучук, синтезированный из раствора. Расчеты осуществлены для различных наполнителей с разными массовыми долями и разной обработкой поверхности частиц.

Работа в рамках проектов РФФИ позволила накопить значительный экспериментальный материал, отла-

дить методы исследования, предложить новые идеи для многомасштабного моделирования эластомерных нанокомпозитов. Дальнейшее развитие моделей планируется осуществить с учетом строения частиц наполнителя и химических связей его с эластомером.

Коллектив авторов благодарит Институт исследования полимеров имени Лейбница (Дрезден) за плодотворное научное сотрудничество в области исследования свойств эластомерных нанокомпозитов.

Литература ●

1. К.А. Мохирева, А.Л. Свистков, В.В. Шадрин
Патент РФ 2552121, 2015.
2. А.Л. Свистков, В.В. Шадрин
Патент РФ 2549841, 2015.
3. А.Л. Свистков, Н.И. Ужегова
Свидетельство о государственной регистрации программы для
ЭВМ 2014617891, 2014.
4. J.E. Mark
Adv. Polym. Sci. Polymer Networks, 1982, **44**, 1. DOI: 10.1007/3-540-11471-8_1.
5. А.Л. Свистков, О.К. Гаришин, С.Е. Евлампиева, С.Н. Лебедев
Механика композиционных материалов и конструкций. 1999, **5** (2). 17.

6. **А.Л. Свистков, С.Е. Евлатмиева**
Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2013617009, 2013.
7. **С.Е. Евлатмиева, Е.А. Паркаева, А.Л. Свистков**
Вычислительная механика сплошных сред, 2013, **6(3)**, 309.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7242/1999-6691/2013.6.3.35>.
8. **А.Л. Свистков**
Изв. РАН. МТТ, 2010, 4, 82.
9. **K. W. Stöckelhuber, A. L. Svistkov, A. G. Pelevin, G. Heinrich**
Macromolecules. 2011, **44(11)**, 4366. DOI: 10.1021/ma1026077.

Development of Methods for Computer Modeling of the Mechanical Behavior of an Elastomeric Nanocomposite Based on Knowledge of the Material Structure and Activity of the Filler*

Alexander L. Svistkov –
Continuous Media Mechanics,
Russian Academy of Sciences
Academician Korolev Str.,
Perm, 614013, Russia
e-mail: svistkov@icmm.ru

Vladislav N. Solodko –
of Continuous Media Mechanics,
Institute of Mechanics, Russian Academy of Sciences
1, Academician Korolev Str.,
Perm, 614013, Russia
e-mail: vlad.solodko@gmail.com

Svetlana E. Evlampieva –
Continuous Media Mechanics,
Russian Academy of Sciences
1, Academician Korolev Str.,
Perm, 614013, Russia
e-mail: evl@icmm.ru

Nadezhda I. Uzhegova –
continuous Media Mechanics,
Russian Academy of Sciences
1, Academician Korolev Str.,
Perm, 614013, Russia
e-mail: uzhegova@icmm.ru

Kseniya A. Mokhireva –
Continuous Media Mechanics,
Russian Academy of Sciences
1, Academician Korolev Str.,
Perm, 614013, Russia
e-mail: lyadovaka@icmm.ru

Abstract

A new model of the elastomeric network behavior is proposed which takes into account the polymer chains length and flexibility, the chemical cross-linking functionality, as well as the orientation effects. Investigation of the structure of the material is performed using a multi-level simulation technique for analysis of the experimental data on surface relief obtained with an atomic-force microscope. It is based on the representation of a surface relief as a sum of three relieves with each of them reflecting objects of a certain scale level. The 2D elasticity problems determining the stress-strain state are solved, and effective elastic moduli are found for the composite materials containing a large number of inclusions that form regular structures, random structures and materials with an aggregate arrangement of inclusions. Specific features of the nanocomposites behavior were studied experimentally. Basing on the results from numerical simulations and experimental observations, a specific fan-like shape of specimens was elaborated to examine mechanical properties of the material under biaxial deformation. A model of the macroscopic behavior of elastomeric nanocomposites is developed. It represents a system of constitutive equations describing the elastoviscoplastic behavior of materials capable of sustaining finite deformations. The elastomeric nanocomposite reinforcing effects are explained on the basis of a hypothesis that high-strength bonds of the oriented polymer are formed in the spaces between the neighboring filler particles.

Keywords: multilevel modeling, constitutive equations, viscoelasticity, softening, finite deformation, elastomeric nanocomposite.

References

1. **K.A. Mokhireva, A.L. Svistkov, V.V. Shadrin**
Patent RU 2552121, 2015 (in Russian).
2. **A.L. Svistkov, V.V. Shadrin**
Patent RU 2549841, 2015 (in Russian).
3. **A.L. Svistkov, N.I. Uzhegova**
The certificate of state registration of the computer program
2014617891, 2014 (in Russian).
4. **J.E. Mark**
Adv. Polym. Sci. Polymer Networks, 1982, **44**, 1.
DOI: 10.1007/3-540-11471-8_1.
5. **A.L. Svistkov, O.K. Garishin, S.E. Evlampieva, S.N. Lebedev**
Mekhanika Kompozitsionnykh Materialov i Konstruktsii
[Composite Mechanics and Design], 1999, **5**(2), 17 (in Russian).
6. **A.L. Svistkov, S.E. Evlampieva**
The certificate of state registration of the computer program of the RF
2013617009, 2013 (in Russian).
DOI: <http://dx.doi.org/10.7242/1999-6691/2013.6.3.35>.
7. **S.E. Evlampieva, E.A. Parkaeva, A.L. Svistkov**
Vyichislitel'naya Mekhanika sploshnykh sred [Computational Continuum Mechanics], 2013, **6**(3), 309 (in Russian). DOI: 10.1021/ma1026077.
8. **A.L. Svistkov**
Mechanics of Solids, 2010, **45**, № 4, 562.
9. **K.W. Stöckelhuber, A.L. Svistkov, A.G. Pelevin, G. Heinrich**
Macromolecules, 2011, **44**(11), 4366.

* *The work was financially supported by RFBR (projects N 09-08-00530-a and 12-08-00740-a).*

Явление образования «холодных термиков» при выращивании кристаллов методом Чохральского*

А.И. Простомолотов, Н.А. Везуб, В.С. Бердников

Образование полосчатых микродефектов в кристаллах, выращиваемых методом Чохральского, связано с неустойчивостью течения расплава, которая является причиной нестабильности во времени фронта кристаллизации и пульсирующего потока легирующей примеси из расплава в кристалл. Проблема неустойчивости течения рассматривается на основе гидродинамической модели метода Чохральского, математическая формулировка которой полностью соответствует условиям лабораторного эксперимента. Исследование проведено как с использованием некристаллизующейся модельной жидкости – этанола, так и расплава гептадекана, имеющего комнатную температуру плавления.

Подробные исследования, проведенные в этаноле, позволили установить порог и характер перехода от режима стационарного течения и теплопереноса к неустойчивым режимам с возникновением и развитием пульсаций температуры. В наглядной форме визуализирован процесс образования, развития и отрыва «холодных термиков» от диска (имитатора кристалла). Экспериментальные данные, соответствующие дискретному спектру ламинарно-турбулентного перехода, удовлетворительно согласуются с результатами расчетов.

В лабораторном эксперименте прозрачность расплавленного гептадекана позволила визуализировать структуру течения расплава и форму его закристаллизовавшейся части. Это позволило обеспечить расчетную модель экспериментальными данными для численной верификации и детального параметрического изучения неустойчивых течений расплава гептадекана с анализом их влияния на форму фронта кристаллизации и процесс образования «холодных термиков».

Ключевые слова: выращивание кристаллов, метод Чохральского, термики, моделирование, гидродинамика, теплоперенос, фронт кристаллизации.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 12-08-00487а, 12-08-00966а и 14-08-00454а).

Введение

Проблема полосчатой неоднородности в кристаллах, выращенных методом Чохральского (CZ), является предметом многих экспериментальных и теоретических работ, которые анализируют колебания температуры в расплаве для конкретных условий выращивания кристаллов [1]. Тем не менее современное численное моделирование процессов тепло- и массо-переноса использует сопряженные CZ-модели, которые сложны для детального анализа неустойчивости течения в расплаве. Их верификация с помощью экспериментальных данных, полученных в сложных технологических условиях, на наш взгляд, дает лишь качественное представление о соотношении расчетных и экспериментальных данных.

Только сравнительно недавно нестационарный теплоперенос в модельных жидкостях стал детально изучаться численно на более простой, гидродинами-

ческой, CZ-модели [2, 3] с использованием прецизионных данных физического моделирования [4, 5] на лабораторных установках, адекватно соответствующих параметрам упомянутой выше гидродинамической модели.

Настоящая работа развивает понимание гидродинамической неустойчивости применительно к геометрии и режимным параметрам CZ-выращивания кристаллов. Основное внимание уделяется явлению образования «холодных термиков» вблизи фронта кристаллизации (ФК), наглядному представлению их эволюции во времени до и после отрыва от ФК. Это явление воспроизведено экспериментально и чис-



ПРОСТОМОЛотов
Анатолий Иванович
Институт проблем механики
им. А.Ю. Ишлинского Российской
академии наук



ВЕРЕЗУБ
Наталья Анатольевна
Институт проблем механики
им. А.Ю. Ишлинского Российской
академии наук



БЕРДНИКОВ
Владимир Степанович
Институт теплофизики
им. С.С. Кутателадзе Сибирского
отделения Российской
академии наук

амплитудно-частотные характеристики пульсаций температуры. Соответствующие структуры течения жидкости были визуализированы мелкодисперсными алюминиевыми частицами, а измерения температуры проводили с помощью термопар, расположенных под диском (контрольные точки S^1 и S^2).

Теплофизические параметры материалов были взяты из справочной литературы и приводятся вместе с рассчитанными гидродинамическими критериями подобия в *таблице 1*.

Таблица 1. Теплофизические параметры и критерии подобия

Параметр	Этанол	Гептадекан
Плотность, ρ [кг/м ³]	790	787 (273 К), 778 (295 К), 769 (303 К)
Объемное тепловое расширение, β_T [1/К]	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$1.17 \cdot 10^{-3}$
Кинематическая вязкость, ν [м ² /с]	$1.54 \cdot 10^{-6}$	$5.187 \cdot 10^{-6}$ (295 К)
Поверхностное тепловое расширение, $\partial\sigma/\partial T$ [Н/м·К]	$8.3 \cdot 10^{-5}$	$8.38 \cdot 10^{-5}$
Теплопроводность, λ [Дж/с·м·К]	0.1745	0.1368 (295 К), 0.1319 (313 К)
Теплоемкость, C_p [Дж/кг·К]	2430	2247
Теплота плавления, H_L [Дж/кг]	—	$3.2 \cdot 10^5$
Число Прандтля, $Pr = \nu\rho C_p/\lambda$	16.94	66.37
Число Грасгофа, $Gr = g\beta_T R_S^3 \Delta T/\nu^2$	$2.80 \cdot 10^6$ ($\Delta T = 4$ К) $1.05 \cdot 10^7$ ($\Delta T = 15$ К)	$2.21 \cdot 10^5$ ($\Delta T = 3.37$ К)
Число Марангони, $Mn = (\partial\sigma/\partial T) R_S C_p \Delta T/\nu\lambda$	$9.60 \cdot 10^3$ ($\Delta T = 4$ К) $3.60 \cdot 10^4$ ($\Delta T = 15$ К)	$4.79 \cdot 10^4$ ($\Delta T = 3.37$ К)
Число Рейнольдса, $Re = R_S^2 \Omega_\infty/\nu$	—	$5.54 \cdot 10^2$ ($\Omega_S = 1$ рад/с)

тационной тепловой конвекции, которая усиливается дополнительным влиянием термокапиллярных сил на свободной поверхности жидкости. В результате жидкость нагревается и поднимается вверх вблизи боковой стенки тигля. Затем она перемещается в радиальном направлении к холодному диску, где жидкость охлаждается и

В графическом виде эволюция «холодного термина» (формирование, развитие и отрыв от поверхности диска) была визуализирована и ее суть заключается в следующем. В гравитационном поле неоднородность распределения температуры в тигле вызывает движение расплава под действием грави-

опускается на дно. Это охлажденное течение имеет вид струи в центре тигля (вблизи оси), которая простирается от нижней кромки диска до дна тигля.

Под диском с увеличением ΔT от 4 до 15 К структура струи претерпевает определенные изменения. Эта струя постепенно достигает дна тигля, не теряя свою первоначальную форму при малой величине $\Delta T = 4$ К. Существенные изменения ее радиальной формы становятся видимыми с удалением вниз от диска для больших значений $\Delta T = 10$ и 15 К. Эти пространственные изменения нисходящего потока зависят также от времени. При $\Delta T = 15$ К зависимость от времени изотерм у дна тигля становится заметной. Это сопровождается радиальным поворотом струи от оси к боковой стенке.

Структура потока по данным визуализации мелкодисперсными частицами показана на рисунке 3. Снятый во время эксперимента фильм показывает эволюцию неустойчивости в структуре потока в соответствии с механизмом формирования, развития и отрыва «холодного термика» от диска, которая похожа на образование капли жидкости на сосульке с ее периодическим отрывом от твердой поверхности. Аналогичные эксперименты были проведены в несколько иной геометрии модели с использованием силиконового масла, которые демонстрируют похожую картину струйного течения [4].

Расчетный процесс эволюции «холодных термиков» четко согласуется с экспериментальным: «холодный термик» формируется у края диска, увеличивается в размерах при движении к центру, а затем отрывается от диска вблизи центрального нисходящего потока. Расчетная трехмерная моментальная картина процесса формирования и развития «холодных термиков» показана на рисунке 4, на которой видно дискретное азимутальное распределение «холодных термиков» под диском.

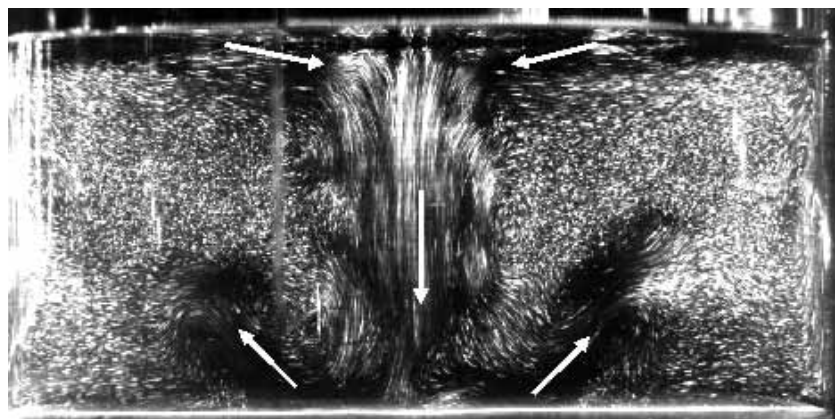


Рис. 3. Визуализация структуры течения с помощью мелкодисперсных частиц. Стрелками показаны направления течения жидкости.



Рис. 4. Трехмерная мгновенная картина «холодных термиков» под диском.

Такое распределение отличается от их равномерного азимутального распределения при осесимметричном расчете этого процесса.

Графики спектральной мощности температурных пульсаций в контрольной точке S^I показаны на рисунке 5. Эти спектры были построены на основе регистрации колебаний температуры в S^I , сделанных в случае как осесимметричного, так и трехмерного расчета. В обоих случаях спектры колебаний температуры являются существенно дискретными. В них выделяются частоты с высокой спектральной мощностью колебаний температуры. Частотное распределение спектральной мощности в осесимметричном и трехмерном случаях примерно схожи, но значения мощности несколько меньше в трехмерном случае. Эта отличительная черта трехмерных результатов объясняется наличием указанной выше азимутальной неоднородности в распределении «холодных термиков» под диском.

вращательное движение весь объем расплава. Однако течение в меридиональной плоскости (радиальная и осевая компоненты скорости) существенно медленнее. Вблизи оси тигля расплав всплывает вверх (с осевой скоростью $V_z \approx 4.14 \times 10^{-3}$ м/с) и отбрасывается центробежными силами, действующими на твердой выпуклой поверхности. Такое встречное течение приводит к ослаблению воздействия тепловой конвекции на форму ФК. Это проявляется в виде центрального прогиба вверх в профиле ФК и обычно такой ФК называется W-образным. Расчетная форма ФК, представленная изотермой T_{sol} , и экспериментальное фото закристаллизовавшейся области [7] хорошо между собой согласуются.

Можно отметить, что описанная выше картина течения в целом остается неизменной во времени, однако интенсивности вихрей как вынужденной, так и тепловой конвекции изменяются колебательно. Такая колебательная неустойчивость двухвихревого течения вызывает периодическое возникновение, развитие и отрыв «холодных термиков» вблизи ФК, что аналогично рассмотренной выше картине в этаноле.

Мы полагаем, что это фундаментальное явление играет важную роль в образовании полосчатой неоднородности кристаллов, которая связана с колебательным вхождением примесей в кристалл в процессе кристаллизации. Отметим, что форма и положение ФК практически не изменяются во времени. Однако тепловой пограничный слой вблизи ФК подвержен значительным изменениям. Графики колебаний температуры в двух характерных точках расплава приведены на рисунке 7. Они показывают значительные осцилляции температуры в точке S^1 подкристалльной области, которая находится вблизи ФК, и несколько меньшие в более удаленной от ФК точке S^2 . При этом колебания вблизи боковой стенки тигля (точка S^3) практически отсутству-



Рис. 6. Образование «холодных термиков» под фронтом кристаллизации ($T_M = 295.00$ K) при кристаллизации гептадекана в режиме совместного действия тепловой конвекции и вращения закристаллизовавшейся области. Сплошные линии – изотермы со значениями температуры [K]. Направление основного течения расплава показано пунктирными стрелками.

Т, К

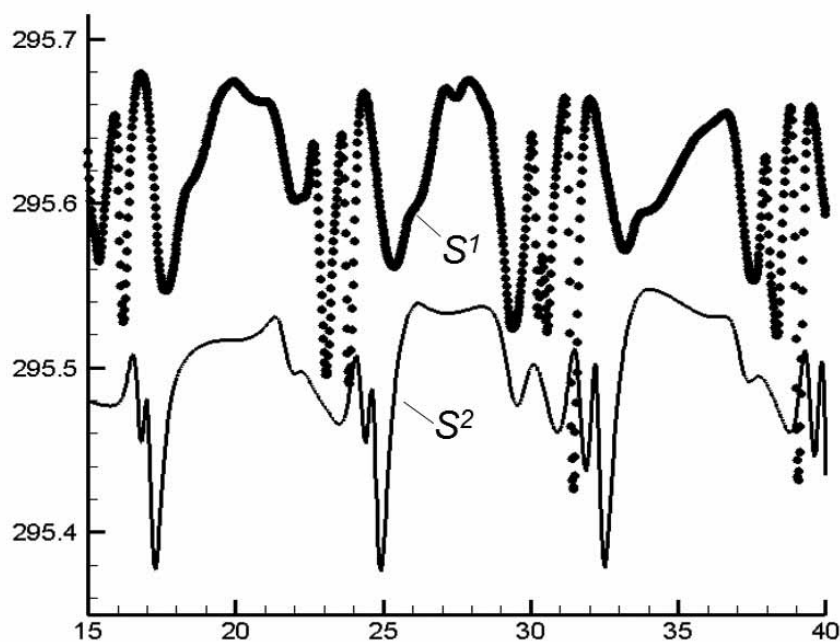


Рис. 7. Графики колебаний температуры в контрольных точках S^1 и S^2 .

ют. Наиболее значимые частоты этих осцилляций соответствуют диапазону 0.1–0.2 Гц для точки S^1 , что согласуется с задаваемой частотой полного оборота диска ~ 0.16 Гц. Это свидетельствует о том, что на динамику «холодных термиков» и связанную с ней частоту колебаний температуры вблизи ФК существенное влияние оказывает скорость вращения диска.

Заключение

В данной работе экспериментальная и численная CZ-модели рассмотрены в более простых (гидро-

При отсутствии процесса кристаллизации жидкости (в этаноле) это явление обнаружено и продемонстрировано для колебательного режима тепловой

При кристаллизации расплава гептадекана возникновение конвективной неустойчивости и образование «холодных термиков» исследовано под вращающимся W-образным ФК. Это явление обнаружено и продемонстрировано при существенно меньшей разности температур $\Delta T = 3,37$ К. Оно сопровождается колебаниями интенсивности вихрей вынужденной и тепловой конвекции так, что такая колебательная неустойчивость двухвихревого течения визуально проявляется в периодическом возникновении, развитии и отрыве «холодных термиков» вблизи ФК. Графики колебаний температуры и соответствующие им спектральные плотности, построенные в двух точках подкристалльной области расплава, свидетельствуют о том, что на динамику «холодных термиков» и связанную с ней частоту колебаний температуры вблизи ФК существенное влияние оказывает скорость вращения диска.

J. Crystal Growth, 2001, **233**, 687. DOI:10.1016/S0022-0248(01)01633-5.

6. **А.Л. Гончаров, М.Т. Девдариани, А.И. Простомолотов, И.В. Фрязинов**
Матем. моделир., 1991, 3(5), 89.

7. **В.С. Бердников, В.А. Винокуров, В.В. Винокуров, В.А. Гапонов, В.А. Марков**
Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2011, 4(3), 641.

[illegible]

The Phenomenon of «Cold Plume» Formation in Czochralski Crystal Growing*

Anatoly I. Prostomolotov –
Institute for Problems in Mechanics of
the Russian Academy of Sciences
101 block 1, Vernadskogo prosp. 101,
Moscow, 119526, Russia
e-mail: prosto@ipmnet.ru

Nataliya A. Verezub –
Institute for Problems in Mechanics of
the Russian Academy of Sciences
101 block 1, Vernadskogo prosp. 101,
Moscow, 119526, Russia
e-mail: verezub@ipmnet.ru

Vladimir S. Berdnikov –
Kutateladze Institute of Thermophysics,
Siberian Branch of the Russian
Academy of Sciences
1, Lavrentyev Avenue,
Novosibirsk, 630090, Russia
e-mail: berdnikov@itp.nsc.ru

Abstract

Formation of the micro defect striations in the crystals grown by Czochralski method is associated with instability of the melt flow, which causes the time-instability of crystallization front and pulsating dopant flux from a melt into a crystal. This paper discusses the problem of flow instability on the basis of Czochralski numerical hydrodynamic model. Its mathematical formulation fully corresponds to the laboratory experiment. The study was performed using the non-crystallizing liquid (ethanol) and the crystallizing melt of heptadecane having the room melting temperature.

Detailed studies conducted in ethanol allowed us to determine the threshold and the nature of transition from the regime of steady-state flow and heat transfer to unstable regimes characterized by emergence and development of the temperature fluctuations. In an understandable way the formation, development and separation of "cold plumes" from the disk (a simulator of the crystal) have been visualized. The experimental data corresponding to the discrete spectrum of laminar-turbulent transition were in good agreement with the calculated results.

In laboratory experiments transparency of the molten heptadecane allowed us to visualize the structure of the melt flow and the shape of its crystallized segment. It also helped to provide the calculation model by the experimental data for numerical verification and detailed parametric studies of unstable melt flows of heptadecane with the analysis of their influence on crystallization front and the formation of "cold plumes".

Keywords: crystal growth, Czochralski method, simulation, fluid dynamics, heat transfer, cold plumes, crystallization front.

References

1. **W. Miller**
Phys. Stat. Solidi (B), 2010, **247**(4), 885. DOI: 10.1002/pssb.200945541.
2. **V.S. Berdnikov, A.I. Prostomolotov, N.A. Verezub**
J. Crystal Growth, 2014, **401**, 106. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2013.12.055.
3. **O.A. Bessonov, V.I. Polezhaev**
Fluid Dynamics, 2011, **46**(5), 684.
4. **M. Teitel, D. Schwabe, A. Yu. Gelfgat**
J. Crystal Growth, 2008, **310**, 1343. DOI:10.1016/j.jcrysgro.2007.11.164.
5. **D. Vizman, O. Gräbner, G. Muller**
J. Crystal Growth, 2001, **233**, 687. DOI:10.1016/S0022-0248(01)01633-5.
6. **A.L. Goncharov, M.T. Devdariani, A.I. Prostomolotov, I.V. Fryazinov**
Matematicheskoe modelirovanie [Mathematical modeling], 1991, **3**(5), 89 (in Russian).
7. **V.S. Berdnikov, V.A. Vinokourov, V.V. Vinokourov, V.A. Gaponov, V.A. Markov**
Vestnik of the Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, 2011, **4**(3), 641 (in Russian).

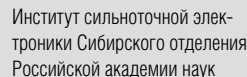
★

The work was financially supported by RFBR (projects N 12-08-00487a, 12-08-00966a and 14-08-00454a).

А.М. Ефремов, А.А. Жерлицын, Б.М. Ковальчук, Н.Н. Педин, А.В. Харлов

Ключевые слова: электронный ускоритель, плазмонаполненный диод, сильнотоочный релятивистский электронный пучок.

Диоды с предварительным заполнением ускоряющего промежутка плазмой имеют на порядок ниже сопротивление, выше ток и мощность для заданного напряжения [5]. В настоящее время исследования



сильноточного плазмонаполненного диода в основном ограничены экспериментами в Военно-морской исследовательской лаборатории США (U.S. Naval Research Laboratory) на установке Gamble II с промежуточной накопительной линией [3, 6]. Используется конфигурация со стержневым анодным центральным электродом с инъекцией плазмы с внешнего проводника. Предельные параметры источника: ток до 500 кА, время нарастания тока через плазму в диоде 50 нс, напряжение 1.8 МВ.

Техника линейных импульсных трансформаторов [7, 8] дает возможность напрямую запитывать плазмонаполненный диод с временем нарастания тока 100–150 нс без использования промежуточных накопительных линий, заполненных жидким диэлектриком. За счет совмещения функций диода и прерывателя тока решается проблема согласования сопротивления диода с малым волновым сопротивлением трансформатора (как правило, менее 10 Ом), а также реализуется режим увеличения выходного напряжения и мощности. В результате достигается существенное упрощение конструкции, снижение габаритов и стоимости электронного ускорителя. Данный подход апробирован в работе [9]. Плазмонаполненный диод с единичным плазменным каналом диаметром около 1 см обеспечивал протекание тока в низкоомной фазе 100 кА с временем нарастания 150 нс, генерацию электронного пучка с энергией 1 МэВ и пиковой мощностью 100 ГВт. Удельная мощность выделения энергии на аноде составила более 10 ГВт/см². За счет использования плазмонаполненного диода выходное напряжение и мощность питающего линейного импульсного трансформатора увеличились в 2.5 раза в сравнении с режимом разряда на согласованную нагрузку. Параметры электронного пучка диода приведены в работе [10].

Технология построения линейных импульсных трансформаторов осно-

вана на параллельном включении идентичных разрядных контуров в первичном контуре трансформаторной ступени и последовательном включении ступеней на общий вторичный виток с нагрузкой. Единичный разрядный контур представляет собой один или несколько конденсаторов, коммутируемых общим искровым разрядником. Характеристики единичного разрядного контура, именуемого в дальнейшем конденсаторным блоком, являются определяющими для характерного времени вывода энергии из емкостного накопителя. Блочная схема построения трансформатора дает возможность проводить масштабирование по току и индуктивности промежуточного накопителя, сохраняя характерное время ввода тока в индуктивность. При этом очевидно, что мощность электронного источника будет определяться параметрами плазмонаполненного диода.

В настоящей работе исследуется возможность масштабирования по мощности электронного источника на основе плазмонаполненного диода при изменении параметров питающего контура. Исследования выполнены при идентичных условиях в плазмонаполненном диоде: конструкция диода и параметры предварительно создаваемой плазмы в диоде не изменялись.

Анализ электрической схемы источника

В первом приближении контур питающего генератора можно представить в виде последовательно включенной емкости C , заряженной до напряжения U_0 , и индуктивности L . В низкоомной фазе плазмонаполненного диода индуктивность L заряжается током I_0 , определяемым зарядным напряжением и волновым сопротивлением контура. В последующей высокоомной фазе при высокой скорости нарастания сопротивления диода реактивным сопротивлением емкости можно пренебречь и схема замещения трансформатора будет состоять из последовательно включенной индуктивности L и сопротивления диода $R(t)$. Ток в контуре определяется уравнением

$$I(t) = I_0 \exp\left(\int_0^t \frac{R(t)}{L} dt\right).$$

Для линейно нарастающего сопротивления $R(t) = kt$ напряжение на диоде достигает амплитудного значения:

$$U_d = I_0 \sqrt{\frac{kL}{e}} = \sqrt{W_0} \sqrt{2k/e}, \quad (1)$$

где $W_0 = LI_0^2/2$ – запасенная в индуктивности L энергия, k – скорость нарастания сопротивления. Фронт импульса напряжения $t_u = \sqrt{L/k}$. Выра-

Увеличение мощности плазмонаполненного диода за счет тока

Возможный подход к наращиванию мощности диода связан с увеличением тока. Для реализации данного подхода необходимо, с одной стороны, увеличить ток в питающем контуре, а с другой – создать условия для протекания этого тока через плазменный канал заданного диаметра в низкоомной фазе и сохранения скорости нарастания сопротивления диода в высокоомной фазе.

В исследованиях распространения ионного потока от плазменной пушки зарегистрировано распространение двух групп ионов [13]. Ионы второй группы соответствуют гидродинамическому расширению плазмы со скоростью порядка 1 см/мкс, определяемой температурой плазмы (единицы – эВ). Помимо этого, регистрируется поток ионов со скоростями, на порядок превышающими тепловую скорость ионов плазмы. Данный поток также способен обеспечить компенсацию заряда электронов в диоде. Исследования режимов работы диода показали, что для реализации высокой скорости нарастания сопротивления диода, генерации импульса напряжения и электронного пучка благоприятна ситуация, при которой ионы второй группы не успевают распространиться на весь диодный промежуток. Это соответствует времени задержки пуска трансформатора относительно начала протекания тока в пушке – менее 2 мкс. Ток диода в низкоомной фазе при фиксированном времени задержки можно увеличивать за счет тока в пушке. Однако такой подход имеет ограничение. В условиях наших экспериментов рост амплитуды тока низкоомной фазы диода прекращался при токе в пушке свыше 7 кА. Дальнейшее увеличение тока возможно за счет применения в пушке нескольких капилляров. Но в этом случае усложняется конструкция пушки и увеличивается энергоёмкость генератора плазмы.

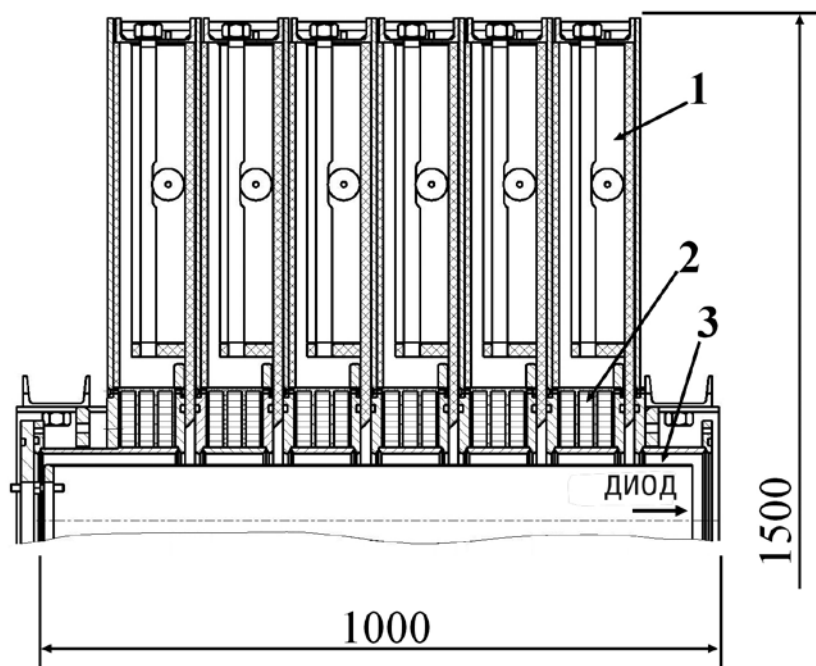


Рис. 2. Конструкция линейного импульсного трансформатора без нагрузки (вид сверху): 1 – конденсаторный блок; 2 – сердечники ступени; 3 – вакуумная коаксиальная линия.



Рис. 3. Фотография линейного импульсного трансформатора без нагрузки.

Согласно широко используемой модели [14] предельный ток в плазмонаполненном диоде определяется ионным током насыщения в соответствии с биполярным соотношением и, следовательно, параметрами плазмы. С другой стороны, результаты численного моделирования [15, 16] показывают, что состояние диода в низкоомной фазе может существенным образом отличаться от равновесного состояния опре-

достигает амплитудного значения 1.1 МВ за 25 нс. Пиковая мощность диода 150 ГВт реализуется за 20 нс. Длительность фронта импульса напряжения меньше времени нарастания сопротивления. Следовательно, амплитуды импульсов напряжения и мощности не ограничены амплитудой сопротивления диода и определяются скоростью нарастания сопротивления в соответствии с соотношениями (1) и (2).

Результаты экспериментов обобщены в виде зависимостей напряжения на диоде U_d от запасаемой энергии W_0 (рис. 6) и мощности диода P_d от отношения запасаемой энергии к индуктивности контура $W_0/L^{1/2}$ (рис. 7). Данные соответствуют изменению запасаемой энергии в индуктивности контура от 0.2 до 3.6 кДж при переходе от режима 1 к режиму 6. На рисунках также приведены графики функций (1) и (2) (пунктирные линии). Графики достаточно хорошо аппроксимируют экспериментальные данные. Для режимов 3–5 скорость нарастания сопротивления составляет около 0.5 Ом/нс, время нарастания сопротивления 30 нс. Для режимов 1, 2 и 6 наблюдается некоторое уменьшение как времени нарастания сопротивления до 20 нс, так и скорости роста сопротивления. Ухудшение переходной характеристики сопротивления для этих режимов, вероятно, вызвано быстрым снижением тока диода в высокоомной фазе вследствие низкой индуктивности контура.

Полученные данные свидетельствуют о возможности увеличения тока в диоде почти в 4 раза за счет увеличения скорости нарастания тока без изменения параметров плазменного канала. При этом скорость нарастания сопротивления можно сохранить на уровне 0.5 Ом/нс при сохранении индуктивности контура выше 200 нГн. Увеличение запасаемой в индуктивности энергии от 0.2 до 3.6 кДж дало прирост мощности от 7 до 170 ГВт.

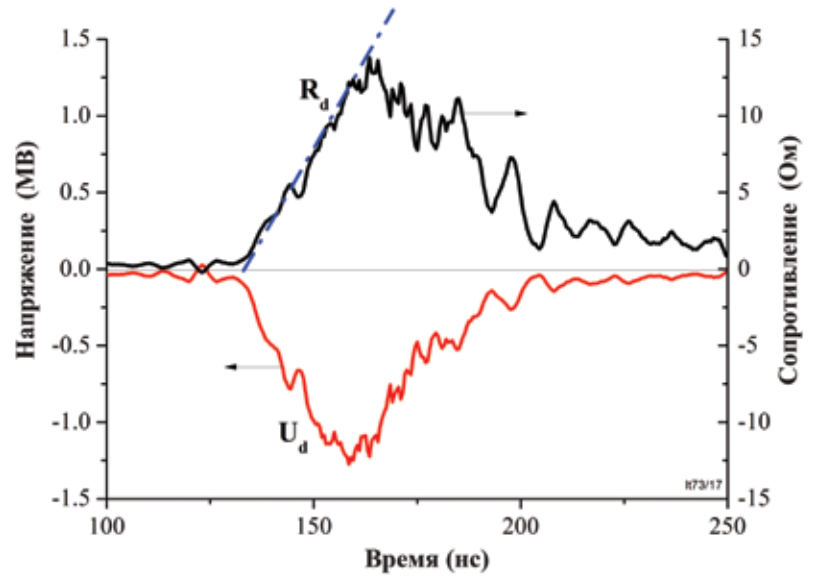


Рис. 5. Напряжение U_d и сопротивление диода R_d для режима разряда 5.

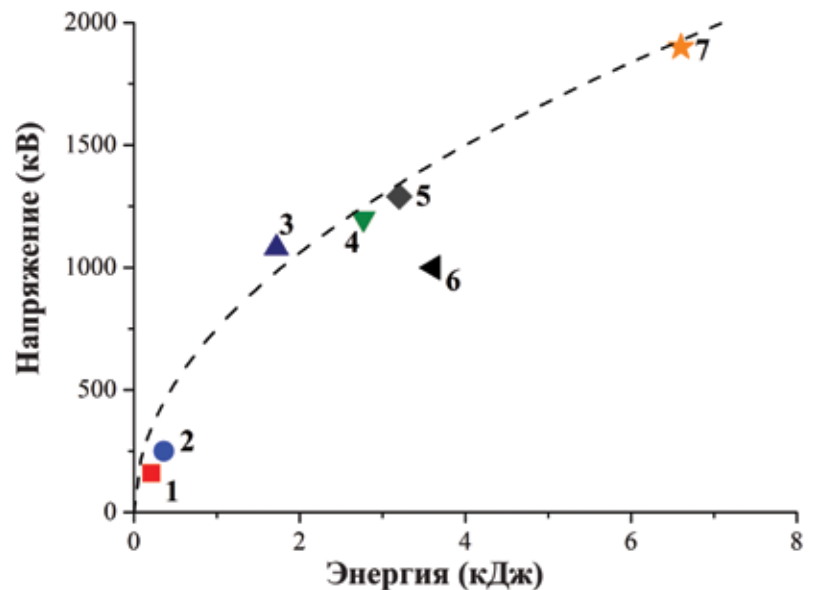


Рис. 6. Экспериментальные значения напряжения на диоде U_d в зависимости от запасаемой энергии W_0 . Пунктирной линией показана расчетная кривая $U_d = \text{const} \times W_0^{1/2}$.

Увеличение мощности плазмонаполненного диода за счет напряжения

Цель дальнейших исследований – увеличение мощности плазмонаполненного диода за счет увеличения генерируемого напряжения при сохранении тока на уровне более 150 кА. Увеличение напряжения для достигнутой скорости нарастания сопротивления диода 0.5 Ом/нс реализуется за счет замедления спада тока в высокоомной фазе путем увеличения

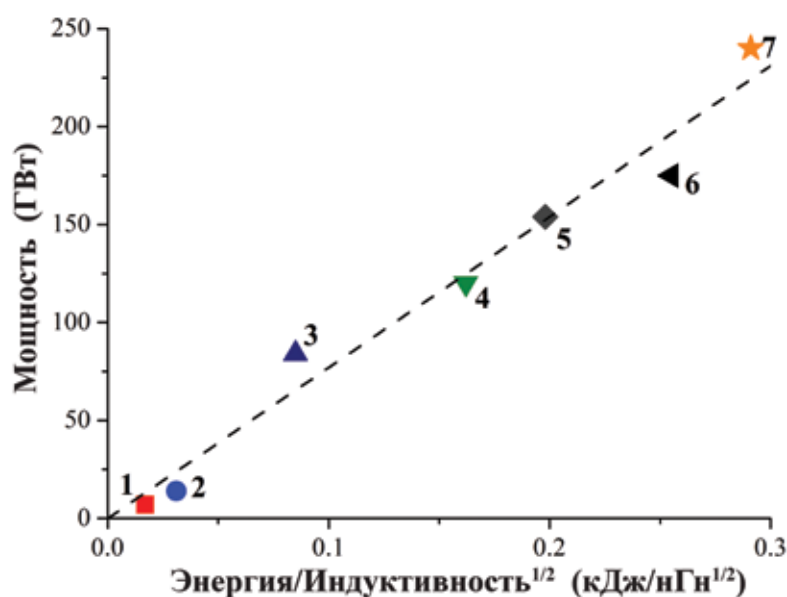


Рис. 7. Экспериментальные значения мощности диода P_d в зависимости от отношения запасаемой энергии к индуктивности контура $W/L^{0.5}$. Пунктирной линией показана расчетная кривая $P_d = \text{const} \times W/L^{1/2}$.

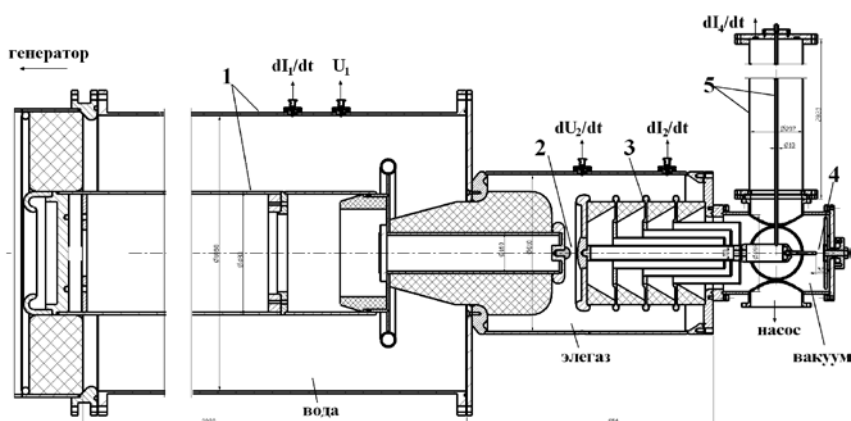


Рис. 8. Конструкция электронного источника (без генератора Аркадьева–Маркса).

индуктивности контура более 500 нГн. При этом уровень запасаемой в индуктивности энергии превышает 6 кДж.

Конструкция источника

Для ввода тока 150 кА за время 100 нс в индуктивность 500 нГн необходим линейный импульсный трансформатор с уровнем выходного напряжения мегавольтного диапазона. Мы не располагаем линейным трансформатором с необходимыми параметрами. Поэтому с целью моделирования работы трансформатора использовали разряд коаксиальной линии с водяным заполнением. Волновое сопротивление линии 5.3 Ом, электрическая длина 56 нс. Линия заряжается от 33-каскадного высоковольт-

ного генератора Аркадьева–Маркса. Параметры генератора: емкость в ударе $C_i = 12$ нФ, индуктивность $L_i = 12$ мкГн. При зарядном напряжении 50 кВ выходное напряжение 1650 кВ, запасаемая энергия 16.3 кДж.

Узел накопительной линии и нагрузки представлен на рисунке 8. Линия с водяным заполнением 1 собрана в баке длиной 2020 мм и диаметром 1068 мм. Диаметр центрального проводника 480 мм. Линия коммутируется неуправляемым разрядником высокого давления 2, расположенным в камере диаметром 610 мм и длиной 910 мм. Камера заполнена элегазом с рабочим давлением до 8 атм. За газонаполненной камерой через проходной изолятор 3 включена вакуумная камера, в которой расположен плазмонаполненный диод 4.

Проходной изолятор элегаз-вакуум 3 выполнен секционированным из четырех полиэтиленовых колец, разделенных градиентными кольцами, к которым крепятся цилиндрические экраны из нержавеющей стали. Конструкция экранов обеспечивает емкостное распределение напряжения вдоль изолятора, близкое к равномерному, предотвращает попадание электронов на поверхность диэлектрика за счет их замагничивания и вывода в область за изолятором [18].

Конструкция плазмонаполненного диода 4 аналогична используемой на линейном импульсном трансформаторе. В линейном трансформаторе нет проблемы подвода энергии к источнику плазмы на потенциальном электроде, поскольку один конец центрального проводника вакуумного коаксиала находится под нулевым потенциалом. В генераторе с промежуточным емкостным накопителем вопрос подвода энергии к источнику плазмы решен за счет включения параллельно диоду короткозамкнутой вакуумной коаксиальной линии 5 длиной 3 м с диаметрами внешнего и внутреннего проводников 207 и 10 мм соответственно. Питающий кабель размещается внутри цен-

трального проводника линии. Волновое сопротивление и длину линии стремились выполнить предельно большими с целью уменьшить влияние линии на плазмонаполненный диод. Линию 5 также использовали для дублирующей методики определения напряжения на диоде.

Влияние короткозамкнутой линии в низкоомной фазе диода проявляется в уменьшении тока диода за счет отвода части тока генератора. Для параметров нашего контура ток в линии составляет около 5% от полного тока в вакуумной камере. Влияние линии в высокоомной фазе проявляется в увеличении скорости спада тока в диоде. Для оценки влияния воспользуемся упрощенной схемой (рис. 9). Здесь мы пренебрегаем индуктивностью между линией и диодом, а линию с волновым сопротивлением ρ представляем постоянным резистором. Последнее справедливо для времени менее двойной электрической длины линии $t < 20$ нс. Для линейно нарастающего сопротивления $R(t) = kt$ амплитуда напряжения на диоде определяется выражением (3):

$$U_m = I_0 \sqrt{kL} \left(1 + \frac{1}{x} \right)^{x^2-1}, \quad (3)$$

где $x = \rho / \sqrt{kL}$. При неограниченно большом волновом сопротивлении линии выражение (3) переходит в уравнение (1). Максимальная мощность рассеивания энергии в диоде описывается выражением (4):

$$P_m = I_0^2 \left(1 + \frac{\sqrt{1+8x^2}-1}{4x^2} \right)^{2(x^2-1)} \cdot \exp \left(-\frac{\sqrt{1+8x^2}-1}{2} \right) \cdot \frac{\rho}{4x^2} (\sqrt{1+8x^2}-1). \quad (4)$$

Сравнение выражений (3) и (4) с (1) и (2) при $L = 500$ нГн, $k = 0.5$ Ом/нс, с учетом разницы начального тока в диоде в 5%, дает, что при включении параллельно диоду короткозамкнутой линии с $\rho = 182$ Ом амплитуда напряжения снижается на 10%, а амплитуда мощности – на 18%.

Система регистрации

Расположение основных регистрационных датчиков показано на рисунке 8. В линии с водяным заполнением напряжение U_1 регистрируется емкостным делителем, а производная тока dI_1/dt – индуктивным датчиком. Из осциллограммы напряжения определяется время зарядки линии до пробоя газового разрядника 2. В газовом объеме производная напряжения на вакуумном изоляторе dU_2/dt измеряется дифференциальным датчиком напряжения, а производная полного тока в вакуумном объеме dI_2/dt – индуктивным датчиком. В вакуумном объеме измеряется производная тока dI_4/dt на короткозамкнутом конце коаксиальной вакуумной линии 5. Напряжение U_2 и токи I_2, I_4 восстанавливаются путем численного интегрирования. Вычисление характеристик диода из измеряемых сигналов выполняется в соответствии с электрической схемой замещения.

Для определения напряжения на диоде использована дублирующая методика на основе измерения волны тока в короткозамкнутой вакуумной линии 5, в которой до появления измеряемого импульса высокого напряжения создается магнитное поле за счет тока подмагничивания [19]. Подмагничивание обеспечивает выполнение условий магнитной изоляции электронов и сильное прижатие электронного слоя к катоду уже на фронте падающей волны напряжения. В результате достигается слабое изменение волнового сопротивления «горячей» линии в течение импульса. Используя результаты работы [20], можно оценить минимальный ток подмагничивания, при котором отсутствуют утечки тока на фронте волны напряжения. Для нашей линии с соотношением диаметров проводников коаксиала 207/10 минимальный ток подмагничивания составляет менее 2 кА. Ток подмагничивания I_4 в короткозам-

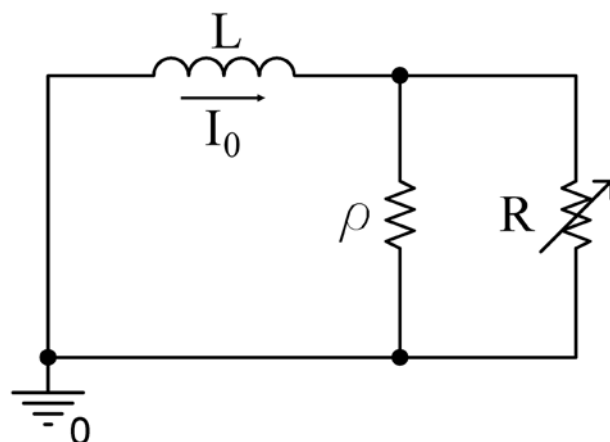


Рис. 9. Схема замещения для высокоомной стадии плазмонаполненного диода.

Проект электронного источника на основе линейного трансформатора

Достигнутые параметры плазмонаполненного диода можно использовать для проектирования компактного электронного источника мощностью более 250 ГВт на основе линейного импульсного трансформатора. Для получения электрического контура, эквивалентного реализованному на основе накопительной линии, необходимо увеличить количество последовательно включенных ступеней нашего линейного трансформатора (рис. 2) в 2 раза – с 6 до 12. Количество блоков в ступени останется прежним – 4. Суммарное количество конденсаторных блоков увеличится до 48. Эквивалентная емкость трансформатора составит 27 нФ, запасаемая энергия при зарядном напряжении 90 кВ будет равна 15.5 кДж. Полная индуктивность контура 500 нГн соответствует использованию в вакуумной линии трансформатора центрального проводника диаметром 110 мм. На рисунке 12 представлен расчетный ток линейного трансформатора с 12 ступенями при работе на короткозамкнутую нагрузку (кривая 2). Ток рассчитан из полной схемы замещения трансформатора с учетом потерь энергии на коммутацию и в сердечниках. Трансформатор обеспечивает ввод тока свыше 150 кА за время 100 нс в индуктивность 500 нГн.

На рисунке 12 также приведена экспериментальная кривая тока при разряде накопительной линии с водяным заполнением (кривая 1). Кривые тока совпадают на линейном участке. На уровне 80% от амплитудного значения ток источника на основе линейного трансформатора превышает ток накопительной линии в 1.1 раза и составляет 165 кА. В силу эквивалентности контуров, скорость роста и амплитуда сопротивления диода будут не ниже полученной в эксперименте (см. выше).

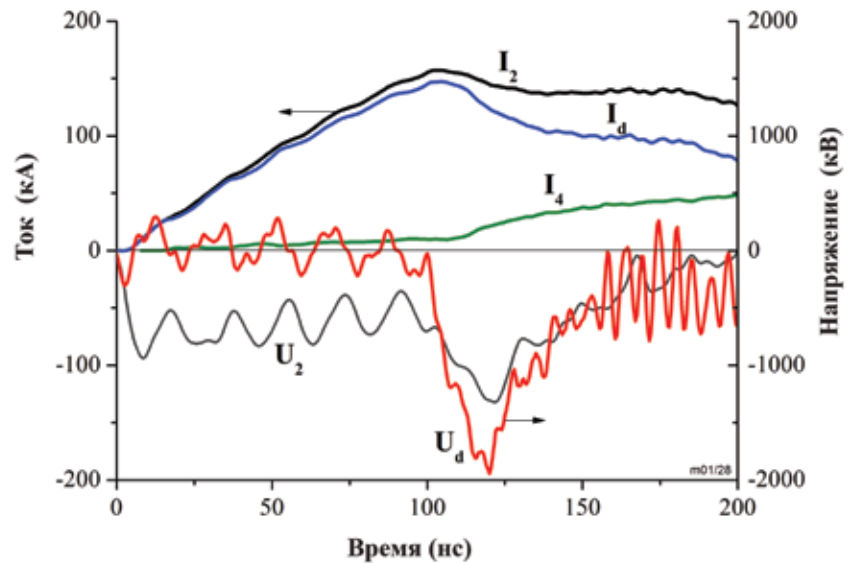


Рис. 10. Осциллограммы тока и напряжения при работе на плазмонаполненном диоде: полный ток в вакуумной камере I_2 , ток в короткозамкнутой линии I_d , ток в диоде I_4 , напряжения на вакуумном проходном изоляторе U_2 и в диоде U_d .

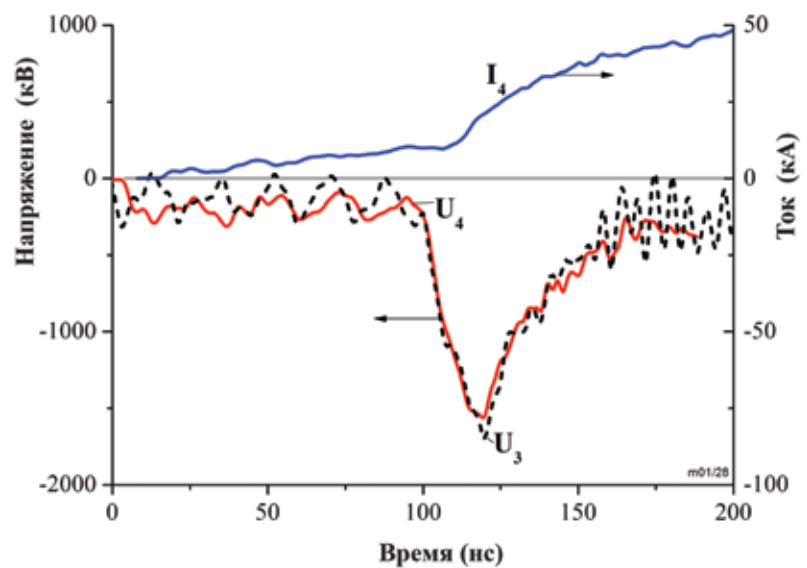


Рис. 11. Напряжение на входе линии U_4 (сплошная линия), рассчитанное из тока на короткозамкнутом конце I_d , U_3 – напряжение в точке подключения линии (пунктирная линия).

Расчет схемы замещения трансформатора с использованием экспериментально полученной характеристики $R(t)$ дает следующие параметры импульса на диоде: 165 кА, 1.7 МВ, 250 ГВт. Таким образом, увеличение количества конденсаторных блоков в 2 раза приводит к увеличению напряжения и мощности в диоде в 1.5 раза.

Анализ соотношений (1) и (2) показывает, что с точки зрения увеличения мощности оптимально сохранять волновое сопротивление линейного трансформатора при увеличении числа конденсаторных блоков. Двукратное увеличение количества блоков, с 24 до 48,

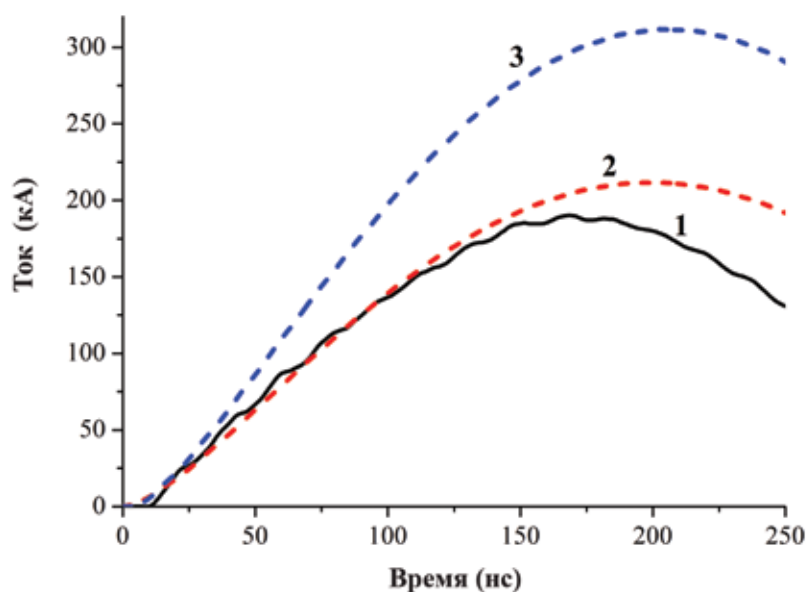


Рис. 12. Токи в короткозамкнутой нагрузке; 1 – экспериментальный ток разряда линии с водяным заполнением; 2 – расчетный ток разряда трансформатора с 12 ступенями, содержащих по четыре конденсаторных блока; 3 – расчетный ток разряда трансформатора с 8 ступенями, содержащих по шесть конденсаторных блоков.

соответствует случаю увеличения количества блоков в ступени с 4 до 6, а ступеней – с 6 до 8. Эквивалентная емкость первичного накопителя трансформатора составит 60 нФ, полная индуктивность контура – 240 нГн. Расчетный ток в короткозамкнутой нагрузке такого трансформатора показан на рисунке 12 (кривая 3). Значение тока на уровне 80% от амплитудного значения 240 кА достигается за 125 нс. Если в этом случае удастся сохранить скорость роста и амплитуду сопротивления диода на достигнутом уровне, то реализуются следующие параметры импульса: 240 кА, 1.75 МВ, 320 ГВт. Таким образом, увеличение количества конденсаторных блоков в 2 раза приводит к увеличению мощности диода также в 2 раза. Отношение напряжения на диоде к выходному напряжению трансформатора сохранится на уровне более 2.

Заключение

Получено продвижение по шкале тока до 180 кА, напряжения до 1.9 МВ и мощности до 250 ГВт ис-

точника, сфокусированного электронного пучка на основе плазменно-наполненного диода.

Продemonстрирована возможность увеличения тока в диоде за счет увеличения скорости его нарастания. Увеличение скорости нарастания тока почти в 5 раз (от 0.4 до 1.9 кА/нс) позволило поднять как амплитуду тока в низкоомной фазе диода от 50 до 180 кА, так и прошедший в диоде заряд от 4.5 до 10 мКл при длительности фазы 120–140 нс. При увеличении тока в диоде в более чем в 3.5 раза и запасаемой в индуктивности энергии от 0.2 до 3.6 кДж реализовано сохранение скорости нарастания сопротивления диода в высокоомной фазе на уровне 0.5 Ом/нс, что позволило увеличить мощность диода от 7 до 170 ГВт. Амплитуда генерируемого напряжения на диоде составила около 1 МВ.

Достигнута мощность плазменно-наполненного диода 250 ГВт при увеличении запасаемой в индуктивности энергии до 7 кДж. Для питания диода выполнен генератор на основе промежуточного емкостного накопителя в виде коаксиальной линии с водяным заполнением (5.3 Ом, 56 нс, 1.5 МВ) с зарядкой от 33-ступенчатого генератора Аркадьева–Маркса. Разряд линии обеспечивает ввод тока 160 кА в индуктивность 550 нГн за 120 нс. Реализовано напряжение на диоде до 1.9 МВ при токе 150 кА. Скорость нарастания сопротивления диода составила более 0.5 Ом/нс.

Сохранение скорости нарастания сопротивления при увеличении запасаемой в индуктивности энергии до 7 кДж позволяет проводить дальнейшее масштабирование электронного источника на основе плазменно-наполненного диода.

Литература

1. T.J. Goldsack, T.F. Bryant, P.F. Beech, S.G. Clough, G.M. Cooper, R. Davitt, R.D. Edwards, N. Kenna, J. McLean, A.G. Pearce, M.J. Phillips, K.P. Pullinger, D.J. Short, M.A. Sinclair, K.J. Thomas, J.R. Threadgold, M.C. Williamson, K. Krushelnick
IEEE Trans. Plasma Science, 2002, **30**(1), 239. DOI: 10.1109/TPS.2002.1003866.
2. B.E. Фортос
УФН, 2009, **179**, 653. DOI: 10.3367/UFNr.0179.200906h.0653.
3. B.V. Weber, J.P. Apruzese, D. Mosher, D.G. Phipps, J.W. Schumer, S.J. Stephanakis
Proc. 19th IEEE Pulsed Power Conf., San Francisco, USA, 16–21 June 2013. DOI: 10.1109/PLASMA.2013.6633310.
4. J.E. Maenchen, S. Cordova, F. Criffin, K. Hahn, D. Jaramillo, I. Molina, S. Portillo, E. Puetz, D. Ronag, M. Scieford, V. Bailey, B. Oliver, D. Rose, D. Welch, G. Cooperstein, R. Commisso, D. Hinshelwood, D. Barker, D. Droemer, R. Gignac, F. Wilkins, B. Shelton, J. O'Malley, I. Crotch, K. Thomas, J. Threadgold, G. Cooper, M. Sinclair
13th Int. Symp. on High Current Electronics, Tomsk, Russia, 25–30 July 2004, p. 27.
5. B.V. Weber, D.D. Hinshelwood, D.P. Murphy, S.J. Stephanakis, V. Harper-Slaboszewicz
IEEE Trans. Plasma Science, 2004, **32**, 1998. DOI: 10.1109/TPS.2004.835945.
6. B.V. Weber, R.J. Allen, R.J. Commisso, G. Cooperstein, D.D. Hinshelwood, D. Mosher, D.P. Murphy, P.F. Ottinger, D.G. Phipps, J.W. Schumer, S.J. Stephanakis, S.B. Swanekamp, S.C. Pope, J.R. Threadgold, L.A. Biddle, S.G. Clough, A. Jones, M.A. Sinclair, D. Swatton, T. Carden, B.V. Oliver
IEEE Trans. Plasma Science, 2008, **36**, 443. DOI: 10.1109/TPS.2008.918953.
7. A.N. Batrikov, V.A. Vizir, S.N. Volkov, V.G. Durakov, A.M. Efremov, V.B. Zorin, A.A. Kim, B.M. Kovalchuk, E.V. Kumpyak, S.V. Loginov, V.A. Sinebryukhov, N.V. Tsou, V.V. Chervyakov, V.P. Yakovlev, G.A. Mesyats
Laser Part. Beams, 2003, **21**, 295. DOI: 10.1017/S0263034603212209.
8. B.M. Kovalchuk, A.V. Kharlov, A.A. Zherlitsyn, E.V. Kumpjak, N.V. Tsou, V.A. Vizir, G.V. Smorudov
Laser Part. Beams, 2009, **27**, 371. DOI: 10.1017/S0263034609000482.
9. B.M. Kovalchuk, A.A. Zherlitsyn, N.N. Pedin
Laser Part. Beams, 2010, **28**, 547. DOI: 10.1017/S0263034610000601.
10. A.A. Жерлицын, Б.М. Ковальчук, Н.Н. Педин
Журнал технической физики, 2014, **84**, вып. 4, 132.
11. A.A. Zherlitsyn, B.M. Kovalchuk, G.V. Smorudov, N.V. Tsou, V.A. Vizir, V.B. Zorin
Proc. 15th Int. Symp. High Current Electronics, Tomsk, Russia, 21–26 September 2008, p. 296.
12. A.A. Жерлицын, Б.М. Ковальчук, Г.В. Смородов
Приборы и техника эксперимента, 2009, № 6, 45.
13. А. Жерлицын, Б.М. Ковальчук, Н.Н. Педин
Приборы и техника эксперимента, 2014, № 4, 83. DOI: 10.7868/S0032816214040120.
14. P.A. Miller, J.W. Poukey, T.P. Wright
Phys. Rev. Lett., 1975, **35**, 940. DOI: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.35.940.
15. R.J. Kares
J. Appl. Phys., 1992, **71**, 2155. DOI: 10.1063/1.351139.
16. S.B. Swanekamp, S.J. Stephanakis, J.M. Grossmann, B.V. Weber, J.C. Kellogg, P.F. Ottinger, G. Cooperstein
J. Appl. Phys., 1993, **74**, 2274. DOI: 10.1063/1.354711.
17. А.А. Жерлицын, Б.М. Ковальчук, Н.Н. Педин
Изв. вузов. Физика, 2014, **57**, № 12/2, 171.
18. С.Н. Волков, А.А. Жерлицын, Б.М. Ковальчук, С.В. Логинов, И.В. Пегель
Приборы и техника эксперимента, 2003, **46**(5), 85.
19. S.Ya. Belomytsev, A.A. Grishkov, B.M. Kovalchuk, N.N. Pedin, A.A. Zherlitsyn
Rev. Sci. Instrum., 2011, **82**, 104702. DOI: 10.1063/1.3646470.
20. С.Я. Беломытцев, А.А. Гришков, А.А. Жерлицын
Журнал технической физики, 2012, **82**(11), 64.

English

Source of the Focused High-Current Relativistic E-beam Based on a Plasma-filled Diode*

Anatoly M. Efremov –
Institute of High Current Electronics, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences
2/3, Akademicheskoy Avenue,
Tomsk, 634055, Russia
e-mail: efremov@oit.hcei.tsc.ru

Andrei A. Zherlitsyn –
Institute of High Current Electronics, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences
2/3, Akademicheskoy Avenue,
Tomsk, 634055, Russia
e-mail: andzh@oit.hcei.tsc.ru

Boris M. Kovalchuk –
Institute of High Current Electronics,
Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences
2/3, Akademicheskoy Avenue,
Tomsk, 634055, Russia
e-mail: andzh@oit.hcei.tsc.ru

Nikolay N. Pedin –
Institute of High Current Electronics,
Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences
2/3, Akademicheskoy Avenue,
Tomsk, 634055, Russia
e-mail: pnnikolay86@gmail.com

Anatoly V. Kharlov –
Institute of High Current Electronics,
Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences
2/3, Akademicheskoy Avenue,
Tomsk, 634055, Russia
e-mail: akharlov@lef.hcei.tsc.ru

* The work was financially supported by RFBR (project N 13-08-00109-a).

Abstract

A plasma-filled diode can combine functions of an electron source and a current interrupter; the mode with an increased output voltage and power can also be realized. In this case, the power of a plasma-filled diode is determined by the driving circuit parameters and the transition diode resistance. The power rise problem can be solved by increasing the stored energy in the circuit inductance provided that the diode resistance rise rate is constant.

An option has been investigated to get an increase of the stored energy. Experiments with the stored energy up to 3.5 kJ were carried out using a linear transformer driver (53 nF, 480 kV). Experiments with stored energy up to 7 kJ were carried out using the Marx generator with a coaxial water line (5.3 Ω , 56 ns, and 1.5 MV).

Maintaining the diode resistance rise rate at level of 0.5 Ω /ns we demonstrated the stored energy increase from 0.2 to 7 kJ. Hence, the diode voltage amplitude increased from 0.2 to 1.9 MV, while the diode power increased from 7 to 250 GW.

Results from the experiments allow us to upscale the power of an electron source based on the plasma-filled diode.

Keywords: electron accelerators, plasma-filled diode, high-current relativistic e-beam.

References

1. T.J. Goldsack, T.F. Bryant, P.F. Beech, S.G. Clough, G.M. Cooper, R. Davitt, R.D. Edwards, N. Kenna, J. McLean, A.G. Pearce, M.J. Phillips, K.P. Pullinger, D.J. Short, M.A. Sinclair, K.J. Thomas, J.R. Threadgold, M.C. Williamson, K. Krushelnick
IEEE Trans. Plasma Science, 2002, **30**(1), 239. DOI: 10.1109/TPS.2002.1003866.
2. V.E. Fortov
Phys. Usp., 2009, **52**, 615. DOI: 10.3367/UFNe.0179.200906h.0653.
3. B.V. Weber, J.P. Apruzese, D. Mosher, D.G. Phipps, J.W. Schumer, S.J. Stephanakis
Proc. 19th IEEE Pulsed Power Conf., San Francisco, USA, 16–21 June 2013. DOI: 10.1109/PLASMA.2013.6633310.
4. J.E. Maenchen, S. Cordova, F. Criffin, K. Hahn, D. Jaramillo, I. Molina, S. Portillo, E. Puetz, D. Ronag, M. Scieford, V. Bailey, B. Oliver, D. Rose, D. Welch, G. Cooperstein, R. Commisso, D. Hinshelwood, D. Barker, D. Droemer, R. Gignac, F. Wilkins, B. Shelton, J. O'Malley, I. Crotch, K. Thomas, J. Threadgold, G. Cooper, M. Sinclair
13th Int. Symp. on High Current Electronics, Tomsk, Russia, 25–30 July 2004, p. 27.
5. B.V. Weber, D.D. Hinshelwood, D.P. Murphy, S.J. Stephanakis, V. Harper-Slaboszewicz
IEEE Trans. Plasma Science, 2004, **32**, 1998. DOI: 10.1109/TPS.2004.835945.
6. B.V. Weber, R.J. Allen, R.J. Commisso, G. Cooperstein, D.D. Hinshelwood, D. Mosher, D.P. Murphy, P.F. Ottinger, D.G. Phipps, J.W. Schumer, S.J. Stephanakis, S.B. Swanekamp, S.C. Pope, J.R. Threadgold, L.A. Biddle, S.G. Clough, A. Jones, M.A. Sinclair, D. Swatton, T. Carden, B.V. Oliver
IEEE Trans. Plasma Science, 2008, **36**, 443. DOI: 10.1109/TPS.2008.918953.
7. A.N. Bostrikov, V.A. Vizir, S.N. Volkov, V.G. Durakov, A.M. Efremov, V.B. Zorin, A.A. Kim, B.M. Kovalchuk, E.V. Kumpyak, S.V. Loginov, V.A. Sinebryukhov, N.V. Tsou, V.V. Chervyakov, V.P. Yakovlev, G.A. Mesyats
Laser Part. Beams, 2003, **21**, 295. DOI: 10.1017/S0263034603212209.
8. B.M. Kovalchuk, A.V. Kharlov, A.A. Zherlitsyn, E.V. Kumpjak, N.V. Tsou, V.A. Vizir, G.V. Smorudov
Laser Part. Beams, 2009, **27**, 371. DOI: 10.1017/S0263034609000482.
9. B.M. Kovalchuk, A.A. Zherlitsyn, N.N. Pedin
Laser Part. Beams, 2010, **28**, 547. DOI: 10.1017/S0263034610000601.
10. A.A. Zherlitsyn, B.M. Kovalchuk, N.N. Pedin
Tech. Physics, 2014, **59**, 600. DOI: 0.1134/S1063784214040276.
11. A.A. Zherlitsyn, B.M. Kovalchuk, G.V. Smorudov, N.V. Tsou, V.A. Vizir, V.B. Zorin
Proc. 15th Int. Symp. High Current Electronics, Tomsk, Russia, 21–26 September 2008, p. 296.
12. A.A. Zherlitsyn, B.M. Kovalchuk, G.V. Smorudov
Instrum. Exp. Techniq., 2009, **52**, 802. DOI: 10.1134/S0020441209060098.
13. A.A. Zherlitsyn, B.M. Kovalchuk, N.N. Pedin
Instrum. Exp. Techniq., 2014, **57**, 453. DOI: 10.1134/S0020441214040101.
14. P.A. Miller, J.W. Poukey, T.P. Wright
Phys. Rev. Lett., 1975, **35**, 940. DOI: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.35.940.
15. R.J. Kares
J. Appl. Phys., 1992, **71**, 2155. DOI: 10.1063/1.351139.
16. S.B. Swanekamp, S.J. Stephanakis, J.M. Grossmann, B.V. Weber, J.C. Kellogg, P.F. Ottinger, G. Cooperstein
J. Appl. Phys., 1993, **74**, 2274. DOI: 10.1063/1.354711.
17. A.A. Zherlitsyn, B.M. Kovalchuk, N.N. Pedin
Izvestia Vuzov. Physica [Russ. Phys. J.], 2014, **57**, N 12/2, 171 (in Russian).
18. S.N. Volkov, A.A. Zherlitsyn, B.M. Kovalchuk, S.V. Loginov, I.V. Pegel
Instrum. Exp. Techniq., 2003, **46**, 656. DOI: 10.1023/A:1026041705575.
19. S.Ya. Belomyttsev, A.A. Grishkov, B.M. Kovalchuk, N.N. Pedin, A.A. Zherlitsyn
Rev. Sci. Instrum., 2011, **82**, 104702. DOI: 10.1063/1.3646470.
20. S.Ya. Belomyttsev, A.A. Grishkov, A.A. Zherlitsyn
Tech. Physics, 2012, **57**, 1529. DOI: 10.1134/S1063784212110060.

Исследование возможностей снижения фрикционного взаимодействия в паре «конек–лед» путем модификации структуры обеих контактирующих поверхностей*

Г.Ю. Гончарова, И.Г. Никифорова, Т.Г. Устюгова, Н.Д. Разомасов

В статье впервые предложен комплексный подход к решению задачи снижения силы сопротивления скольжению лезвия по льду: со стороны ледовой поверхности и со стороны скользящей поверхности твердого тела. Эта проблема актуальна для ледовых видов спорта, а также для широкого круга задач, в частности стратегических задач в зоне крайнего севера.

Разработанная технология создания модифицированного ледового массива обеспечивает его наилучшие скользящие и прочностные свойства в результате молекулярной перестройки структуры льда при введении в заливаемую воду микродоз высокомолекулярных соединений. Визуализация ледовых структур при помощи растрового криоэлектронного микроскопа подтвердила наличие искусственной регулярной структуры в модифицированном слое и преимущественную дислокацию введенных соединений в межкристаллическом пространстве и поверхностном слое. Впервые экспериментально подтверждено влияние физико-механических свойств модификаторов на процессы тепломассопереноса в теле льда. Обнаружена способность крупных макромолекул фторсодержащих суспензий агломерировать содержащиеся примеси, обуславливающая дополнительную «молекулярную» очистку воды. Определено начальное распределение модификаторов в массиве льда и действие концентрационной и термической составляющих массопереноса на последующее их перераспределение.

Рассмотрены возможности существенного снижения силы трения в результате дополнительной обработки скользящей поверхности конька или полоза спортивного снаряда. Это воздействие минимизирует как деформационную, так и молекулярную составляющую трения за счет полировки поверхности и создания структуры «двойной шероховатости». Показано, что дополнительная лазерная обработка способствует гидрофобизации поверхности скольжения и уменьшению сил молекулярного взаимодействия на образованной поверхности контакта. В заключение предложены направления дальнейших исследований по определению оптимального сочетания обработки поверхностей скольжения и структуры поверхностного слоя льда.

Ключевые слова: кристаллическая структура льда, «двойная шероховатость», тепломассоперенос, следовые концентрации, высокомолекулярные соединения.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-01126).

В последние годы большинство ведущих спортивных держав активно используют достижения фундаментальных и инженерных наук в спортивной индустрии. Однако до настоящего времени задача минимизации сопротивления скольжению конька решалась без сопряжения параметров обоих тел в зоне контакта. Авторы настоящей статьи с начала 2000-х гг. проводили исследования [1], направленные на изменение структуры и физико-химических свойств спортивного льда. Была разработана и внедрена

в практику технология, основанная на введении в воду для заливки микродоз высокомолекулярных соединений, локализующихся при кристаллизации в межкристаллическом пространстве и на поверхности образующегося льда (рис. 1). Обладая меньшим поверхностным натяжением и высокой растекаемостью, они существенно снижают силу сопротивления



ГОНЧАРОВА
Галина Юрьевна
Профессор,
ООО «ГП Холодильно-инженерный центр»



УСТЮГОВА
Татьяна Геннадьевна
ООО «ГП Холодильно-инженерный центр»



НИКИФОРОВА
Ирина Геннадьевна
ООО «ГП Холодильно-инженерный центр»



РАЗОМАСОВ
Николай Дмитриевич
ООО «ГП Холодильно-инженерный центр»

слоев льда. Однако в процессе эксплуатации лед многократно подрезается и заливается чистой горячей водой, что приводит к обеднению верхнего слоя и перераспределению введенных соединений по глубине массива вследствие тепломассопереноса.

На первом этапе работы проводили исследования первоначальной эпюры распределения концентрации вносимых ингредиентов $\xi_{\text{нач}}$ по глубине δ ледового массива $\xi_{\text{нач}} = f(\delta)$. Далее изучали закономерности перераспределения модификаторов ξ^* в условиях эксплуатации: при периодических подрезках льда и заливках горячей водой без внесения модификаторов.

Первоначальное распределение и последующая миграция внесенных соединений в ледовом массиве определяется действием механизмов концентрационной и термической составляющих диффузии, а также возможным взаимодействием макромолекул различных групп соединений в используемых смесях. При послойном формировании ледового покрытия образуется поликристаллический лед с локальным проявлением эпитаксии – сохранением направления основной оси C кристаллов, расположенных в нижних слоях массива. Межкристаллическое пространство образованной структуры по геометрическим характеристикам напоминает соты и согласно предложенной нами сотово-капиллярной модели выполняет роль «транспортных путей» для миграции внесенных полимерных соединений внутри массива.

Связь процессов одновременного переноса массы, теплоты и количества движения устанавливает теорема Онзагера (теорема взаимности). Однако ее применение в модифицированном полимерами льду не представляется возможным, так как свойства смеси модифицирующих соединений (диффузанта) и конфигурации межкристаллического пространства (матричной среды) математически неформализуемы. В данном случае необходимо также учитывать механическое уда-

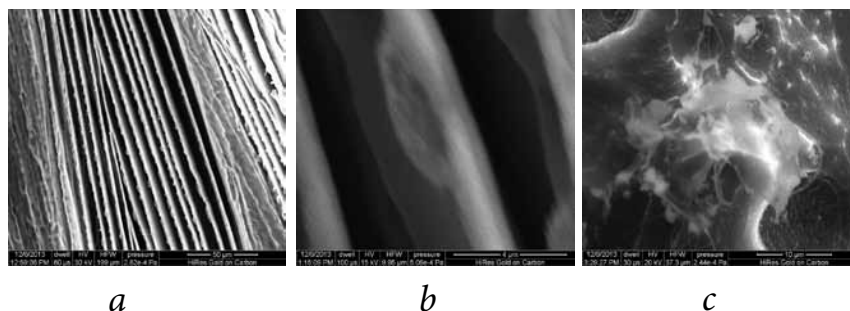


Рис. 3. Структура льда с фторсодержащей суспензией ФС (увеличение в 1500 (а) и 30000 раз (b)) и смесью в штатной концентрации (с, увеличение в 8000 раз).

ление диффузанта с поверхности льда в процессе его подрезки и трансформации «транспортных путей» при периодическом подплавлении массива. Вносимые соединения различны по химическому составу, структуре, поверхностной активности и молекулярной массе. Молекулярная масса органических масел и микроэмульсий достигает тысяч а.е.м., а масса мелкодисперсных фторсодержащих суспензий (ФС) может достигать 107 а.е.м и более. Естественно, что интенсивность их диффузии в межкристаллическом пространстве будет различна. Это не позволяет при математическом моделировании перемещения в ледовом массиве представлять их однородными частицами. Кроме того, наиболее крупные макромолекулы в результате межмолекулярных взаимодействий могут агломерировать более мелкие (рис. 3) и вместе диффундировать или закрепляться в различных слоях ледового массива. Данные элементного анализа подтверждают присутствие внесенных кремнийорганических соединений на фрагменте молекулы ФС (рис. 3с).

Обзор открытых источников показал, что решаемая задача кристаллизации и дальнейшего диффузионного массопереноса модификаторов в ледовом массиве не имеет полных аналогов в смежных областях [4, 5]. В силу изложенного приоритет в настоящем исследовании был отдан экспериментальным методам: химический состав льда по глубине массива определяли путем его механического расслоения и комплексных химических анализов послойных расплавов.

Экспериментальное исследование первоначальной эпюры распределения модификаторов

При проведении экспериментов необходимо было воспроизвести условия и алгоритм создания ледовых покрытий на спортивных объектах, так как структура и свойства льда зависят от режима его формирования. С этой целью был спроектирован и изготовлен фрагмент ледового поля (ФЛП) с автономной системой хладоснабжения и технологической плитой, по конструкции идентичной плитам реальных спортивных арен. Формирование ледового массива осуществляли имитацией шланговых

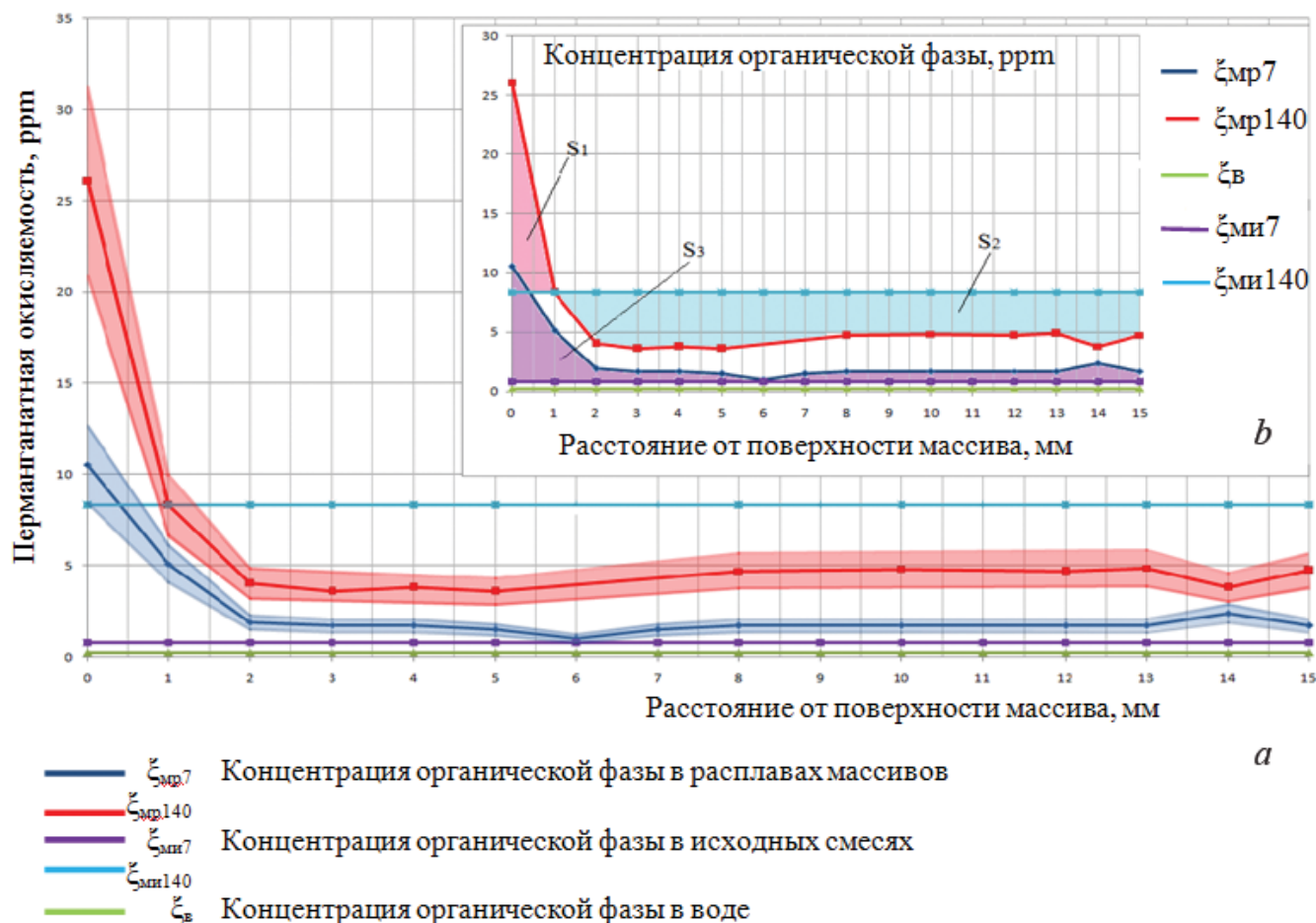


Рис. 4. Результаты химических анализов расплавов льда верхней зоны ледового массива.

заливок чистой водой до уровня 20 мм и далее с помощью миниатюрного льдозаливочного комбайна по схеме чередующихся слоев: чистый слой–слой с модификаторами. Температура заливаемой воды составляла не менее 60 °С. При разливе тонкой пленки воды с температурой 60 °С происходит подплавление нижнего слоя льда, в результате чего образуется некоторая промежуточная концентрация. На эпюру распределения внесенных модификаторов внутри единичного слоя и массива в целом влияют преимущественно два основных фактора:

- высокая поверхностная активность вносимых соединений, согласно принципу независимости поверхностного действия Ленгмюра, способствует выталкиванию неполярной части макромолекул к поверхности, повышая их концентрацию в поверхностном слое;
- при движении фронта кристаллизации сначала вымораживается чистая вода, а внесенные ингредиенты, имеющие более низкую температуру кристаллизации (или стеклования), оттесняются к поверхности.

Действие указанных факторов позволило предположить, что при послойном формировании массива

концентрация внесенных соединений будет монотонно возрастать к поверхности льда.

При последующем расслоении массивов соскобы снимали с помощью специального инструмента, позволяющего соблюдать горизонтальность снимаемого слоя и не допускать смешивания снежной массы разных слоев. В целях снижения количества сторонних соединений все работы проводили в перчатках, бетонное основание плиты закрывали химически инертной алюминиевой фольгой, а сам ФЛП закрывали верхним куполом.

Первая серия экспериментов проводилась с концентрациями модификаторов (смеси) $\xi_{\text{ми}} = 7$ и 140 ppm, соответствующими оптимальному значению для хоккея и верхней границе рекомендуемого диапазона концентраций для спортивного

льда. Результаты анализов расплавов представлены на *рисунке 4*. Содержание внесенных соединений в расплавах $\xi_{\text{мр}}$ определяли титриметрическим методом по перманганатной окисляемости как показателю, характеризующему суммарное их содержание по углероду. В пересчете на этот показатель исходная концентрация модификаторов в заливаемой воде $\xi_{\text{ми}}$ составляла 16.64 и 1.6 ppm для 140 и 7 ppm соответственно (по схеме чередующихся слоев соответственно 8.32 и 0.8 ppm).

Характер первоначального распределения модификаторов по глубине массива подтверждает высказанную ранее гипотезу: наблюдается практически неизменная концентрация во внутренних слоях льда и резкое ее увеличение к поверхности, существенно превышающее уровень вносимых концентраций. Отношение концентрации в поверхностном слое к концентрации на линейном участке в обоих экспериментах оставалось практически неизменным и в среднем составляло примерно 5 к 1: 26 к 5 ppm и 10.53 к 2 ppm для 140 и 7 ppm соответственно. Таким образом, характер первоначального распределения модификаторов сохраняется при увеличении их исходной концентрации в воде. При относительно невысоких скоростях кристаллизации большинство макромолекул успевает подняться к поверхности, что во многом объясняет вид экспериментальной эпюры. Однако во внутренних слоях льда также присутствует определенное количество органической фазы. Это с наибольшей вероятностью обусловлено размерами макромолекул ФС, достигающими 10^6 – 10^7 а.е.м. Они захватываются движущимся фронтом кристаллизации и фиксируются в образующемся слое льда, что подтверждается данными микроскопического исследования сколов (*рис. 1б*).

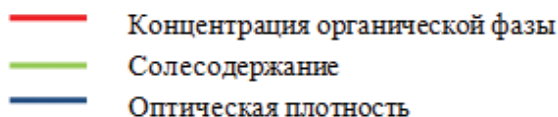
На *рисунке 4б* представлены результаты сопоставления количества искусственно вносимых органических

соединений (фиолетовая и голубая линии для исходных концентраций 7 и 140 ppm) и впоследствии обнаруженных веществ при послойном разделении массива льда (красная и синяя линии). Сравнение данных показало, что суммарное количество введенных при намораживании модификаторов либо превышает, либо ниже количеств, обнаруженных при химических анализах расплавов льда. Количественно это несоответствие характеризуется разностью площадей ($S_2 - S_1$) (ниже ожидаемого) и площадью S_3 (превышение над внесенным количеством) для исходных концентраций 140 и 7 ppm соответственно. Превышение суммарной органики в расплавах может объясняться присутствием в ледовом массиве сторонних (фоновых) органических соединений, попадающих в лед из воздушной среды, с ограждающих конструкций, рук и т.д. Более низкие значения могут быть связаны с тем, что различные группы модификаторов «связывают» активность друг друга, на них происходит физическая агрегация фоновых соединений, и показатель перманганатной окисляемости снижается. Поэтому в дальнейшем мы параллельно использовали методы спектроскопии (исследование оптической плотности) и хромато-масс-спектрометрии, которые также подтвердили характер полученных зависимостей.

В практическом аспекте агломерация и «связывание» макромолекулами ФС сторонних примесей и фоновой органики позволяет сократить количество примесных дефектов при формировании кристаллической решетки льда и существенно улучшать прочностные и скользящие свойства ледовых покрытий. Эффект дополнительной «молекулярной» очистки льда многократно отмечался на спортивных объектах, не имеющих систем водоподготовки.

Исследование процессов перераспределения модификаторов в процессе эксплуатации ледового покрытия

В процессе эксплуатации ледового массива осуществляется периодическая подрезка и заливка льда чистой горячей водой. В этом случае концентрация модификаторов в поверхностном слое снижается и зависит от интенсивности термической и концентрационной диффузии из внутренних слоев льда. В промежутках между заливками также происходит массоперенос модификаторов в межкристаллическом пространстве, но с меньшей интенсивностью. При этом термическая составляющая всегда направлена в сторону поверхности льда, заливаемого горячей водой, а концентрационная может иметь и противоположное направление – к глубинным слоям (например, при дополнительном внесении модификаторов). От соотношения этих движущих сил и



зависит динамика изменения поверхностной концентрации внесенных соединений.

На оси абсцисс (рис. 5а) отмечено время проведения заливок. После каждой заливки и затвердевания нового слоя снимали соскоб с поверхности льда и определяли химический состав расплава

Характерно, что при частых под-

резках верхнего слоя и заливках чистой водой без модификаторов происходит постепенное снижение их концентрации в поверхностном слое. При длительном ночном перерыве в результате действия концентрационной и термодиффузии органические соединения постепенно подтягиваются к поверхности льда. При этом чем более отепленным был массив к концу дня, тем с большей интенсивностью происходит их миграция к поверхности.

На рисунке 5b представлены кривые распределения модификаторов по глубине в начале и по завершении эксперимента. Общий вид зависимости не изменился, но концентрация введенных соединений снизилась и на поверхности льда, и во внутренних слоях, что подтверждает гипотезу о постепенной их миграции из глубины массива. В верхнем углу этого рисунка приведены результаты исследования содержания кремния вблизи границы раздела чистого и модифицированного массивов на уровне 20 мм от поверхности льда. Присутствие кремния в составе соскобов, снятых ниже уровня начала модификации массива, подтверждает действие концентрационной составляющей диффузии, направленной вниз, так как в этой зоне кремнийорганические соединения еще не вносились.

Таким образом, в работе экспериментально подтверждено, что модифицирующие соединения в результате действия концентрационного и термического механизмов диффузии мигрируют в ледовом массиве и в процессе эксплуатации постепенно подтягиваются из внутренних слоев массива.

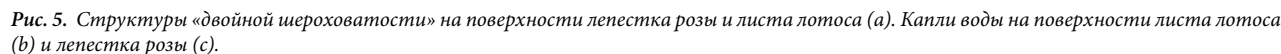
Модификация структуры скользящей поверхности конька

Как было отмечено, следующим шагом после обработки лезвия конька до 12–13 класса чистоты и максимально возможного снижения $F_{\text{деф}}$ должно быть искусственное увеличение гидрофобности поверхности

скольжения для снижения адгезионной составляющей силы трения $F_{\text{мол}}$. Современный уровень развития нанотехнологий уже позволяет структурировать материалы по принципу «сборки снизу» с определенным набором требуемых свойств. Однако часто задача осложняется тем, что заранее неизвестно, какой на наноуровне должна быть искусственно создаваемая структура, чтобы на макроуровне в наивысшей степени обладать желаемым свойством.

На этом этапе исследования самым рациональным оказалось обращение к арсеналу природных материалов, обладающих уникальными сверхгидрофобными свойствами. Действительно, вода беспрепятственно скатывается с листа лотоса, как спортсмен по ледяной трассе. Сверхгидрофобностью обладают перья птиц и кутикулы крыльев цикад [6]. Угол смачивания этих природных поверхностей достигает 162° . В конце XX в. учеными из Боннского университета Бартлоттом и Найнуйсом впервые было изучено это явление, получившее впоследствии название «эффекта лотоса». Сверхгидрофобные свойства таких поверхностей обусловлены структурой «двойной шероховатости» – шероховатостью микромасштаба, покрытой структурой шероховатости наноразмера (рис. 6a). В настоящее время эффект лотоса достаточно известен и объясняется минимальной площадью контакта капли с поверхностью листа и минимальной адгезией, позволяющей капле свободно скатываться с поверхности листа (рис. 6b). С учетом того, что угол смачивания самого гидрофобного из известных материалов – фторопласта – не превышает 112° , наиболее перспективным представлялось воспроизведение структуры «двойной шероховатости» на скользящей поверхности конька (в некоторых работах ее называют «нановорсистостью»). Однако лепесток розы также имеет структуру «двойной шероховатости», и капля воды на нем принимает близкую к сферической форму, но она не отрывается от поверхности даже под действием собственной силы тяжести на перевернутом лепестке (рис. 6c). Такое поведение капли свидетельствует о сильнейшей адгезии воды к лепестку розы на поверхности контакта [7]. Иными словами, только сверхгидрофобности и минимальной площади контакта недостаточно для снижения энергии разрыва жидкости и твердого тела. Согласно современным представлениям существенные различия свойств лепестка розы и листа лотоса обусловлены геометрическими соотношениями микро- и нанощероховатости и, как следствие, реализацией разных моделей смачивания (рис. 6a).

Таким образом, задача искусственного структурирования поверхности, максимально снижающей силу молекулярного взаимодействия конька с жидкостной пленкой в зоне контакта, должна включать



2) исследование полученных структур скользящих поверхностей, модифицированных лазерным воз-

Полученные данные должны составить основу для оптимизации параметров фрикционной пары «конек–лед», характеризующейся минимальной силой фрикционного взаимодействия между ними.

7. L. Feng, Y. Zhang, J. Xi, Y. Zhu, N. Wang, F. Xia, L. Jiang *Langmuir*, 2008, **24**, 4114. DOI: 10.1021/la703821h.

English

Investigation of Possibilities for Reduction of Frictional Engagement in the "Skate-Ice" Pair Via Modification of the Structure of Both Contacting Surfaces*

Galina Yu. Goncharova –

Professor,
GP "Refrigerating–Engineering Center"
12, Kostyakov Str.,
Moscow, 127422, Russia
e-mail: ice4sport@gmail.com

Tatiana G. Ustyugova –

GP "Refrigerating–Engineering Center"
12, Kostyakov Str.,
Moscow, 127422, Russia
e-mail: ice4sport@gmail.com

Irina G. Nikiforova –

GP "Refrigerating–Engineering Center"
12, Kostyakov Str.,
Moscow, 127422, Russia
e-mail: ice4sport@gmail.com

Nikolay D. Razomasov –

GP "Refrigerating–Engineering Center"
12, Kostyakov Str.,
Moscow, 127422, Russia
e-mail: ice4sport@gmail.com

Abstract

The article presents for the first time a comprehensive approach to solution of the problem of reducing the force of resistance to sliding of the skate blade on the ice, involving both the surface of ice and the sliding surface of the solid body. This is the issue of the day for the ice sports, and also for a wider range of applications e.g. related to implementation of strategic tasks in the Far North.

The technology developed for creating a solid mass of ice provides for its best sliding and mechanical properties thanks to a molecular restructuring of ice via introduction of a microdose of high molecular compounds into the water used for filling. Visualization of ice structures using a scanning cryoelectronic microscope confirmed the presence of an artificial regular structure in the modified layer as well as a predominant localization of compounds in the intercrystalline space and in the surface layer. It is corroborated experimentally for the first time that physical and mechanical properties of the modifiers influence the heat and mass transfer processes in the ice. The ability of large macromolecules fluorine-containing suspensions to agglomerate contained impurities is discovered, it produces an additional "molecular" purification of water. Primary distribution of modifiers in the solid mass of ice is determined as well as the effect of the concentration and thermal components of the mass transfer mechanism on their subsequent redistribution.

Possibilities for a significant reduction in friction force via additional processing of the sliding surface of the skate or sledge runner of sports apparatuses are discussed. Such treatment minimizes both deformational and molecular components of the friction force thanks to the polishing of the surface and creation of the "double roughness" structure. It is shown that an additional laser treatment helps to enhance the hydrophobicity of the sliding surface and also to reduce the molecular interaction forces formed at the contact surface.

In conclusion, directions for further research are suggested so to determine an optimum combination of the laser treatment of sliding surfaces and the concentration of modifiers in the surface layer of ice to ensure the best anti-friction properties.

Keywords: crystal ice structure, "double roughness", heat and mass transfer, trace concentrations, high molecular compounds.

References

1. G.Yu. Goncharova
Kholodilnaya Tekhnika, 2009, № 9, 44 (in Russian).
2. I.A. Arkharov, G.Yu. Goncharova
Kholodilnaya Tekhnika, 2010, № 11, 46 (in Russian).
3. D. Tabor
Biogr. Mem. Fell. R. Soc., 1969, 15, 1. DOI: 10.1098/rsbm.1969.0001.
4. I.P. Romanovskii, I.N. Beckman
Vestnik MGU, ser. Khimiya [Moscow University Chem. Bull.], 1987, 28, № 3 260 (in Russian).
5. M. Kapembwa, M. Rodríguez-Pascual, A.E. Lewis
Crystal Growth and Design, 2014, 14, 389. DOI: 10.1021/cg401428v.
6. M. Sun, A. Liang, G.S. Watson, J.A. Watson, Y. Zheng, J. Ju, L. Jiang
PLoS ONE, 2012, 7(4), e35056. doi:10.1371/journal.pone.0035056.
7. L. Feng, Y. Zhang, J. Xi, Y. Zhu, N. Wang, F. Xia, L. Jiang
Langmuir, 2008, 24, 4114. DOI: 10.1021/la703821h.

*

The work was financially supported by RFBR (project N 13-08-01126).

Эйлеровые методы моделирования полидисперсных турбулентных течений влажного пара в турбинных решетках и соплах Лаваля с учетом нестационарных фазовых переходов*

Г.А. Филиппов, А.Р. Аветисян

В настоящей работе описаны три эйлеровых метода для моделирования эволюции распределения влаги по размерам в результате совместно протекающих процессов нуклеации (спонтанной конденсации), гетерогенной конденсации/испарения и коагуляции. Приведены результаты сравнений эффективности методов на примере аналитического решения уравнений для функции плотности вероятности распределения влаги по размерам. Результаты расчетов по представленным моделям хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: спонтанная конденсация, полидисперсность, турбулентность, двухфазные течения, паровые турбины.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-01263).

Введение

Экономичность и надежность паровых турбин существенно зависят от полидисперсной структуры влаги в проточной части и пространственного течения двухфазной среды [1].

Теоретические методы расчета трехмерного течения двухфазных потоков с учетом скольжения фаз, тепломассообмена, образования и дробления пленок, эффектов турбулентности и других факторов в настоящее время интенсивно разрабатываются и далеки от завершения. Нет возможности смоделировать реальные условия течения на экспериментальных газодинамических стендах. Это относится к организации необходимого рассогласования векторов скоростей фаз перед рабочей и сопловой решетками по углу натекания, значениям турбулентности, моделирования «бегущих» закомочных следов через каналы рабочей решетки, образованию пленок жидкости, их движению и отрыву под действием центробежных сил, а также другим факторам, существенно влияющим на характер течения и величину потерь [2].

Коллективы под руководством и при участии авторов настоящей статьи в течение ряда лет развивают математические модели и экспериментальные исследования для описания перечисленных выше процессов тепломассообмена и гидродинамики в проточных частях паровых турбин.

Из иерархии эйлеровых математических моделей в настоящей работе представлены односкоростные модели полидисперсных турбулентных течений влажного пара в турбинных решетках и соплах Лаваля с учетом стационарных и нестационарных фазовых переходов.

Основное внимание уделяется методам моделирования эволюции спектра капель во времени и в пространстве, которая описывается кинетическим уравнением для функции плотности вероятности (ФПВ) распределения по размерам (массам). Непосредственное решение кинетического уравнения в фазовом пространстве, по-видимому, имеет смысл только для относительно простых модельных задач с целью апробации приближенных методов, разрабатываемых для расчета гидродинамически сложных течений. В настоящей работе для моделирования эволюции спектра капель по размерам привлекаются три разных метода. Эти методы описания полидисперсности (распределения ка-



ФИЛИППОВ
Геннадий Алексеевич
академик, профессор,
Московский энергетический институт



АВETИСЯН
Артур Робертович
Институт проблем безопасного развития атомной
энергетики РАН

пель по размерам) органично сочетаются с эйлеровым континуальным моделированием движения и тепло-массопереноса двухфазной среды.

Первый метод (метод моментов) основан на использовании уравнений для моментов ФПВ [3–5]. Этот метод требует относительно небольших вычислительных затрат, поскольку вовлекает в расчеты только уравнения для нескольких первых моментов (в данной работе привлекаются уравнения для четырех моментов). В то же время область применения этого метода ограничена случаем очень мелких капель, скорости и температуры которых незначительно отличаются от соответствующих характеристик газовой фазы.

Второй подход к описанию полидисперсных течений (метод фракций) основан на разделении спектра капель на ряд фракций с фиксированными границами и предположении о возможности обмена каплями между разными фракциями в результате фазовых переходов, коагуляции, фрагментации и т.д. В рамках этого метода ФПВ аппроксимируется кусочно-равновероятным распределением и, таким образом, задача описания спектра капель сводится к решению уравнений для массовых концентраций отдельных фракций. Метод фракций является существенно более универсальным по сравнению с методом моментов, так как может использоваться для построения многоскоростного и многотемпературного континуального описания полидисперсной среды. Однако в случае моделирования течений со спонтанной конденсацией или при существенной роли коагуляции необходимо введение очень большого числа фракций для корректного моделирования формирования и роста капель. В настоящей работе предлагается метод моделирования эволюции спектра капель, базирующийся на аппроксимации непрерывного распределения в виде суммы δ -функций (метод

δ -аппроксимации). Представленные здесь методы описания эволюции спектра капель по размерам приспособлены к эйлерову континуальному подходу к моделированию двухфазных течений и легко имплантируются в промышленные и исследовательские вычислительные коды (CFD-коды).

Постановка задачи. Рассматриваются турбулентные двухфазные парокапельные течения с большими околосвуковыми скоростями и мелкодисперсной влагой, образующейся в результате спонтанной конденсации переохлажденного пара. Массовая концентрация капель в потоке предполагается достаточно малой, а их среднемассовый диаметр – 1 мкм. Вследствие малого размера капель и больших скоростей потока течение двухфазной среды можно описывать уравнениями (1)–(3) сохранения массы, количества движения и энергии для потока в целом без учета эффектов молекулярной вязкости и теплопроводности по сравнению с турбулентными механизмами переноса импульса и тепла:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho W_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho W_i}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho W_i W_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial \rho \langle u'_i u'_j \rangle}{\partial x_j}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho H}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho W_i H}{\partial x_i} = \\ = -\frac{\partial C_p \langle u'_i t' \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial P}{\partial \tau} + W_i \frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho \epsilon. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $\rho = (1 - \Phi)\rho_g + \Phi\rho_\ell \approx \rho_g + M$ – плотность двухфазной парокапельной среды; ρ_g , ρ_ℓ – плотности газовой и жидкой фаз; $M = \Phi\rho_\ell$ – масса жидкой фазы в единице объема; Φ – объемная концентрация жидкой фазы; W_i , H , C_p – скорость, энтальпия и теплоемкость двухфазной среды; P – давление, ϵ – диссипация турбулентной энергии.

Скорость зародышеобразования (нуклеации) в результате спонтанной конденсации рассчитывается на основе классической теории Фолмера–Френкеля–Зельдовича. Критический радиус зародышеобразования определяется формулой Кельвина.

Скорость гетерогенных фазовых переходов зависит от размера капли (числа Кнудсена). Так, конденсация или испарение очень мелких капель при больших числах Кнудсена происходит в свободномолекулярном режиме и рассчитывается согласно кинетической модели Герца–Кнудсена.

Скорость фазовых переходов в случае относительно крупных капель при малых числах Кнудсена лимитируется отводом при конденсации и подводом при испарении теплоты парообразования, в соответствии

Модель турбулентности. В рамках стандартной высокорейнольдсовой k - ε -модели турбулентности (СТВ) коэффициент турбулентной вязкости определяется приведенным ниже соотношением [6].

Однако известно, что для ряда неравновесных течений, например, при наличии больших градиентов скоростей в сдвиговых и конфузорно-диффузорных потоках, стандартная модель приводит к неудовлетворительным результатам, в частности, предсказывает аномально высокий уровень турбулентности вследствие большой погрешности в описании производства турбулентной энергии. Так, применительно к сопловым течениям стандартная k - ε -модель может давать не наблюдаемые в реальности высокие значения турбулентной энергии (степени турбулентности) в приосевой зоне. Существенно лучшие результаты для таких течений могут быть получены путем простейшей модификации k - ε -модели (MTB), модифицируя выражение для турбулентной вязкости (4). Предлагаемая модификация основывается на подходе, предложенном работах [7, 8] для представления тензора анизотропии в виде разложения в ряд Тейлора относительно градиента средней скорости. Первый член разложения дает следующее выражение для коэффициента вязкости:

$$v_T = \frac{c_\mu}{1 + (\Pi/\varepsilon - 1)/c_1} \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (5)$$

Соотношение (5) представлено в виде, предусматривающем его совпадение с уравнением (4) для равновесных течений ($\Pi = \varepsilon$). Минимально допустимое значение постоянной $c_1 = 1$.

Эволюция спектра капель по размерам. Эволюция спектра капель по размерам в результате нуклеации, конденсации/испарения и коагуляции описывается кинетическим уравнением для ФПВ распределения по размерам (массам):

$$\frac{\partial \mathbf{P}_m}{\partial \tau} + \frac{\partial V_l \mathbf{P}_m}{\partial x_i} + \frac{\partial \mathcal{J} \mathbf{P}_m}{\partial m} = I \delta(m - m_*) +$$

$$+ \frac{1}{2} \int_0^m \int_0^m \beta(m_1, m_2) \mathbf{P}_m(m_1) \mathbf{P}_m(m_2) \delta(m - m_1 - m_2) dm_1 dm_2 -$$

Здесь первый и второй члены в левой части описывают изменение ФПВ распределения капель во времени и конвекцию в пространстве. Последний член в левой части и первый член в правой части определяют соответственно эволюцию спектра капель в результате гетеро- и гомогенных фазовых переходов. Последние два члена в правой части характеризуют образование капель массы из более мелких и исчезновение их за счет слияния с другими. Скорость мелкодисперсной влаги принимается равной среднemasсовой скорости двухфазной среды W .

Метод моментов. Умножая уравнение (6) на m^k и интегрируя по всему спектру капель, получаем систему уравнений для моментов ФПВ (7).

$$\begin{aligned}
L_k &= \int_0^\infty m^k \mathbf{P}_m dm, \\
\frac{\partial L_k}{\partial \tau} + \frac{\partial V_i L_k}{\partial x_i} &= I m_*^k + k \int_0^\infty m^{k-1} J P_m(m) dm + \\
&+ \frac{1}{2} \int_0^\infty \int_0^\infty [(m_1 + m_2)^k - m_1^k - m_2^k] \cdot \\
&\cdot \beta(m_1, m_2) P_m(m_1) P_m(m_2) dm_1 dm_2, \quad (7)
\end{aligned}$$

В свободномолекулярном режиме конденсации/испарения, когда скорость фазовых переходов при $r \gg r_*$ определяется соотношением $J = am^{2/3}$ ($a = const$), и при незначительной роли коагуляции в качестве характерных моментов, описывающих распределение капель по размерам (массам), целесообразно выбрать $L_{n/3}$ при $n = 0, 1, 2, 3$ [3]. В этом случае система уравнений (7) становится замкнутой и, следовательно, могут быть найдены все представляющие интерес моменты ФПВ.

Метод фракций. Этот метод предполагает осреднение параметров каждой γ -фракции капель в пределах изменения массы $m \in [m_{\gamma-}, m_{\gamma}]$ или радиуса $r \in [r_{\gamma-}, r_{\gamma}]$. Будем аппроксимировать ФПВ кусочно-равновероятным распределением капель по массе:

$$P_{m,\gamma}(m_{\gamma-1} < m \leq m_{\gamma}) = \frac{2Z_{\gamma}}{m_{\gamma}^2 - m_{\gamma-1}^2}, \quad P_m = \sum_{\alpha=1}^A N_{\alpha} \delta(m - \bar{m}_{\alpha}), \quad (11)$$

$$Z_{\gamma} = \int_{m_{\gamma-1}}^{m_{\gamma}} m P_m dm. \quad (8)$$

В результате интегрирования кинетического уравнения (6), умноженного на m , в пределах интервала $[m_{\gamma-1}, m_{\gamma}]$ с учетом аппроксимации выражения (8) получается следующая система уравнений для массы γ -фракций капель в единице объема [4, 5]:

$$\frac{\partial Z_{\gamma}}{\partial \tau} + \frac{\partial V_i Z_{\gamma}}{\partial x_i} = \kappa_0 \delta_{1\gamma} + \chi_{\gamma} + \omega_{\gamma} \\ \gamma = 1, 2, \dots, \Gamma. \quad (9)$$

Члены в правой части уравнения (9) соответственно определяют скорости изменения массы капель γ -фракции вследствие нуклеации, конденсации/испарения и коагуляции. Так, интенсивность образования жидкой фазы в результате гомогенной конденсации, представленная в системе (9), при условии, что масса зародышей не превышает граничное значение массы первой фракции, равна

$$\kappa_0 = m_* I \quad m_* = \frac{4}{3} \rho_{\ell} r_*^3, \quad (10)$$

Интенсивность χ_{γ} конденсации/испарения и источниковый член ω_{γ} в уравнении (9), описывающий коагуляцию, определяются, как в работах [4, 5].

Число и масса всех капель в единице объема согласно выражению (9) определяются следующими соотношениями:

$$N = \sum_{\gamma=1}^{\Gamma} \frac{Z_{\gamma}}{\bar{m}_{\gamma}}, \quad M = \sum_{\gamma=1}^{\Gamma} Z_{\gamma}.$$

Метод δ -аппроксимации. Полидисперсный ансамбль капель моделируется системой монодисперсных групп, для чего непрерывная ФПВ аппроксимируется в виде суммы δ -функций:

где N_{α} – числовая концентрация капель α -группы (число капель в единице объема); $\bar{m}_{\alpha}$ – средняя масса капель α -группы, определяемая как отношение массы капель α -группы M_{α} к их числовой концентрации N_{α} :

$$\bar{m}_{\alpha} = \frac{M_{\alpha}}{N_{\alpha}}, \quad \beta(m_1, m_2) P_m(m_1) P_m(m_2) dm_1 dm_2. \quad (12)$$

С целью нахождения N_{α} и M_{α} используем уравнения для моментов ФПВ, следующие из кинетического уравнения (6) с учетом выражения (11):

$$L_{\gamma k} = \int_{m_{\gamma-1}}^{m_{\gamma}} m^k P_m(m) dm, \\ \frac{\partial L_{\alpha k}}{\partial \tau} + \frac{\partial V_i L_{\alpha k}}{\partial x_i} = I m_*^k \delta_{1\alpha} + k \int_{m_{\alpha-1}}^{m_{\alpha}} m^{k-1} J(m) P_m(m) dm + \\ + \frac{1}{2} \int_{m_{\alpha-1}}^{m_{\alpha+1}} \int_0^{\infty} [(m_1 + m_2)^k - m_1^k - m_2^k] \cdot \quad (13)$$

Здесь m_{α}^0 – некоторое значение массы, заключенное между $\bar{m}_{\alpha-1}$ и $\bar{m}_{\alpha}$. Кроме того, предполагается, что образующиеся в результате нуклеации капли относятся к первой группе. Уравнения (14) для N_{α} и M_{α} следуют из выражения (13) с учетом соотношения (12) соответственно при $k = 0$ и $k = 1$.

$$\frac{\partial N_{\gamma}}{\partial \tau} + \frac{\partial V_i N_{\gamma}}{\partial x_i} = I \delta_{1\gamma} - \frac{N_{\gamma}}{2} \sum_{\alpha_1=1}^A \beta(\bar{m}_{\gamma}, \bar{m}_{\alpha_1}) N_{\alpha_1}, \\ \frac{\partial M_{\gamma}}{\partial \tau} + \frac{\partial V_i M_{\gamma}}{\partial x_i} = I \bar{m}_1 \delta_{1\gamma} + J(\bar{m}_{\gamma}) N_{\gamma}. \quad (14)$$

Число и масса всех капель в единице объема согласно уравнениям (11) и (12) определяются следующими соотношениями:

$$N = \sum_{\alpha=1}^A N_{\alpha}, \quad M = \sum_{\alpha=1}^A M_{\alpha}.$$

Как видно из уравнения (14), имеет место расщепление решения по физическим процессам вследствие того, что при гетерогенных фазовых переходах сохраняется число частиц, а при коагуляции – их масса. Таким образом, задача моделирования эволюции спектра полидисперсного ансамбля частиц сводится к решению системы уравнений для числовых и массовых концентраций взаимодействующих благодаря коагуляции групп монодисперсных частиц. Начальные условия для уравнений (14) могут быть получены из требования, чтобы аппроксимация выражения (11) обеспечила точные значения нескольких моментов заданной начальной ФПВ.

используются метод моментов (уравнение (7)) и метод δ -аппроксимации (уравнения (11)–(14)).

На рисунке 2 показано распределение давления по длине сопла при отсутствии начальной влаги для условий тестов 1 и 3, приведенных в работе [10] (расстояние от входного сечения до горла сопла 0.268 м). В этих тестах полное давление и температура равны соответственно $P_0 = 3.67 \cdot 10^4$ Па, $T_0 = 353$ К и $P_0 = 2.63 \cdot 10^4$ Па, $T_0 = 342$ К. Расчеты выполнены с использованием метода моментов и метода δ -аппроксимации. Степень турбулентности на входе в сопло принималась низкой. В случае спонтанной конденсации без начальной влаги метод моментов дает более точные результаты, так как обеспечивает моделирование четырех моментов ФПВ; тогда как в рамках метода δ -аппроксимации можно использовать только одну δ -функцию и тем самым обеспечить моделирование только двух моментов. Однако, как видно из рисунка 2, оба метода предсказывают близкие распределения давления по длине сопла и, в частности, одно и то же местоположение скачка конденсации. Хорошая точность метода δ -аппроксимации в этом случае объясняется тем обстоятельством, что спектр капель, образующихся вследствие спонтанной конденсации, является очень узким и поэтому может быть аппроксими-

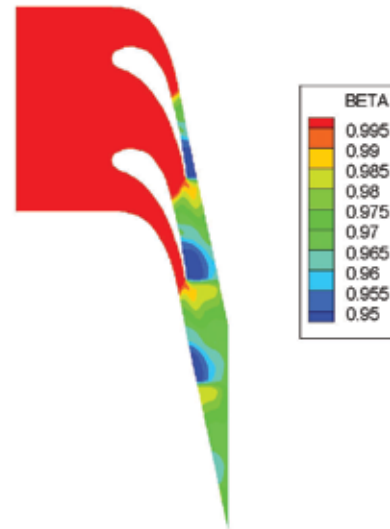


Рис. 3. Распределение степени сухости в канале решетки C9012 [12].

рован одной δ -функцией. Рисунок 2 свидетельствует, что расчетные распределения давления, включая положение и форму скачка конденсации, согласуются с экспериментальными данными.

На рисунке 3 представлено распределение степени сухости в канале сопловой решетки C9012. Расчеты проведены со следующими параметрами на входе в решетку: $P_0 = 100000$ Па, $T_0 = 377$ К. Значение влажности, измеренное на выходе из решетки [11], было равно 0.044, т.е. степень сухости 0.956, что хорошо согласуется с результатами расчета, которые показали степень сухости, равной 0.958. При указанных параметрах скачок конденсации стационарный.

При снижении начального перегрева стационарный скачок конденсации смещается против потока к горлу сопла в область меньших чисел Маха и в конечном счете может возникнуть кризис течения,

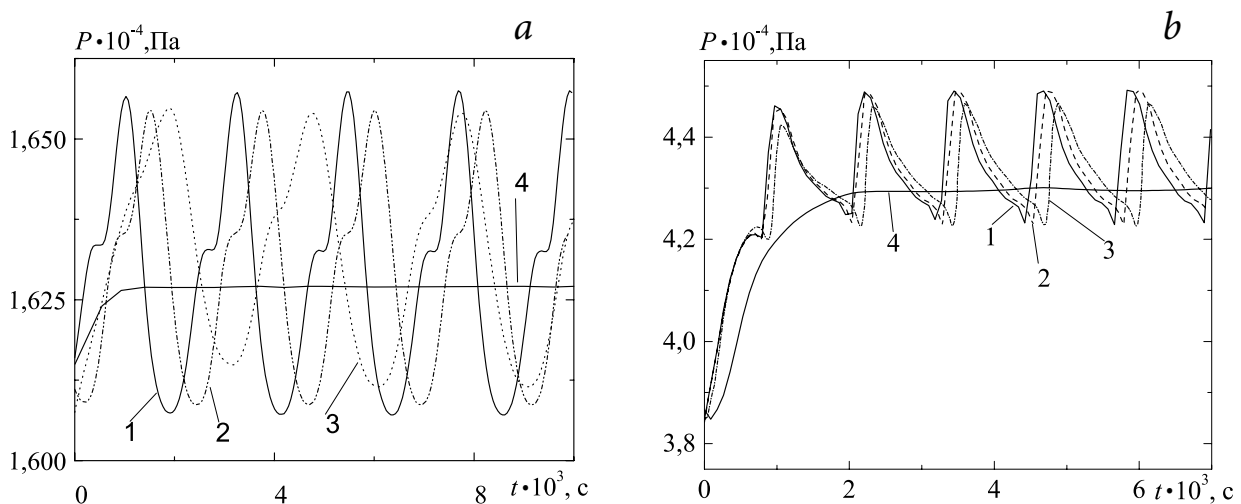


Рис. 4. а – Осцилляции давления в сопле [10] при $\chi_0 = 0.02$ (1), 0.06 (2), 0.10 (3) и 0.15 (4); б – осцилляции давления в сопле [12] при $\chi_0 = 0.02$ (1), 0.04 (2), 0.06 (3) и 0.10 (4).

характеризуемый образованием нестационарных ударных волн (автоколебаний) [10–12]. Возникновение автоколебаний связано с механизмом обратной связи, реализуемым ударными волнами: перемещаясь против потока, эти волны снижают переохлаждение пара и уничтожают тем самым причину своего образования (т.е. спонтанную конденсацию). После этого вновь возникает сверхзвуковое расширение, и процесс повторяется, выражаясь в появлении самоподдерживающихся осцилляций всех переменных.

С целью анализа влияния турбулентности на нестационарные процессы спонтанной конденсации приведены некоторые результаты расчетов при разных интенсивностях пульсаций скорости (степени турбулентности $\chi = k^{1/2}/W$) на входе в сопло χ_0 . Таким образом, варьировалась турбулентная энергия во входном сечении $k_0 = (\chi_0 W_0)^2$. Скорость диссипации турбулентной энергии на входе в сопло задавалась соотношением $\varepsilon_0 = k_0^{3/2}/h_0$, где h_0 – полуширина входного сечения сопла.

На рисунке 4 представлены осцилляции давления на оси вблизи выходных сечений сопел при разных значениях начальной степени турбулентности. Основной результат, полученный в расчетах, заключается в вырождении нестационарного режима конденсации и исчезновении ударных волн при высокой степени турбулентности.

Измеренные в работах [10] и [12] частоты колебаний параметров потока составляли соответственно

810 и 380 Гц, а рассчитанные частоты равнялись 840 и 410 Гц.

Заключение

Представлены три эйлеровых метода: моментов, фракций и метод δ -аппроксимации для моделирования эволюции спектра капель по размерам. Сравнительные расчеты на примере аналитического решения кинетического уравнения для ФПВ показывают, что предложенный метод δ -аппроксимации обладает достаточно высокой точностью даже при небольшом количестве групп капель. Этот метод обладает существенно большей вычислительной эффективностью по сравнению с методом фракций и может применяться для расчета спектра капель в случае нуклеации, конденсации/испарения и коагуляции.

Результаты расчетов стационарной и нестационарной спонтанной конденсации пара в соплах Лаваля и в турбинной решетке, выполненных представленными эффективными методами, хорошо согласуются с данными эксперимента.

Литература

1. Г.А. Филиппов, В.Г. Грибин, А.Р. Аветисян, А.С. Лисянский *Теплоэнергетика*, 2015, №1, 22.
2. F. Bakhtar, A.J. White, H. Mashmouhy *J. Mech. Eng. Sci.*, 2005, **219**, 1335. DOI: 10.1243/095440605X31454.
3. P.G. Hill *J. Fluid Mech.*, 1966, **25**, 593. DOI: http://dx.doi.org/10.1017/S0022112066000284.
4. A.R. Avetissian, G.A. Philippov, L.I. Zaichik *Nuclear Eng. Design*, 2005, **235**, 1215. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2005.02.013.
5. A.R. Avetissian, G.A. Philippov, L.Z. Zaichik *Intern. J. Heat Mass Transfer*, 2008, **51**, 4195. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.11.056.
6. B.E. Launder, D.B. Spalding *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 1974, **3**, 269. DOI: 10.1016/0045-7825(74)90029-2.
7. T.B. Gatski, C.G. Speziale *J. Fluid Mech.*, 1993, **254**, 59. DOI: http://dx.doi.org/10.1017/S0022112093002034.
8. R. Abid, C.G. Speziale *Phys. Fluids A*, 1993, **5**, 1776. DOI: http://dx.doi.org/10.1063/1.858852.
9. A.J. White *Int. J. Numer. Meth. Engng*, 2003, **57**, 819. DOI: 10.1002/nme.705.
10. S.A. Skillings, P.T. Walters, M.J. Moore *Int. Mech. Eng. Conf.*, 1987, vol. C259/87, 125.
11. М.Е. Дейч, Г.А. Филиппов *Газодинамика двухфазных сред*. – М.: Энергоатомиздат, 1981, 472 с.
12. D. Barschdorff *in Proceedings of the International Conference of Rain Erosion and Associated Phenomena*, Farnborough, 1970, p. 691.

English

Eulerian Methods for Modelling of Polydispersed Turbulent Wet Steam Flows in Turbine Blade Cascades and Laval Nozzles with Unsteady Phase Transitions*

Gennady A. Philippov –
Academician, Professor
Moscow Power Engineering Institute
14, Krasnokazarmennaya Str.,
Moscow, 111250, Russia.
e-mail: gafilip@yandex.ru

Artur R. Avetisyan –
Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences
52, Bolshaya Tulskaia Str.,
Moscow, 115191, Russia
e-mail: avetis@ibrae.ac.ru

Abstract

The paper contains a description of three Eulerian methods used for modeling the evolution of wetness distribution in size due to a combination of simultaneous processes of nucleation (or spontaneous condensation), heterogeneous condensation/evaporation and coagulation. Results are reported on a comparative effectiveness of the methods as exemplified by an analytical solution of equations for probability density function (or PDF) for wetness size spectrum. Also, results of calculations based on the models are compared with experimental data and their good conformity is shown.

Keywords: spontaneous condensation, polydispersity, turbulence, two-phase flow, steam turbines.

References

1. G.A. Filippov, V.G. Gribin, A.R. Avetisyan, A.S. Lisyanskiy
Thermal Engineering, 2015, **62**, N 1, 19.
2. F. Bakhtar, A.J. White, H. Mashmouhy
J. Mech. Eng. Sci., 2005, **219**, 1335. DOI: 10.1243/095440605X31454.
3. P.G. Hill
J. Fluid Mech., 1966, **25**, 593. DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S0022112066000284>.
4. A.R. Avetisyan, G.A. Philippov, L.I. Zaichik
Nuclear Eng. Design, 2005, **235**, 1215.
DOI: 10.1016/j.nucengdes.2005.02.013.
5. A.R. Avetisyan, G.A. Philippov, L.Z. Zaichik
Intern. J. Heat Mass Transfer, 2008, **51**, 4195.
DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.11.056.
6. B.E. Launder, D.B. Spalding
Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 1974, **3**, 269.
DOI: 10.1016/0045-7825(74)90029-2.
7. T.B. Gatski, C.G. Speziale
J. Fluid Mech., 1993, **254**, 59. DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S0022112093002034>.
8. R. Abid, C.G. Speziale
Phys. Fluids A, 1993, **5**, 1776. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.858852>.
9. A.J. White
Int. J. Numer. Meth. Engng, 2003, **57**, 819. DOI: 10.1002/nme.705.
10. S.A. Skillings, P.T. Walters, M.J. Moore
Int. Mech. Eng. Conf., 1987, vol. C259/87, 125.
11. M.E. Deich, G.A. Philippov
Gazodinamika dvukhfaznykh sred [Gasodynamics of Two-Phase Media], Energoatomizdat, Moscow, 1981, pp. 472 (in Russian).
12. D. Barschdorff
in Proceedings of the International Conference of Rain Erosion and Associated Phenomena, Farnborough, 1970, p. 691.

* The work was financially supported by RFBR (project N 13-08-01263).

Моделирование и анализ газокинетических процессов на основе кинетического уравнения Больцмана для решения проблем ядерных технологий*

В.Г. Гришина, Е.П. Дербаква, О.И. Додулад, Ю.Ю. Клосс, П.В. Шувалов, А.В. Морозов, Ф.Г. Черемисин

Представлены результаты моделирования течений газа в микроустройствах путем решения кинетического уравнения Больцмана. Рассмотрены медленные и сверхзвуковые течения. Моделирование проведено на основе разработанных авторами проблемно-моделирующих сред, в основе которых лежит консервативный проекционный метод дискретных ординат решения уравнения Больцмана.

Ключевые слова: кинетическое уравнение, проекционный метод, проблемно-моделирующие среды, газокинетические процессы в микроустройствах.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 13-08-00903, 12-08-00940, 12-08-00656, 13-08-00859, 14-08-01250, 15-08-00990, 15-08-01142, 13-07-00437, 14-07-00775 и 15-07-02025).

Введение

В настоящей работе приводятся результаты исследований, направленных на создание методики компьютерного моделирования течений разреженного газа в микроустройствах. В ее основе лежит предложенный одним из авторов метод численного решения уравнения Больцмана [1–6]. На базе компьютерных моделей можно провести эффективный анализ, оптимизацию физических характеристик микронасосов и показать область их применимости в различных приложениях. Подобного рода системы могут находить применение как масс-спектрометры, оптические спектрометры, газовые анализаторы. Их разработка соответствует тенденции миниатюризации приборов и устройств [7–14]. Современные механические насосы не пригодны в микромасштабах и должны быть заменены приборами без движущихся частей, осно-

ванными на эффекте термотранспирации Кнудсена [15, 16]. В работе представлены результаты детального компьютерного моделирования различных насосов Кнудсена: классического насоса Кнудсена, впервые рассчитанного Мунцем и Фам-Ван-Дипом и сконструированного Варго [7], змейчатого насоса, предложенного Аоки, Дегондом и Миесенсом [9, 10], комбинированного насоса Кнудсена. Впервые на основе решения кинетического уравнения проведено моделирование классического эксперимента Кнудсена [16]. Для режима сверхзвуковых течений газа приведены результаты компьютерного моделирования и анализа распространения ударных волн в микроканалах [17–23]. Изучение таких течений представляет практический интерес для создания высокоэнергетических пучков молекул и инициации различных физико-химических процессов в капиллярах и пористых средах.



ГРИШИНА
Валерия Генриховна
Национальный исследова-
тельский центр «Курчатовский
ИНСТИТУТ»



ДЕРБАКОВА
Елена Павловна
Национальный исследова-
тельский центр «Курчатовский
ИНСТИТУТ»



ДОДУЛАД Олег Игоревич
Национальный исследова-
тельский центр «Курчатовский
институт»



КЛОСС
Юрий Юрьевич
Национальный исследова-
тельский центр «Курчатовский
институт»



ШУВАЛОВ
Павел Вадимович
Национальный исследова-
тельский центр «Курчатовский
ИНСТИТУТ»



МОРОЗОВ
Александр Васильевич
Национальный исследова-
тельский центр «Курчатовский
ИНСТИТУТ»



ЧЕРЕМИСИН
Феликс Григорьевич
Вычислительный центр
им. А.А. Дородницына РАН

63

метрии любой сложности. Это делает ПМС универсальным инструментом не только в академических целях, но и в инженерных приложениях. Высокая степень модульности ПМС делает ее гибкой и расширяемой, что позволяет добавлять новые модули, основанные на новых моделях. Кроссплатформенность программного кода и возможность использования графических процессоров, которые в настоящее время стремительно развиваются, обеспечивают широкий диапазон архитектур, на которых могут решаться поставленные задачи.

Общая структура

На рисунке 2 приведена схема потока данных при моделировании прикладных проблем от входных параметров, предоставляемых пользователем, и генерации расчетной сетки до визуализации результатов с использованием специализированных пакетов. Центральное место занимает солвер-программа, выполняющая необходимые для моделирования газа вычисления.

Для численного решения кинетического уравнения (1) необходимо оперировать с шестимерной функцией распределения, что предъявляет высокие требования к объему опера-

тивной памяти и вычислительной мощности. Поэтому изначально солверы разрабатывались для функционирования в многопроцессорной среде. В задачи солвера входят численное решение уравнения Больцмана методом конечных объемов и эффективное распараллеливание на различных вычислительных архитектурах (кластерные системы, графические карты). Для этого расчетная область делится на области (домены), каждая из которых предоставляется отдельному вычислительному узлу. Расчет представляет собой итерационный процесс эволюции функции распределения. С помощью интегрирования периодически вычисляются макропараметры, которые записываются в файлы соответствующего формата для дальнейшей визуализации. Эффективное распараллеливание позволило, с одной стороны, значительно сократить время расчетов (с недель до часов), с другой – обеспечить возможность прецизионного расчета на мелких сетках, которые требуют большого объема памяти. На сегодняшний день солверы используют две технологии распараллеливания: MPI (Message Passing Interface) для вычислений на кластерах и Nvidia CUDA (Compute Unified Device Architecture) – на видеокартах. Отметим высокую степень масштабируемости и эффективности разработанных параллельных алгоритмов и их программной реализации, основные результаты изложены в работе [37]. Устройства, геометрия которых состоит из прямоугольных областей, моделируются на прямоугольных сетках. В солверах RectSolv и GPUSolv для вычислений используют обычный и графический процессор соответственно. Произвольная геометрия моделируется солвером UnstructSolv, который оперирует с неструктурированными сетками, генерируемы-

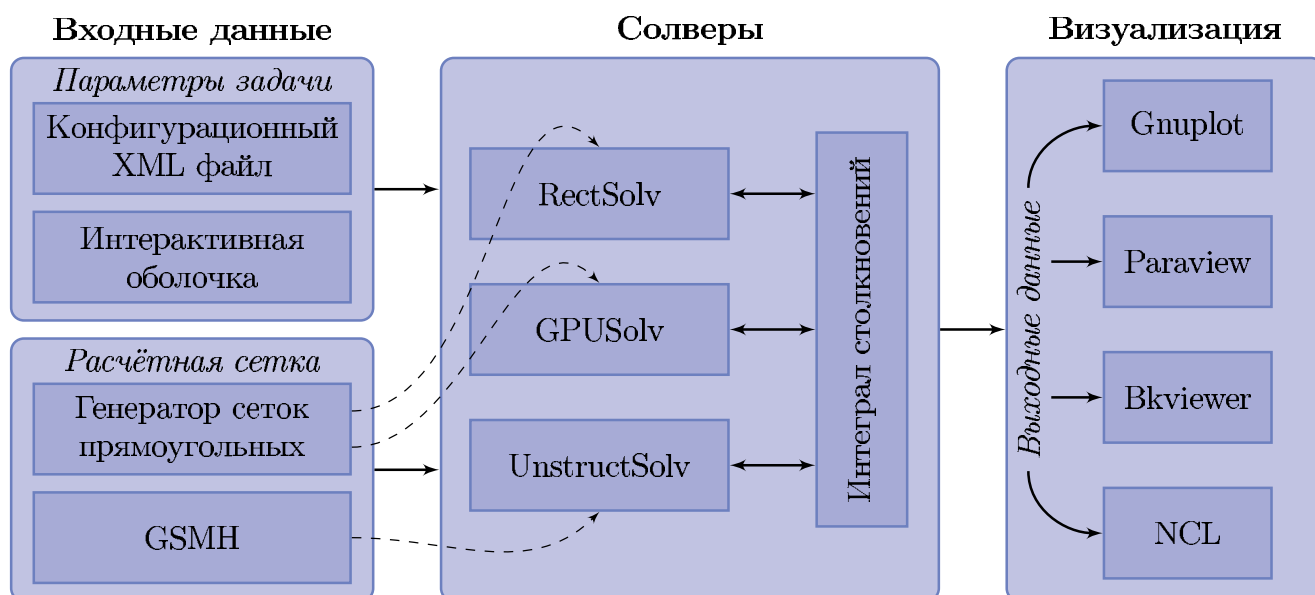


Рис. 2. Схема ПМС.

дятся в безразмерных величинах. Скорость газа нормирована на скорость звука в невозмущенном газе, плотность и температура нормированы на их характерные значения в секции В. Указанные расстояния и времена нормированы на среднюю длину и время свободного пробега молекул соответственно.

В области размытого фронта УВ видно возрастание температуры, а за фронтом температура падает в волне разрежения. Плоской области контактного газа за фронтом не наблюдается, так как она сливается с размытым ударным фронтом с одной стороны и с зоной разрежения – с другой (рис. 5).

Моделирование эксперимента Кнудсена

В 1909–1910 гг. М. Кнудсен исследовал разность давлений на концах устройства, состоящего из последовательно соединенных цилиндрических узких и широких трубок. Вдоль узких трубок, диаметр которых равнялся приблизительно 0.5 мм, температура линейно возрастала от некоторого значения T_1 до $T_2 > T_1$. Вдоль широких трубок, диаметр которых равнялся 10–15 мм, температура линейно убывала до значения T_1 . Эксперимент показал, что при некоторых условиях отношение давлений на концах 10-каскадного устройства достигало 10, т.е. устройство могло работать как насос. Этот классический эксперимент открыл явление теплового скольжения в газе, практическая важность которого выявилась только в конце XX в.

Нами была поставлена задача математического моделирования эксперимента при известных параметрах устройства. Использовался молекулярный потенциал водорода Леннарда-Джонса с параметрами, приведенными в работе [50], вращательно-поступательные переходы энергии учитывались на основе данных статьи [40]. На рисунке 6 представлено рассчитанное распределение давления в 10-каскадном на-

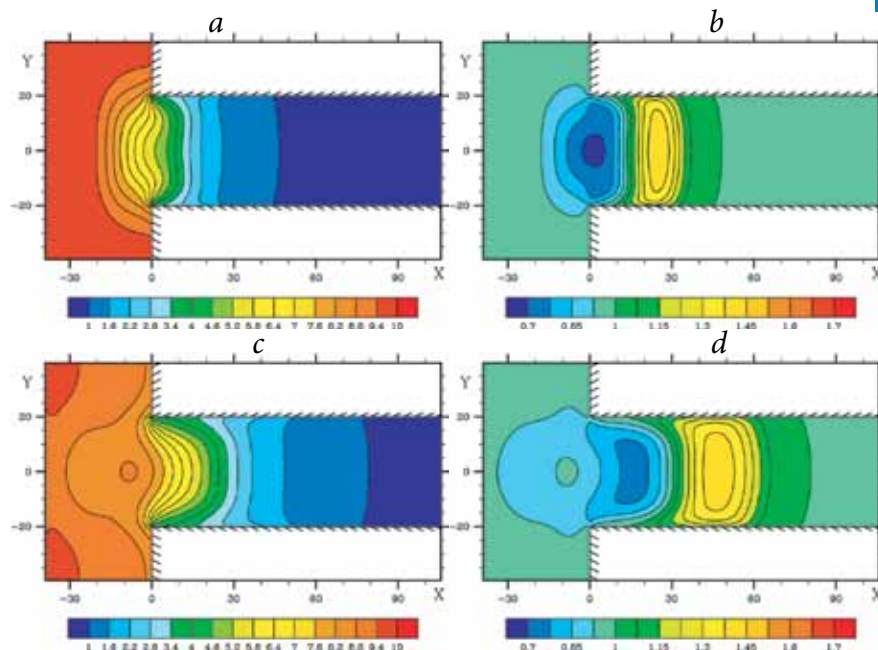


Рис. 5. Поля плотности и температуры для $Kn=0.05$: а – плотность, $t=30$; б – температура, $t=30$; в – плотность, $t=60$; г – температура, $t=60$.

сосе Кнудсена. Десятикратное увеличение давления с точностью до нескольких процентов совпадает с данными физического эксперимента. Другие варианты эксперимента также были рассчитаны. Получено совпадение расчетных и экспериментальных данных в пределах 7%.

Для моделирования однокаскадного насоса использована пространственная сетка из 20000–25000 тетраэдров, скоростная сетка из 4200 узлов. Однокаскадный насос моделировался на 4 узлах по 4 CPU на каждом. Время, затраченное на моделирование, в среднем равнялось 20 ч. Для моделирования однокаскадного насоса использована пространственная сетка из 150000 тетраэдров, скоростная сетка из 3000 узлов. Многокаскадный насос моделировали на 20 узлах по 4 CPU на каждом. Время, затраченное

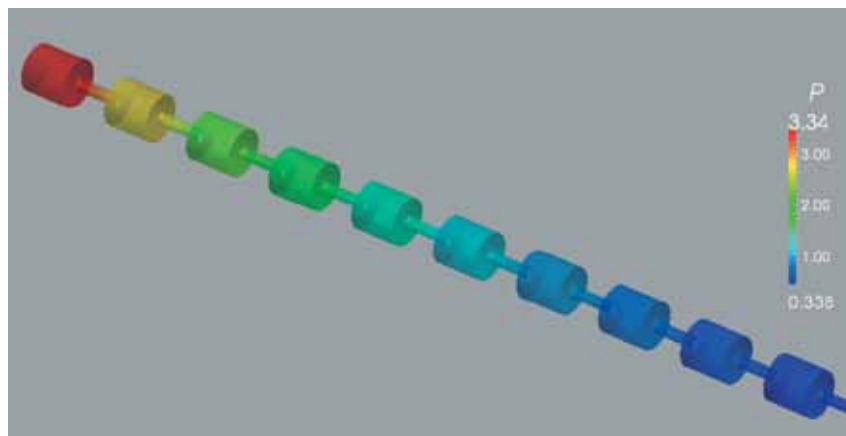


Рис. 6. Распределение давления в десятикаскадном насосе Кнудсена.

устройства и распределение температуры на стенках трубок, благодаря которому создается откачивающий эффект, показаны на *рисунке 8*.

Была рассмотрена та же двухкомпонентная смесь газов, что и выше. Диаметр трубки равен условной длине свободного пробега, число ступеней $K=5$. Распределение долей легкого χ^a и тяжелого χ^b газа в плоскости симметрии устройства показано на *рисунке 9*. Отношение давлений на концах устройства составило $p_5/p_1 \approx 1.05$. Разделение равно $\chi_B^a/\chi_A^a \approx 0.984$, это меньше в сравнении с результатами, полученными для рассмотренных выше устройств.

Комбинированный насос Кнудсена

Исследование классического и змейчатого насосов Кнудсена показало, что классический насос малоэффективен при больших числах Кнудсена, а змейчатый насос дает много меньшее отношение давлений, чем классический при числах Кнудсена порядка единицы. Предлагается комбинированный насос Кнудсена, схема которого изображена на *рисунке 10*.

Сравним работу комбинированного насоса с классическим насосом. Исследуем отношения давлений на концах каждого из устройств в зависимости от числа Кнудсена Kn . Все геометрические параметры на-

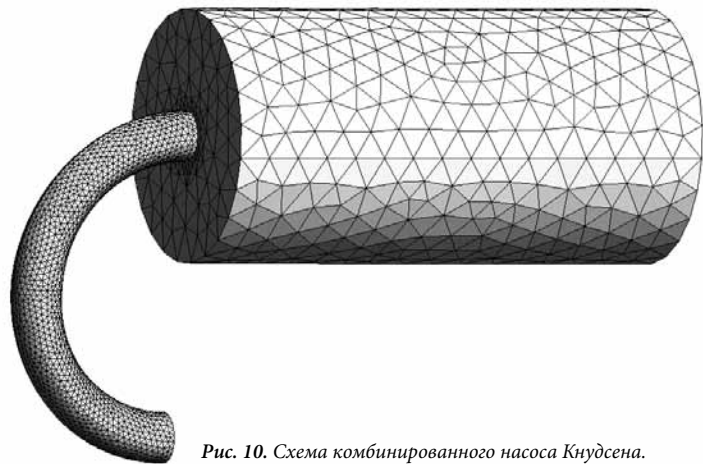


Рис. 10. Схема комбинированного насоса Кнудсена.

сосов одинаковые. Температуры на концах устройства $T_1 = 1$, а на стыке трубок $T_2 = 2$. На *рисунке 11* представлен график зависимости χ отношения давлений на концах устройств в зависимости от числа Кнудсена Kn .

На *рисунке 12* приведено распределение давления в комбинированном и классическом насосах Кнудсена вдоль продольной оси при $Kn = 20$. По оси Ox за единицу длины принята длина свободного пробега газа в начальный момент времени. Давление вдоль каждой из трубок изменяется линейно. Широкая трубка – одинаковая деталь в комбинированном и классическом насосах Кнудсена, в ней давление изменяется практически одинаково. *Рисунок 12* подтверждает, что эффект теплового скольжения в искривленной трубке сильнее, чем в прямой трубке.

Комбинированный насос объединяет преимущества классического и змейчатого насосов и облада-

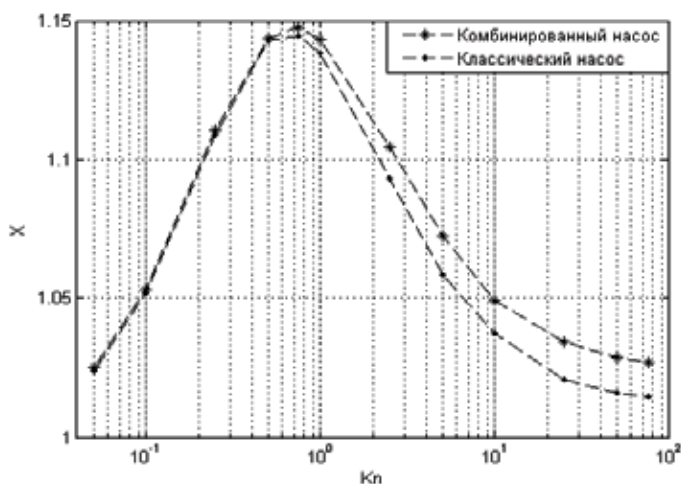


Рис. 11. Зависимость отношения давлений на концах комбинированного и классического насосов от числа Кнудсена.

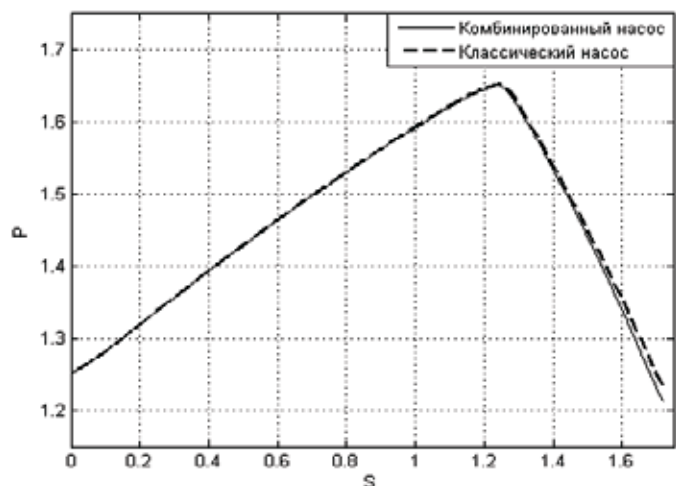


Рис. 12. Распределение давления в комбинированном и классическом насосах Кнудсена.

Заключение

- Разработаны алгоритмы и дана их программная реализация для решения кинетического уравнения Больцмана на графических процессорах обще-

- На основе созданных проблемно-моделирующих сред разработана методика вычислительного эксперимента и впервые проведен анализ неравновесных газокINETических процессов тепломассопереноса в микроканалах произвольной геометрии, в вакуумных Кнудсеновских микронасосах, в ударных волнах в микроканалах.

Литература

1. **Ф.Г. Черемисин**
Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 1970, **10**, 54.
2. **В.В. Аристов, Ф.Г. Черемисин**
Докл. АН СССР, 1976, **231**, 49.
3. **F.G. Tcheremissine**
Conservative discrete ordinates method for solving Boltzmann kinetic equation, Communications on Applied Mathematics, Computing Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 1996, p.50.
4. **Ф.Г. Черемисин**
Докл. АН СССР, 1997, **357**, 53.
5. **Ф.Г. Черемисин**
Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 2006, **46**, 329.
6. **O.I. Dodulad, F.G. Tcheremissine**
AIP Conf. Proc., 2012, **1501**, 302. DOI: 10.1063/1.4769529.
7. **S.E. Vargo, E.P. Muntz, G.R. Shiflett, W.C. Tang**
J. Vac. Sci. Technol. A, 1999, **17**, 2308.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1116/1.581765>.
8. **Y.L. Han, E.P. Muntz, A. Alexeenko, M. Young**
Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering, 2007, **11**, 151.
DOI:10.1080/15567260701337209.
9. **K. Aoki, P. Degond, L. Mieussens, M. Nishioka, S. Takata**
1079, Proc. of 25-th Intern. Symposium Rarefied Gas Dynamics, Novosibirsk, Russia, 2007.
10. **K. Aoki, P. Degond, L. Mieussens**
Commun. Comput. Phys., 2009, **6**, 919.
11. **S. Takata, H. Umetsu**
AIP Conf. Proc., 2011, **1333**, 998.
DOI:<http://dx.doi.org/10.1063/1.3562776>.
12. **S. Takata, H. Sugimoto, S. Kosuge**
Eur. J. Mech. B-Fluid., 2007, **26**, 155. DOI:10.1016/j.euromechflu.2006.05.002.
13. **H. Sugimoto, A. Shinotou**
AIP Conf. Proc., 2011, **1333**(1), 784. DOI:<http://dx.doi.org/10.1063/1.3562742>.
14. **H. Sugimoto**
25th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, Saint-Petersburg, July 21-28, 2006, 1.
15. **M. Knudsen**
Ann. Phys., 1910, **31**, 205.
16. **M. Knudsen**
Ann. der Phys, 1910, **338**, 1435. DOI: 10.1002/andp.19103381618.
17. **О.И. Додулад, Ю.Ю. Клосс, Ф.Г. Черемисин, П.В. Шувалов**
Математическое моделирование, 2010, **22**, № 6, 99.
18. **Ю.Ю. Клосс, В.В. Рябченков, Ф.Г. Черемисин, П.В. Шувалов**
Математическое моделирование, 2011, **23**, № 4, 131.
19. **Ю.Ю. Клосс, Ф.Г. Черемисин, П.В. Шувалов**
Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 2010, **50**, № 6, 1148.
20. **О.И. Додулад, Ю.Ю. Клосс, Ф.Г. Черемисин**
Физико-химическая кинетика в газовой динамике, 2010, 10 (http://chemphys.edu.ru/media/published/004_%D0%94%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BB%D0%B0%D0%B4_2009-12-21-001.pdf).
21. **V.G. Grishina, O.I. Dodulad, Yu.Yu. Kloss, F.G. Tcheremissine**
Proceedings of 19th International Shock Interaction Symposium. Moscow, Russia, August 31 – September 3, 2010, 1.
22. **Yu.Yu. Kloss, G.S. Kolyadko, P.V. Shuvalov, F.G. Tcheremissine**
Proceedings of 19th International Shock Interaction Symposium. Moscow, Russia, August 31 – September 3, 2010, 4.
23. **Yu.Yu. Kloss, P.V. Shuvalov, F.G. Tcheremissine**
Proceedings 27 Intern. Symp. on Shock Waves (ISSW27), St. Petersburg, Russia, 2009, 363.
24. **Н.М. Коробов**
Теоретико-числовые методы в приближенном анализе. - М.: Физматгиз, 1963, 224 с.
25. **О.И. Додулад, Ю.Ю. Клосс, Ф.Г. Черемисин**
Труды 27 Академических чтений по космонавтике. - М.: 2013, с. 198-200.
26. **О.И. Додулад, Ю.Ю. Клосс, Ф.Г. Черемисин**
Физико-химическая кинетика в газовой динамике, 2013, 14 (<http://chemphys.edu.ru/media/published/5.pdf>).
27. **Ю.Ю. Клосс, Н.И. Хохлов, Ф.Г. Черемисин, Б.А. Шурыгин**
Информационные процессы, 2007, **7**, № 4, 425.
28. **Ю.Ю. Клосс, Н.И. Хохлов, Ф.Г. Черемисин, Б.А. Шурыгин**
Атомная энергия, 2008, **105**, 211.
29. **Yu.Yu. Kloss, P.V. Shuvalov, F.G. Tcheremissine**
Procedia Computer Science ICCS, 2010, **1**, 1083. DOI:10.1016/j.procs.2010.04.120.
30. **Yu.A. Anikin, E.P. Derbakova, O.I. Dodulad, Yu.Yu. Kloss, D.V. Martynov, O.A. Rogozin, P.V. Shuvalov, F.G. Tcheremissine**
Procedia Computer Science ICCS 2010, 2010, **1**, 735.
31. **Ю.Ю. Клосс, Ф.Г. Черемисин, П.В. Шувалов**
Вычислительные методы и программирование, 2010, **11**, 144.
32. **O.I. Dodulad, Yu.Yu. Kloss, D.V. Martynov, O.A. Rogozin, P.V. Shuvalov, F.G. Tcheremissine**
Proc. 8th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, August 21-25, 2011, Moscow, Russia, 2011, 1.
33. **О.И. Додулад, Ю.Ю. Клосс, Д.В. Мартынов, О.А. Рогозин, В.В. Рябченков, П.В. Шувалов, Ф.Г. Черемисин**
Нано- и микросистемная техника, 2011, **2**, 12.
34. **Ю.Ю. Клосс, Д.В. Мартынов, Ф.Г. Черемисин**
Вычислительные методы и программирование, 2011, **12**, 24.
35. **О.И. Додулад, Ю.Ю. Клосс, Ф.Г. Черемисин, В.В.Рябченков**
Вычислительные методы и программирование, 2011, **12**, 40.
36. **Ю.Ю. Клосс, Ф.Г. Черемисин, П.В. Шувалов**
Вестник компьютерных и информационных технологий, 2011, № 5, 21.
37. **Ю.Ю. Клосс, Д.В. Мартынов**
Вычислительные методы и программирование, 2012, **13**, 90.
38. **Ю.Ю. Клосс, Ф.Г. Черемисин, Н.И. Хохлов, Е.П. Дербакова, Ю.А. Аникин, О.А. Рогозин, П.В. Шувалов**
Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010613640, 2010.
39. **O.I. Dodulad, Yu.Yu. Kloss, D.O. Savichkin, F.G. Tcheremissine**
Вакuum, 2014, **109**, 360. DOI:10.1016/j.vacuum.2014.06.019
40. **Ф.Г. Черемисин**
Физико-химическая кинетика в газовой динамике, 2007, (<http://chemphys.edu.ru/media/published/2007-10-22-001.pdf>).
41. **Ф.Г. Черемисин**
Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 2012, **52**, № 2, 270.
42. **O. I. Dodulad, I.D. Ivanova, Yu.Yu. Kloss, P.V. Shuvalov, F.G. Tcheremissine**
AIP Conf. Proc., 2012, **1501**, 816. DOI:<http://dx.doi.org/10.1063/1.4769626>.
43. **Ю.А. Аникин, Ю.Ю. Клосс, Д.В. Мартынов, Ф.Г. Черемисин**
Нано- и микросистемная техника, 2010, **8**, 6.
44. **Ю.Ю. Клосс, Д.В. Мартынов, Ф.Г. Черемисин**
Информационные технологии, 2010, **10**(170), 30.
45. **Ю.Ю. Клосс, Д.В. Мартынов, Ф.Г. Черемисин**
Журнал технической физики, 2011, **81**, 141.
46. **Ю.Ю. Клосс, Д.В. Мартынов, Ф.Г. Черемисин**
Вычислительные методы и программирование, 2011, **12**, 16.
47. **Yu.A. Anikin, O.I. Dodulad, Yu.Yu. Kloss, D.V. Martynov, P.V. Shuvalov, F.G. Tcheremissine**
Nanotech 2012 Conference Proceedings – NSTI-Nanotech, 2012, **2**, 617.
DOI:10.1088/1742-6596/362/1/012037.
48. **Yu.A. Anikin, O.I. Dodulad, Yu.Yu. Kloss, D.V. Martynov, P.V. Shuvalov, F.G. Tcheremissine**
J. Phys.: Conf. Ser., 2012, **362**, 012037.
49. **Ю.Ю. Клосс, Д.В. Мартынов, Ф.Г. Черемисин**
Журнал технической физики, 2012, **82**, № 4, 25.
50. **I.I. Bazhenov, O.I. Dodulad, I.D. Ivanova, Y.Y. Kloss, V.V. Rjabchenkov, P.V. Shuvalov, F.G. Tcheremissine**
Proc. 13th Intern. Conf. on Mathematical Methods in Science and Eng. Spain, 2013, p. 246.
51. **Yu.A. Anikin, O.I. Dodulad, Yu.Yu. Kloss, D.V. Martynov, P.V. Shuvalov, F.G. Tcheremissine**
Вакuum, 2012, **86**, 1770. DOI:10.1016/j.vacuum.2012.02.024.
52. **Ю.Ю. Клосс, Д.В. Мартынов, Ф.Е. Черемисин**
Патент 2462615 РФ, 2012.
53. **Д. Гирифельдер, Ч. Кертисс, Р. Берд**
Молекулярная теория газов и жидкостей. - М.: Изд-во иностр. лит., 1961, с. 976.
54. **Д. Ферцигер, Г. Канер**
Математическая теория процессов переноса в газах. - М.: Мир, 1976, с. 496.

[illegible]

Modeling and Analysis of Gas-Kinetic Flow Processes on the Base of Boltzmann Kinetic Equation for the Solution of Nuclear Technology Problems*

Yury Yu. Kloss –
National Research Centre "Kurchatov Institute"
1, Akademika Kurchatova Sq.,
Moscow 123182, Russia
e-mail: kl@lokip.ru

Elena P. Derbakova –
National Research Center “Kurchatov Institute”
1, Akademika Kurchatova Sq.,
Moscow 123182, Russia
e-mail: kl@lokip.ru

Valeriya G. Grishina –
National Research Center “Kurchatov Institute”
1, Akademika Kurchatova Sq., Moscow
Moscow 123182, Russia
e-mail: kl@lokup.ru

Oleg I. Dodulad –
National Research Center “Kurchatov Institute”
1, Akademika Kurchatova Sq.,
Moscow 123182, Russia
e-mail: kl@lokip.ru

Aleksandr V. Morozov –
National Research Center
“Kurchatov Institute”
1, Akademika Kurchatova Sq.,
Moscow 123182, Russia
e-mail: kl@lokip.ru

Pavel V. Shuvalov –
National Research Center
“Kurchatov Institute”
1, Akademika Kurchatova Sq.,
Moscow 123182, Russia
e-mail: kl@lokip.ru

Felix G. Tcheremissine –
Dorodnicyn Computing Centre of RAS
40, Vavilov Str.,
Moscow, 119333, Russia
e-mail: felix.tcher@yandex.ru

Abstract

The paper presents results from simulation of gas flows in micro devices by solving the Boltzmann kinetic equation. The study covered slow and ultrasonic flows. The simulation was performed using problem-solving environments developed by the authors on the basis of the conservative discrete-ordinate projection method for solving the Boltzmann equation.

Keywords: kinetic equation, projective method, problem solving environments, gas-kinetic processes in microdevices.

* *The work was financially supported by RFBR (projects NN 13-08-00903, 12-08-00940, 12-08-00656, 13-08-00859, 14-08-01250, 15-08-00990, 15-08-01142, 13-07-00437, 14-07-00775 and 15-07-02025).*

References

1. F.G. Tcheremissine
Zh. Vychisl. Mat. Mat. Fiz. [Comput. Math. Math. Phys.], 1970, **10**, 54 (in Russian).
2. V.V. Aristov, F.G. Tcheremissine
Dokl. Akad. Nauk USSR [Dokl. Phys.], 1976, **231**, 49 (in Russian).
3. F.G. Tcheremissine
Conservative discrete ordinates method for solving Boltzmann kinetic equation, Communications on Applied Mathematics, Computing Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 1996, p. 50.
4. F.G. Cheremisin
Dokl. Phys., 1997, **42**, 607.
5. F.G. Tcheremissine
Comput. Math. Math. Phys., 2006, **46**, 315. DOI:10.1134/S0965542506020138.
6. O.I. Dodulad, F.G. Tcheremissine
AIP Conf. Proc., 2012, **1501**, 302. DOI: 10.1063/1.4769529.
7. S.E. Vargo, E.P. Muntz, G.R. Shiflett, W.C. Tang
J. Vac. Sci. Technol. A, 1999, **17**, 2308. DOI: http://dx.doi.org/10.1116/1.581765.
8. Y.L. Han, E.P. Muntz, A. Alexeenko, M. Young
Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering, 2007, **11**, 151. DOI:10.1080/15567260701337209.
9. K. Aoki, P. Degond, L. Mieussens, M. Nishioka, S. Takata
1079, Proc. of 25-th Intern. Symposium Rarefied Gas Dynamics, Novosibirsk, Russia, 2007.
10. K. Aoki, P. Degond, L. Mieussens
Commun. Comput. Phys., 2009, **6**, 919.
11. S. Takata, H. Umetsu
AIP Conf. Proc., 2011, **1333**, 998. DOI: http://dx.doi.org/10.1063/1.3562776.
12. S. Takata, H. Sugimoto, S. Kosuge
Eur. J. Mech. B-Fluid., 2007, **26**, 155. DOI:10.1016/j.euromechflu.2006.05.002.
13. H. Sugimoto, A. Shinotou
AIP Conf. Proc., 2011, **1333**(1), 784. DOI: http://dx.doi.org/10.1063/1.3562742.
14. H. Sugimoto
25th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, Saint-Petersburg, July 21-28, 2006, 1.
15. M. Knudsen
Ann. Phys., 1910, **31**, 205.
16. M. Knudsen
Ann. der Phys., 1910, **338**, 1435. DOI: 10.1002/andp.19103381618
17. O.I. Dodulad, Yu.Yu. Kloss, F.G. Tcheremisin, P.V. Shuvalov
Math. Models Comput. Simul., 2010, **22**(6), 99 (in Russian).
18. Yu.Yu. Kloss, V.V. Ryabchenkov, F.G. Tcheremissine, P.V. Shuvalov
Math. Models Comput. Simul., 2011, **3**, 744. DOI:10.1134/S2070048211060044
19. Yu.Yu. Kloss, F.G. Tcheremissine, P.V. Shuvalov
Comput. Math. Math. Phys., 2010, **50**, N 6, 1093. DOI:10.1134/S096554251006014X.
20. O.I. Dodulad, Yu.Yu. Kloss, F.G. Tcheremissine,
Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoi dinamike [Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics], 2010, 10 (http://chemphys.edu.ru/media/published/004_%D0%94%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BB%D0%B0%D0%B4_2009-12-21-001.pdf) (in Russian).
21. V.G. Grishina, O.I. Dodulad, Yu.Yu. Kloss, F.G. Tcheremissine
Proceedings of 19th International Shock Interaction Symposium. Moscow, Russia, August 31 – September 3, 2010, 1.
22. Yu.Yu. Kloss, G.S. Kolyadko, P.V. Shuvalov, F.G. Tcheremissine
Proceedings of 19th International Shock Interaction Symposium. Moscow, Russia, August 31 – September 3, 2010, 4.
23. Yu.Yu. Kloss, P.V. Shuvalov, F.G. Tcheremissine
Proceedings 27 Intern. Symp. on Shock Waves (ISSW27), St. Petersburg, Russia, 2009, 363.
24. N.M. Korobov
Theoretiko-chislavye metody v priblizhennom analize, Moscow, Fizmatgiz, 1963, pp. 224.
25. O.I. Dodulad, Yu.Yu. Kloss, F.G. Tcheremissine
Trudy 27 Akademicheskikh chtenij po kosmonavtike [XXXIX Academic Space Conference dedicated to the memory of academician Korolev S.P. and other prominent russian scientists], Moscow, 2013, pp. 198-200.
26. O.I. Dodulad, Yu.Yu. Kloss, F.G. Tcheremissine
Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoi dinamike [Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics], 2013, 14 (http://chemphys.edu.ru/media/published/5.pdf) (in Russian).
27. Yu.Yu. Kloss, N.I. Hohlov, F.G. Tcheremissine, B.A. Shurygin
Informatsionnye Protessy [Information Processes], 2007, **7**, 425 (in Russian).
28. Yu.Yu. Kloss, F.G. Cheremisin, N.I. Khokhlov, B.A. Shurygin
Atomic Energy, 2008, **105**, 270. DOI: 10.1007/s10512-009-9096-3.
29. Yu.Yu. Kloss, P.V. Shuvalov, F.G. Tcheremissine
Procedia Computer Science ICCS, 2010, **1**, 1083. DOI:10.1016/j.procs.2010.04.120.
30. Yu.A. Anikin, E.P. Derbakova, O.I. Dodulad, Yu.Yu. Kloss, D.V. Martynov, O.A. Rogozin, P.V. Shuvalov, F.G. Tcheremissine
Procedia Computer Science ICCS, 2010, **1**, 735.
31. Yu.Yu. Kloss, F.G. Tcheremissine, P.V. Shuvalov
Vychislitelnye Metody i Programirovanie [Numerical methods and programming], 2010, **11**, 144 (in Russian).
32. O.I. Dodulad, Yu.Yu. Kloss, D.V. Martynov, O.A. Rogozin, P.V. Shuvalov, F.G. Tcheremissine
Proc. 8th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, August 21-25, 2011, Moscow, Russia, 2011, 1.
33. O.I. Dodulad, Yu.Yu. Kloss, D.V. Martynov, O.A. Rogozin, V.V. Rjabchenkov, P.V. Shuvalov, F.G. Tcheremissine
Nano- i Mikrosistemnaya tekhnika [Journal of Nano and Microsystem Technique], 2011, **2**, 12 (in Russian).
34. Yu.Yu. Kloss, D.V. Martynov, F.G. Tcheremissine
Vychislitelnye Metody i Programirovanie [Numerical methods and programming], 2011, **12**, 220 (in Russian).
35. O.I. Dodulad, Yu.Yu. Kloss, F.G. Tcheremissine, V.V. Rjabchenkov-
Vychislitelnye Metody i Programirovanie [Numerical methods and programming], 2011, **12**, 44 (in Russian).
36. Yu.Yu. Kloss, F.G. Tcheremissine, P.V. Shuvalov
Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii [Herald of Computer and Information Technologies], 2011, **5**, 21 (in Russian).
37. Yu.Yu. Kloss, D.V. Martynov
Vychislitelnye Metody i Programirovanie [Numerical methods and programming], 2012, **13**, 90 (in Russian).
38. Ю.Ю. Клосс, Ф.Г. Черемисин, Н.И. Хохлов, Е.П. Дербакоева, Ю.А. Аникин, О.А. Рогозин, П.В. Шувалов
Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010613640, 2010.
39. O.I. Dodulad, Yu.Yu. Kloss, D.O. Savichkin, F.G. Tcheremisin
Vacuum, 2014, **109**, 360. DOI:10.1016/j.vacuum.2014.06.019
40. F.G. Tcheremissine
Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoi dinamike [Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics], 2007, 10 (http://chemphys.edu.ru/media/published/2007-10-22-001.pdf) (in Russian).
41. F.G. Tcheremissine
Comput. Math. Math. Phys., 2012, **52**, 252. DOI:10.1134/S0965542512020054
42. O.I. Dodulad, I.D. Ivanova, Yu.Yu. Kloss, P.V. Shuvalov, F.G. Tcheremissine
AIP Conf. Proc., 2012, **1501**, 816. DOI: http://dx.doi.org/10.1063/1.4769626
43. Yu.A. Anikin, Yu.Yu. Kloss, D.V. Martynov, F.G. Tcheremissine
Nano- i Mikrosistemnaya tekhnika [Journal of Nano and Microsystem Technique], 2010, **8**, 6 (in Russian).
44. Yu.Yu. Kloss, D.V. Martynov, F.G. Tcheremissine
Informacionnye tekhnologii [Information Technologies], 2010, **10**(170), 30 (in Russian).
45. Yu.Yu. Kloss, D.V. Martynov, F.G. Cheremisin
Technical Physics, 2011, **56**, 1040. DOI:10.1134/S1063784211070127
46. Yu.Yu. Kloss, D.V. Martynov, F.G. Tcheremissine
Vychislitelnye Metody i Programirovanie [Numerical methods and programming], 2011, **12**, 20 (in Russian).
47. Yu.A. Anikin, O.I. Dodulad, Yu.Yu. Kloss, D.V. Martynov, P.V. Shuvalov, F.G. Tcheremissine
Nanotech 2012 Conference Proceedings – NSTI-Nanotech, 2012, **2**, 617. DOI:10.1088/1742-6596/362/1/012037.
48. Yu.A. Anikin, O.I. Dodulad, Yu.Yu. Kloss, D.V. Martynov, P.V. Shuvalov, F.G. Tcheremissine
J. Phys.: Conf. Ser., 2012, **362**, 012037. DOI:10.1088/1742-6596/362/1/012037.
49. Yu.Yu. Kloss, D.V. Martynov, F.G. Cheremisin
Technical Physics, 2012, **57**, 451. DOI:10.1134/S1063784212040159.
50. I.I. Bazhenov, O.I. Dodulad, I.D. Ivanova, Y.Y. Kloss, V.V. Rjabchenkov, P.V. Shuvalov, F.G. Tcheremissine
Proc. 13th Intern. Conf. on Mathematical Methods in Science and Eng. Spain, 2013, p. 246.
51. Yu. Anikin, O.I. Dodulad, Yu.Yu. Kloss, D.V. Martynov, P.V. Shuvalov, F.G. Tcheremissine
Vacuum, 2012, **86**, 1770. DOI:10.1016/j.vacuum.2012.02.024.
52. Yu.Yu. Kloss, D.V. Martynov, F.G. Cheremisin
Pat. RU 2462615, 2012 (in Russian).
53. D. Hirschfelder, Ch. Curtiss, R. Bird
Molecular Theory of Gases and Liquids, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1954.
54. J.H. Ferziger, H.G. Kaper
Mathematical Theory of Transport Processes in Gases, North-Holland Publishing Company, Amsterdam-London, 1972.

Управление смешанными группами пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов в условиях единого информационно-управляющего поля*

В.Н. Евдокименков, М.Н. Красильщиков

Описана концептуальная математическая модель единого информационно-управляющего поля как среды функционирования смешанной группы пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов. Опираясь на отдельные свойства этой модели, сформирован облик распределенной системы интеллектуального управления смешанной группой летательных аппаратов, объединяющей внебортную и бортовую компоненты. Рассмотрены алгоритмы предполетного планирования действий смешанной группы, составляющие основу внебортной компоненты. Изложены алгоритмы распознавания тактических ситуаций и выработки управляющих решений, реализованные в составе бортовой компоненты. Приведены примеры, иллюстрирующие работу предложенных алгоритмов.

Ключевые слова: беспилотный и пилотируемый летательный аппарат, система интеллектуального управления, информационно-управляющее поле.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 09-08-13540-офи и 15-08-01120).

Введение

Статья отражает результаты исследований, проведенных в рамках проектов РФФИ №№ 09-08-13540-офи_ц «Разработка методов и алгоритмов интеллектуального управления смешанной группой пилотируемых и беспилотных ЛА как сложной технической системой в интересах обеспечения необходимого уровня ее функциональной надежности» и 15-08-01120 «Разработка научных основ, алгоритмического и программно-математического обеспечения бортовых систем интеллектуальной индивидуально-адаптированной поддержки летчика при выполнении типовых полетных режимов».

В настоящее время термин «сетевая концепция» концепция ведения боевых действий, основу которой составляет единое информационно-управляющее поле (ЕИУП), создаваемое на базе разветвленных автоматизированных сетей разведки, связи, навигации и управления, является отражением преобладающей тенденции развития вооруженных сил. Эта концепция распространяется и на боевые действия авиационных комплексов, неотъемлемым элементом которых, наряду с пилотируемыми, становятся беспилотные летательные аппараты (ЛА) различного назначения. Таким образом, переход к

смешанным группам пилотируемых и беспилотных ЛА, функционирующим в условиях ЕИУП, становится генеральным направлением развития мировой боевой авиации. В связи с этим актуальной является проблема управления подобными смешанными группами ЛА с учетом тех возможностей, которые предоставляет ЕИУП.

Заметим, что к настоящему моменту, несмотря на широкое использование самого термина «единое информационно-управляющее поле», не существует его общепринятого определения, концепции построения и, как следствие, конструктивных математических моделей ЕИУП, которые могли бы быть использованы в интересах решения задач управления сложными техническими системами, какой является смешанная группа пилотируемых и беспилотных ЛА. С учетом этого в статье предложена концептуальная математическая модель ЕИУП как



ЕВДОКИМЕНКОВ
Вениамин Николаевич
профессор,
Московский авиационный институт



КРАСИЛЬЩИКОВ
Михаил Наумович
профессор,
Московский авиационный институт

многоуровневой иерархической системы, объединяющей квазистационарную и нестационарную компоненты.

Опираясь на отдельные свойства этой модели, сформирован облик распределенной интеллектуальной системы управления смешанной группой ЛА, которая содержит две компоненты: внебортовую и бортовую. Внебортовая компонента входит в состав автоматизированного комплекса планирования применения пилотируемых и беспилотных ЛА. Бортовая компонента включает в себя комплекс аппаратных средств и программно-математического обеспечения, реализованных непосредственно на пилотируемых и беспилотных ЛА в интересах оценки сложившихся в полете ситуаций и решения ситуационных задач на всех этапах полета.

Рассмотрены алгоритмы, реализуемые в составе внебортовой и бортовой компонент системы, основу которых составили как известные работы в данной предметной области, так и результаты собственных исследований авторов.

Концептуальная математическая модель информационно-управляющего поля как среды функционирования смешанных групп ЛА

С учетом современных представлений об элементах ЕИУП концептуальная модель такого поля представляет собой многоуровневую иерархическую систему, объединяющую две компоненты [1]:

- 1) квазистационарную информационно-разведывательную компоненту, генерирующую данные, остающиеся неизменными в процессе деятельности авиационной группы;
- 2) нестационарную (пространственно-временную) компоненту, выходом которой является информация, непрерывно обновляемая с течением времени с учетом изменения пространственного положения источников и потребителей навигационно-разведывательной информации.

В рамках такой иерархической структуры авторами разработаны математические модели для формализованного описания перечисленных выше компонент ЕИУП. Приведем самые общие характеристики этих моделей.

Основу математической модели квазистационарной компоненты ЕИУП составляют реляционные базы данных, интегрирующие неизменные в процессе выполнения боевой задачи характеристики искусственных и естественных навигационных полей, метеорологическую и картографическую информацию, цифровые модели фоноцелевой обстановки.

Существенно более сложной задачей стала разработка математической модели нестационарной компоненты ЕИУП, которая должна обеспечивать возможность пространственно-временного представления состояний ЕИУП. Ситуация осложняется тем, что ЕИУП является динамическим полем. Его структура и точностные характеристики могут изменяться во времени, в том числе с учетом относительного пространственного положения источников и потребителей информации.

В работе [1] приведено исчерпывающее формализованное описание ЕИУП в виде матрицы пространственно-временных состояний (МПВС), имеющей трехуровневую структуру.

Первый уровень образует структурная МПВС, которая конкретизирует состав потребителей и приемников ЕИУП, находящихся в состоянии информационного обмена в тот или иной момент выполнения целевой задачи. Второй уровень представляет информационная МПВС, элементы которой отражают конкретный состав и значения параметров, поступающих от источника ЕИУП к потребителю, находящихся в состоянии информационного обмена в тот или иной момент выполнения целевой задачи. Третий уровень образует ковариационная МПВС, характеризующая ошибки в измеренных значениях параметров, поступающих от источника ЕИУП к потребителю, находящихся в состоянии информационного обмена в каждый момент выполнения целевой задачи.

В рамках такой трехуровневой МПВС ЕИУП в виде структурной, информационной и ковариационной матриц в работе [1] сформулированы критерии, устанавливающие требования к ЕИУП, реализация которых необходима для успешного решения целевых задач смешанной тактической группой ЛА.

Алгоритмы предполетного планирования действий смешанной группы ЛА

Как указывалось выше, внебортовая компонента распределенной системы интеллектуального управ-

местоположения комплексов ПВО противника.

1) матрица R, определяющая оптимальный вариант целераспределения, т.е. вариант распределения ЛА смешанной группы по целевым объектам с учетом их значимостей;

Основу алгоритма составляет предложенное в работе [7] для случая, когда положение источников угрозы известно точно, решение задачи оптимального целераспределения и формирования маршрутов движения ЛА к целям на основе триангуляции Делоне, которая накрывает весь район целевого применения группы ЛА сетью треугольников. Вершинами этих треугольников выступают точки местоположения источников потенциальных угроз. С целью определения наилучшего варианта маршрутов выхода ЛА на целевые объекты использована критериальная функция, которая оценивает предпочтительность каждого из участков маршрута с учетом двух факторов: опасности потери ЛА при его обнаружении средствами ПВО и ожидаемого расхода топлива при движении ЛА по данному участку маршрута. Оптимальным с точки зрения указанных факторов полагается такой участок маршрута, реализация которого требует наименьшего расхода топлива при минимуме опасности обнаружения ЛА средствами ПВО. По аналогии с работой [7] эту опасность оценивали по удалению ЛА от ближайшего средства ПВО.

Поскольку рассматриваемый алгоритм [7] обеспечивает решение задачи планирования в ситуации, когда группа образована однотипными ЛА, действующими при наличии достоверных сведений об источниках угрозы в районе целевого применения, была проведена его модификация, позволившая учесть: различную «стоимость» потери пилотируемых и беспилотных ЛА при решении задачи целераспределения, а также априорную статистику относительно координат расположения постов ПВО противника. Для получения решения задачи предполетного планирования в условиях неопределенности данных о местоположении постов ПВО противника использована комбинированная схема на основе алгоритма [7] и метода Монте-Карло.

В качестве примера работы алгоритма ниже рассмотрена задача планирования действий смешанной группы ЛА, объединяющей четыре беспилотных и один пилотируемый ЛА, участвующих в операции

1) состав смешанной группы ЛА, привлекаемой для решения задачи поражения (разведки) группы наземных объектов;

3) заданная высота (эшелон) движения каждого ЛА;

4) заданная постоянная скорость каждого ЛА;

5) весовые коэффициенты, определяющие ценность каждого из ЛА с учетом его типа (пилотируемый или беспилотный), статуса (ведущий – ведомый), боевого оснащения и т.д.;

6) множество наземных целевых объектов;

7) известные координаты местоположения каждого из целевых объектов;

8) весовые коэффициенты, определяющие значимость каждого из целевых объектов как объекта атаки;

9) множество комплексов ПВО, располагаемых в районе целевого применения смешанной группы ЛА;

10) функции плотности, характеризующие статистическую неопределенность данных о координатах

Таблица 1. Координаты начального положения ЛА смешанной группы и значения коэффициентов, устанавливающих их важность

U_i	$X_{U_i}, \text{км}$	$Y_{U_i}, \text{км}$	k_{U_i}
U_1 (БЛА)	350	750	0.1
U_2 (БЛА)	150	650	0.1
U_3 (БЛА)	100	400	0.1
U_4 (БЛА)	100	300	0.1
U_5 (ПЛА)	400	100	0.9

Таблица 2. Координаты начального положения целевых объектов и значения коэффициентов, устанавливающих их ценность как объектов применения смешанной группы ЛА

C_i	X_{C_i} KM	Y_{C_i} KM	k_{C_i}
C_1	525	250	0.1
C_2	235	435	0.6
C_3	760	480	0.3
C_4	620	650	0.2
C_5	400	100	0.9

Таблица 3. Параметры функций плотности совместного распределения значений координат точек расположения источников угрозы

P_k	m_{xk}, KM^2	m_{yk}, KM^2	$\sigma_{xk}^2, \text{KM}^2$	$\sigma_{yk}^2, \text{KM}^2$	r_k
P_1	100	500	50	100	0.42
P_2	300	200	50	150	0.23
P_3	640	100	170	90	-0.16
P_4	850	350	50	130	0.31
P_5	750	650	10	100	0.16
P_6	500	750	25	15	0.10
P_7	370	600	75	75	0.01
P_8	650	430	30	100	-0.18

нанесения удара по комплексу из четырех наземных объектов. Данные о начальном расположении ЛА и значения коэффициентов, устанавливающих их статус (важность) в группе, представлены в *таблице 1*. В *таблице 2* приведены данные по расположению целевых объектов и значениям коэффициентов, определяющих их ценность как объектов атаки.

Предполагалось также, что в районе применения смешанной группы ЛА присутствуют восемь постов ПВО противника, оснащенные радиолокационными средствами обнаружения воздушных целей и ракет-

ными средствами поражения. Информация о постах ПВО ограничена знанием гауссовских функций плотности $p(x_{pk}, y_{pk}), k = 1, \dots, 8$ совместного распределения координат точек их расположения (табл. 3).

Используя метод Монте-Карло, в соответствии с функциями плотности $p(x_{pk}, y_{pk})$, $k = 1, \dots, 8$ моделировали реализации $p(x_{pk}^t, y_{pk}^t)$, $k = 1, \dots, 8$, $t = 1, \dots, 1000$, задающие положение точек расположения постов ПВО. Для каждого конкретного набора реализаций выполнялся алгоритм [7], результатом работы которого, как и в рассмотренном ранее примере, являются:

- оптимальная матрица целераспределения R_i^* размера 5×4 , определяющая наилучший с учетом критерия вариант распределения ЛА смешанной группы по целевым объектам. Каждый элемент R_{ij} $i = 1, \dots, 5; j = 1, \dots, 4$ этой матрицы может принимать одно из двух возможных значений $R_{ij} = 1$, если в качестве приоритетной цели для i -го ЛА выбран j целевой объект и $R_{ij} = 0$ - в противном случае;

- матрица S_i^* размера 5×15 , определяющая в рамках конкретного варианта целераспределения, задаваемого структурой матрицы R_i^* , оптимальный в маршрут выхода ЛА смешанной группы на назначенную цель (порядок обхода серединных точек триангуляции Делоне). То есть элементы S_{ij} , $j = 1, \dots, 15$ i -ой строки этой матрицы принимают значения $0, 1, \dots, 15$, где значение 1 указывает на то, что соответствующая серединная точка триангуляции Делоне соответствует первому промежуточному пункту маршрута, значение 15 – последнему. Значение 0 указывает на то, что соответствующая серединная точка триангуляции Делоне не включена в маршрут.

Описанную процедуру в соответствии со схемой метода статистических испытаний (Монте-Карло) повторяли 1000 раз, в результате чего было получено 1000 реализаций критериальной функции и соответству-

ющих им матриц R_i^* , S_i^* . Анализ полученных реализаций показал, что в 90% случаев наилучшее решение задачи предполетного планирования достигалось на паре матриц R^* , S^* с ненулевыми компонентами. Элементы $R_{14}^* = R_{23}^* = R_{32}^* = R_{42}^* = R_{51}^* = 1$ матрицы R^* определяют факт назначения ЛА смешанной группы соответствующих целевых объектов. Элементы $S_{14}^* = 1$, $S_{15}^* = 2$, $S_{15}^* = 2$, $S_{19}^* = 3$, $S_{23}^* = 1$, $S_{24}^* = 1$, $R_{25}^* = 2$, $S_{29}^* = 3$, $S_{212}^* = 4$, $S_{31}^* = 1$, $S_{41}^* = 1$, $S_{58}^* = 1$, матрицы S^* задают для каждого ЛА порядок обхода промежуточных пунктов маршрута.

На рисунке 2 представлены результаты статистических испытаний, где темные зоны соответствуют областям неопределенности расположения постов ПВО противника, треугольными символами помечены ЛА смешанной группы, крестами – целевые объекты. Отметим, что пара матриц R^* , S^* задает только оптимальный вариант целераспределения и последовательность обхода серединных точек отрезков, соединяющих соответствующие вершины триангуляции Делоне. В процессе статистических испытаний для каждой реализации (x_{pk}^t, y_{pk}^t) , $k = 1, \dots, 8$, $t = 1, \dots, 1000$, определяли координаты (x_{sp}^t, y_{sl}^t) , $l = 1, \dots, 15$, $t = 1, \dots, 1000$ серединных точек отрезков, соединяющих соответствующие вершины триангуляции Делоне. На плоскости XOY эти реализации в совокупности образуют точки, ограниченные некоторой областью (на рисунке 2 эти области обозначены как G_1 , G_4 , G_5 , G_9 , G_{12}). Координаты (x_{sp}, y_{sl}) , $l = 1, \dots, 8$ связаны с координатами (x_{pk}, y_{pk}) , $k = 1, \dots, 8$, задающими положение вершин триангуляции Делоне нелинейной зависимостью. Поэтому, несмотря на то, что плотность $p(x_{pk}, y_{pk})$ совместного распределения значений (x_{pk}, y_{pk}) полагалась гауссовской, распределение значений (x_{sp}, y_{sl}) , $l = 1, \dots, 15$ не является нормальным распределением. Это обстоятельство затрудняет точное построение областей G_1 , G_4 , G_5 , G_9 , G_{12} . С учетом этого в алгоритме использована аппроксимация указан-

ных областей доверительными эллипсами. То есть в качестве областей G_1 , G_4 , G_5 , G_9 , G_{12} использованы доверительные эллипсы, которым с вероятностью 0.95 принадлежали соответствующие серединные точки. В качестве координат промежуточных пунктов маршрутов ЛА в рамках оптимального варианта целераспределения использованы координаты центров доверительных эллипсов.

Алгоритмы распознавания тактических ситуаций и принятия решений в структуре бортовой компоненты интеллектуальной системы управления смешанной группой ЛА

Алгоритмы распознавания тактических ситуаций и принятия решений, составляющие основу бортовой компоненты системы интеллектуального управления смешанной группой пилотируемых и беспилотных ЛА, можно объединить в две группы:

- 1) алгоритмы распознавания тактических ситуаций и принятия решений, использующие элементы искусственного интеллекта;
- 2) алгоритмы распознавания тактических ситуаций и принятия решений на основе математических моделей и методов оптимизации.

В качестве наиболее предпочтительных подходов к разработке алгоритмов распознавания тактических ситуаций и принятия решений в системах с искусственным интеллектом выделим следующие:

- 1) на основе продукционных систем с нечеткой логикой;

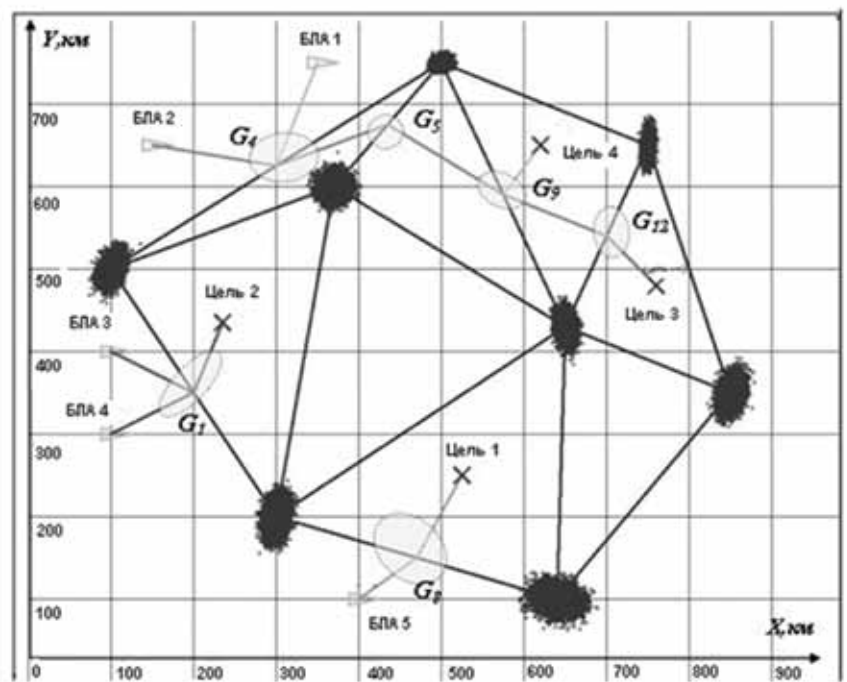


Рис. 2. Результаты решения задачи предполетного планирования действий смешанной группы ЛА по комплексу наземных объектов в условиях статистической неопределенности расположения источников угрозы.

Литература

1. В.Н. Евдокименков, М.Н. Красильщиков
Полет, 2010, № 7, 20.
2. K.E. Nygard, P.R. Chandler, M. Pachter
Proc. of the American Control Conference, Arlington, Texas, June 2001, p. 1853.
3. C. Schumacher, P. Chandler, M. Pachter, L.S. Pachter
AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Austin, Texas, August 2003, p. 5664.
4. E. Chantry, M. Barbier, J.L. Farges
in ECAI'04 – Workshop on "Planning and Scheduling: Bridging Theory to Practice", August 22-23, 2004, Valencia, Spain.
5. E. Chantry, M. Barbier, J.L. Farges
5-th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, July 5–7, 2004, Instituto Superior Técnico, Lisbon, Portugal.
6. F. Kamrani, Lozano, G. Marianela, R. Ayani
Proceedings of the 20-th Annual European Simulation and Modelling Conference, ESM'2006, Toulouse, France, October, 2006, pp. 215–238.
7. R. Zhu, D. Sun, Z. Zhou, J. Guid.
Control Dynam., 2005, 28, № 5, 1068. DOI: 10.2514/1.14412.

English

Smart Control of Mixed Groups of Manned and Unmanned Aircraft within a United Information and Control Field*

Mikhail N. Krasilshchikov –
Professor
Moscow Aviation Institute
4, Volokolamskoe shosse,
Moscow, 125993, Russia
e-mail: mnkr@mail.ru

Ekaterina S. Kovalenko –
Professor
Moscow Aviation Institute
4, Volokolamskoe shosse,
Moscow, 125993, Russia
e-mail: evn@netland.ru

Abstract

A conceptual mathematical model of United Information & Control Field (UICF) is described. The field is viewed as a specific environment for operations of a mixed group of manned and unmanned aerial vehicles. A distributed intellectual control system for the mixed Group is outlined, it includes both onboard (airborne) and external components.

Algorithms for preflight planning of the mixed group are discussed, they represent the basis for the external component. The onboard component includes algorithms for both actual tactical situation recognition, smart control and decision making. Several examples illustrating operation of the mentioned algorithms are provided.

Keywords: unmanned and manned flight vehicles, intellectual control system, united information and control field.

References

1. V.N. Evdokimenkov, M.N. Krasilshchikov
Polyot, 2010, № 7, 20 (in Russian).
2. K.E. Nygard, P.R. Chandler, M. Pachter
Proc. of the American Control Conference, Arlington, Texas, June 2001, p. 1853.
3. C. Schumacher, P. Chandler, M. Pachter, L.S. Pachter
AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Austin, Texas, August 2003, p. 5664.
4. E. Chantry, M. Barbier, J.L. Farges
in ECAI'04 – Workshop on "Planning and Scheduling: Bridging Theory to Practice", August 22-23, 2004, Valencia, Spain.
5. E. Chantry, M. Barbier, J.L. Farges
5-th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, July 5–7, 2004, Instituto Superior Técnico, Lisbon, Portugal.
6. F. Kamrani, Lozano, G. Marianela, R. Ayani
Proceedings of the 20-th Annual European Simulation and Modelling Conference, ESM'2006, Toulouse, France, October, 2006, pp. 215–238.
7. R. Zhu, D. Sun, Z. Zhou, J. Guid.
Control Dynam., 2005, 28, № 5, 1068. DOI: 10.2514/1.14412.

*

The work was financially supported by RFBR (projects NN 09-08-13540-ofi_c and 15-08-01120).

Развитие теории создания волновых твердотельных гироскопов с металлическим резонатором^{*}

В.А. Матвеев, М.А. Басараб, Б.С. Лунин, Е.А. Чуманкин, А.В. Юрин

Рассмотрен ряд вопросов, возникающих при разработке волновых твердотельных гироскопов с металлическими резонаторами: конечно-элементное моделирование колебательных процессов в резонаторе, проводимое с целью оптимизации его параметров; влияние массового дисбаланса резонатора на его характеристики. Предложена новая технология балансировки резонатора, позволяющая реализовать массовое производство недорогих гироскопических датчиков общего применения при низкой трудоемкости и себестоимости процесса.

Ключевые слова: волновой твердотельный гироскоп, балансировка, метод конечных элементов.

*

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-08-09145).

Принцип действия волновых твердотельных гироскопов (ВТГ) основан на явлении прецессии упругих волн, возбужденных в осесимметричных телах (эффект Брайана [1]). Этот физический принцип открыл британский физик Дж. Брайан в конце XIX в. при исследовании движения волновой картины, возникающей при изгибных колебаниях тонкого кольца на вращающемся основании [1]. Если рассматривать упругое кольцо (либо кольцевую кромку оболочки вращения), то угловые скорости вращения кольца Ω и возбужденной в нем стоячей волны $\tilde{\Omega}$ неодинаковы и связаны простым соотношением:

$$\tilde{\Omega} = BF \cdot \Omega, \quad (1)$$

где BF – коэффициент Брайана.

Таким образом, при вращении основания стоячая волна движется относительно кольца, что объясняется действием кориолисовых сил инерции (рис. 1). При вращении резонатора точки пучности стоячей волны A, B, C, D совершают относительное движение со скоростями V_A, V_B, V_C, V_D и переносное движение с угловой скоростью Ω . Обозначим кориолисово ускорение элементов массы в точках A, B, C, D как $W_{KA}, W_{KB}, W_{KC}, W_{KD}$. Кориолисовы силы инерции $P_{KA}, P_{KB}, P_{KC}, P_{KD}$ приложенные в точках A, C и B, D , направлены в противоположные стороны и создают пары сил. В свою очередь, пары P_{KA}, P_{KC} и P_{KB}, P_{KD}

противоположны по направлению и в сумме дают равнодействующую пару кориолисовых сил инерции, модуль которой пропорционален значению угловой скорости вращения основания Ω . Эта пара сил вызывает прецессию стоячей волны относительно корпуса резонатора и в инерциальном пространстве.

Дж. Брайан рассмотрел частный случай равномерного вращения колеблющегося кольца. В 1960-х гг. Д. Линч [2] экспериментально доказал применимость этого эффекта в случае вращения кольца с переменной угловой скоростью. В.Ф. Журавлевым и Д.М. Климовым теоретически доказано, что эффект Брайана справедлив для любого закона вращения основания $\Omega(t)$ [3, 4]. Угол поворота стоячей волны $\varphi(t)$ относительно кольцевого резонатора при этом определяется формулой (2).

$$\varphi(t) = -\frac{2}{1+k^2} \int_0^t \Omega(\tau) d\tau, \quad (2)$$



МАТВЕЕВ
Валерий Александрович

профессор,
МГТУ им. Н.Э. Баумана



БАСАРАБ
Михаил Алексеевич

профессор,
МГТУ им. Н.Э. Баумана



ЛУНИН
Борис Сергеевич

МГУ им. М.В. Ломоносова



ЧУМАНКИН
Евгений Алексеевич

ОАО «АНПП «ТЕМП-АВИА»



ЮРИН
Алексей Владимирович

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Разработка подобных датчиков требует решения ряда научно-технических задач. Поскольку все основные характеристики такого прибора определяются свойствами резонатора, его конструкции и технологии производства должно быть уделено особое внимание. Ряд приложений датчиков общего применения требует виброустойчивости приборов в определенном диапазоне механических воздействий; это означает, что их конструкция должна исключать наличие собственных резонансов в заданном частотном диапазоне. Оптимизация конструкции резонатора позволяет достичь максимального (для выбранного материала резонатора) значения его добротности и повысить тем самым его точность. Эти задачи могут быть решены путем подбора параметров в ходе конечно-элементного моделирования колебательных процессов в резонаторе. На конечные характеристики резонатора большое влияние оказывает и массовый дисбаланс резонатора, который возникает из-за технологических погрешностей при изготовлении резонатора и должен быть исправлен путем его балансировки. Это одна из наиболее сложных и дорогих операций в технологии ВТГ. Массовое производство недорогих гироскопических датчиков требует от технологии балансировки не только достижения заданной точности, но и низкой трудоемкости и себестоимости процесса. Проводимые в течение нескольких лет исследования позволили авторскому коллективу развить теорию и разработать комплекс технологий, отвечающих этим требованиям [6–12]. Далее рассмотрим основные особенности разработанных технологий.

Основная задача конечно-элементного моделирования колебательных процессов в резонаторе ВТГ состоит в оптимальном выборе его геометрических параметров. Резонатор ВТГ характеризуется довольно широким спектром частот конструкции,

Вид колебаний по второй (основной) форме показан на *рисунке 2 б, с*. Рассчитанные собственные частоты конструкции составили: 1608.732, 1608.732, 7461.554, 7463.037, 20409.342, 20423.981 Гц. Измеренная в эксперименте частота резонатора по 2-й форме колебаний составляла 7524 Гц. Таким образом, погрешность выполненного расчета в среде COMSOL составила около 1%, что свидетельствует об адекватности данных численного эксперимента. Кроме изгибных колебаний кольцевой части оболочки, имеют место и другие колебания, а именно, колебания, связанные с дном резонатора. Подбирая конфигурацию дна, значения этих частот повышают до необходимого уровня.

Конечно-элементная формулировка задачи термоупругости основана

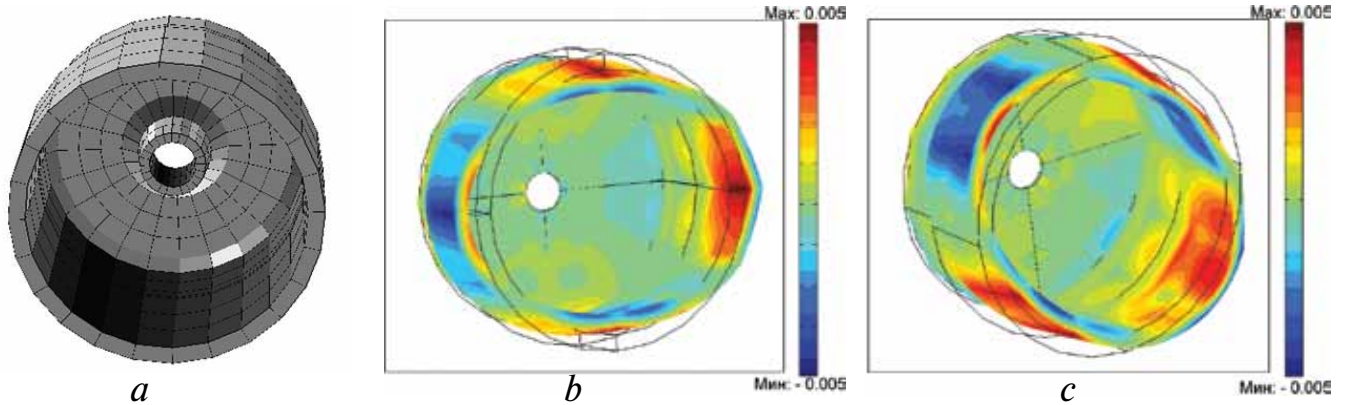


Рис. 2. Конечно-элементная аппроксимация геометрии резонатора (а); вторая форма колебаний резонатора и распределение температурного поля, вызванного термоупругими потерями в материале (b, c).

на приближенном методе решения связанных задач динамической теории упругости и нестационарной теплопроводности [14]. При этом дополнительно предполагалось, что резонатор находится в теплоизолированной среде, а теплообмен с внешней средой через донное отверстие отсутствует. Согласно теории термоупругости связь между векторами напряжений и деформаций устанавливается в следующем виде:

$$\sigma = D\varepsilon = D(\varepsilon_{el} - \varepsilon_T), \quad (3)$$

где ε_{el} , ε_T – тензоры упругих и температурных деформаций; σ – тензор напряжений; D – 6×6 тензор модулей упругости. Тензоры напряжений и деформаций состоят из x , y и z нормальных компонент и x - y , y - z и z - x касательных компонент.

Уравнения движения упругой среды получаются, если приравнять силу внутренних напряжений $\nabla \cdot \sigma$ к произведению ускорения на массу единицы объема тела (т.е. на его плотность) $\rho \ddot{u}$. Векторная форма уравнения движения показана ниже:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla \cdot \sigma. \quad (4)$$

Здесь ρ – объемная плотность; u – вектор перемещений.

Уравнения (3) и (4) образуют полную систему дифференциальных уравнений в частных производных для напряжений и деформаций. К выражениям (3) и (4) следует добавить граничные условия.

Связь деформации с температурой устанавливается с помощью законов термодинамики. Уравнение теплопроводности при малом термическом возмущении (т.е. при $(T - T_0)/T_0 \ll 1$) имеет вид

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = \dot{q}, \quad (5)$$

где $C_v = \rho C_p$ – объемная теплоемкость; C_p – удельная теплоемкость; $k(\chi)$ – коэффициент теплопроводности; $\dot{q}$ – тепловой источник, а именно, скорость тепловыделения в единице объема.

В случае термоупругого нагрева тепловой источник для изотропного материала определяется следующим образом:

$$\dot{q} = - \frac{E \alpha T_0}{(1 - 2\nu)} \frac{\partial e}{\partial t}, \quad (6)$$

где E – модуль Юнга; α – коэффициент теплового расширения; ν – коэффициент Пуассона; T_0 – температура окружающей среды (начальная температура); e – деформация расширения.

Для деформации расширения справедливо соотношение (7).

$$e = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \nabla \cdot u. \quad (7)$$

Будем искать решение для ΔT и U в виде

$$\Delta T = T - T_0 = e^{\lambda t} \Theta, \quad (8)$$

$$u = e^{\lambda t} U,$$

$$v = \dot{u} = e^{\lambda t} V,$$

где $\lambda = i\omega + \delta$.

Следует отметить, что Θ , U , V зависят только от координат и номера формы колебаний n . При моделировании рассматривали только вторую форму колебаний (рис. 2).

Используя стандартную схему Галеркина для метода конечных элементов, получим из уравнений (5)–(7) матричное уравнение для температуры Θ и перемещений U в узлах сетки:

Измерение вибрации стержня осуществляют с помощью двухкоординатного датчика вибрации. Электрические сигналы, пропорциональные амплитуде вибрации стержня, формируются четырьмя магнитоэлектрическими датчиками. Для измерения продольной вибрации центра масс резонатора (это необходимо для определения M_2 и φ_2) резонатор устанавливают горизонтально с помощью специального кронштейна, ориентируя его ось вдоль измерительной оси любого из двух каналов вибродатчика и используя этот канал для измерения.

При измерениях в резонаторе с предварительно устраненным расщеплением собственной частоты возбуждают стоячую волну с различной ориентацией θ и постоянной амплитудой, и для каждого случая определяют амплитуду вибрации стержня (в условных единицах). Пример такого измерения поперечной вибрации в декартовых координатах при определении параметров M_1, M_3 и φ_1, φ_3 приведен на рисунке 4.

Экспериментальные точки аппроксимируют косинусоидами с периодом π , их амплитуды и фазы определяют методом наименьших квадратов, вычисляя затем на основании уравнения (12) параметры M_1, M_3 и φ_1, φ_3 .

Например, для приведенных на рисунке 4 результатов эксперимента значения составили: $M_1=10$ отн. ед., $\varphi_1=-58.4^\circ$, $M_3=6.1$ отн. ед., $\varphi_3=44.1^\circ$. Определение параметров M_2 и φ_2 проводят аналогично.

Удаление неуравновешенной массы. Неуравновешенную массу можно удалить как непосредственно с рабочей части резонатора, так и со специальных балансировочных зубцов, расположенных на кромке резонатора [17, 18]. Оба метода имеют свои преимущества и недостатки. Удаление вещества с поверхности зубцов может осуществляться различными методами, но даже если структура материала существенно нарушается,

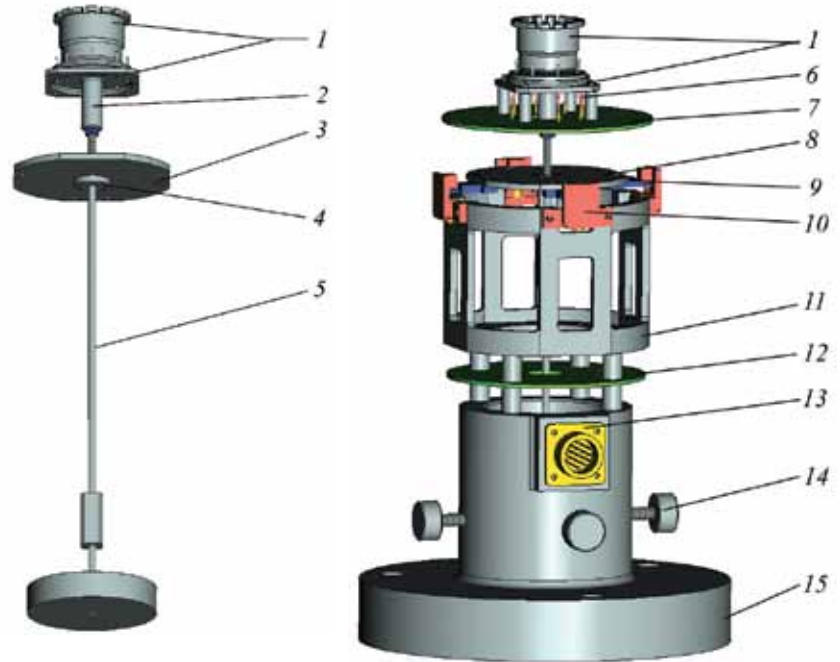


Рис. 3. Стенд для измерения массового дисбаланса резонатора: 1 – узел резонатора; 2 – установочный переходник; 3 – блок вибродатчиков; 4 – ограничитель; 5 – стержень; 6 – гибкий проводник; 7 – блок предварительных усилителей; 8 – плата усилителей вибродатчиков; 9 – плата вибродатчиков; 10 – узел вибродатчиков; 11 – кронштейн; 12 – плата переключателей; 13 – розетка; 14 – регулировочный винт центровки стержня; 15 – основание.

диссипативные характеристики резонатора не меняются благодаря тому, что при колебаниях резонатора зубцы практически не деформируются. Трудоемкость балансировки зубчатых резонаторов обычно невысокая, однако изготовление зубцов является отдельной технологической операцией.

Балансировка беззубцовых резонаторов требует использования методов обработки материала, не нарушающих его структуры, в связи с чем удаление вещества с поверхности оболочки резонатора идет с

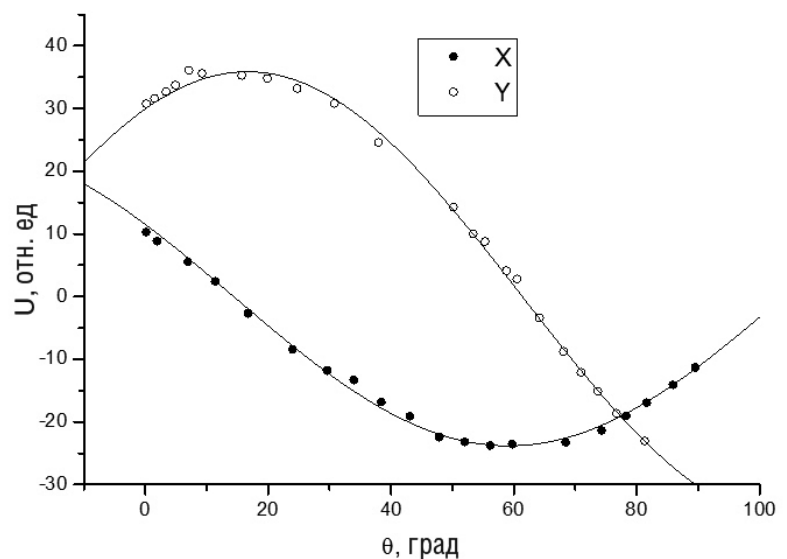
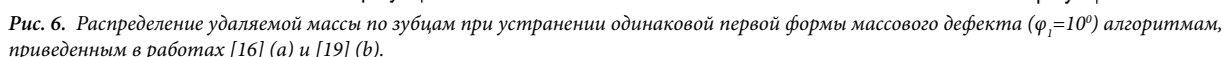


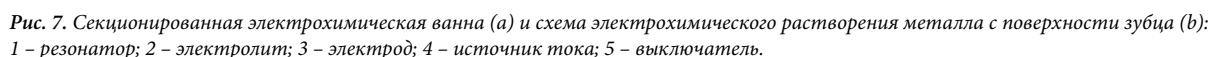
Рис. 4. Зависимость амплитуды вибрации стержня от ориентации стоячей волны в резонаторе.



приборов, метод удаления вещества при балансировке должен обеспечить не только высокую точность, но также низкую себестоимость и высокую производительность процесса. Исходя из этих требований, в качестве рабочего метода был выбран метод электрохимического растворения металла.

Для независимого травления каждого зубца резонатора использована секционированная электролитическая ванна (рис. 7а). Корпус ванны выполнен из фторопласта и имеет секции (по числу зубцов), отделенные друг от друга тонкими перегородками. В донную часть каждой секции ввернут электрод, подключенный к системе электропитания. При установке резонатора каждый его зубец располагается в индивидуальной секции, а сам резонатор электрически подключается отдельным проводом к общей шине (рис. 7б). Подавая на выбранный электрод 3 постоянное напряжение от источника тока 4 через выключатель 5, можно растворять металл на зубце, находящемся в этой секции, независимо от других зубцов.

Согласно закону Фарадея количество растворенного металла прямо пропорционально электрическому заряду, прошедшему через обрабатываемую поверх-



$$Q_k = KM_{y\partial,k} \text{ ,} \quad (16)$$

Величину пропускаемого через поверхность k -го зубца электрического заряда Q_k контролируют временем пропускания t_k постоянного тока I :

$$t_k = \frac{Q_k}{I}. \quad (17)$$

$$I = jS, \quad (18)$$

Пример 1. На рисунке 8 приведен экспериментальный график, показывающий изменение расщепления

$$t = \frac{\Delta f}{0.02673}. \quad (19)$$
$$t_k = [1 + \cos 4(\alpha_k - \varphi_4)] \cdot t. \quad (20)$$
$$t = \frac{M_{1,3}}{0.00535} \quad (21)$$
$$t_k = [1 + \cos(\alpha_k - \varphi_1)] \cdot t. \quad (22)$$

А при балансировке третьей формы массового дефекта:

$$t_k = [1 + \cos 3(\alpha_k - \varphi_3)] \cdot t. \quad (23)$$

Так как количество удаленного металла при электрохимической балансировке точно известно, не представляет труда вычислить величину 1 отн. ед., в которых измерена неуравновешенная масса. Расчет показал, что 1 отн. ед.=13.2 мг.

Пример 3. На рисунке 10 приведен экспериментальный график, показывающий изменение величины второй формы массового дефекта резонатора от среднего времени электрохимического травления.

Необходимое для удаления этой формы дефекта среднее время травления составляет

$$t = \frac{M_2}{0.00293}. \quad (24)$$

Время травления k -го зубца:

$$t_k = [1 + \cos 2(\alpha_k - \varphi_2)] \cdot t. \quad (25)$$

Отметим, что среднее время электрохимического травления при удалении второй формы дефекта больше, чем при удалении первой и третьей форм. Это связано с двумя обстоятельствами. Прежде всего, продольная вибрация центра масс создается не только второй формой массового дефекта рабочей части резонатора, но и несимметрией его донной части. Спицы доньшка совершают вертикальные колебания, и различия в массе спиц, размеров пьезоэлементов, толщины клея и т.п. также приводят к вертикальному движению центра масс резонатора. С другой стороны, продольные (параллельно оси симметрии) перемещения кромки цилиндрического резонатора меньше, чем в полусферическом, из-за чего постоянный коэффициент в выражении (13) оказывается меньше 0.5. Все это ведет к относительному увеличению массы, которую надо снять для устранения силы F_z .

Подводя итог, можно заключить, что общая продолжительность электрохимической обработки при балансировке резонатора не превышает 1 ч, при этом процесс может быть легко автоматизирован. Эффективность

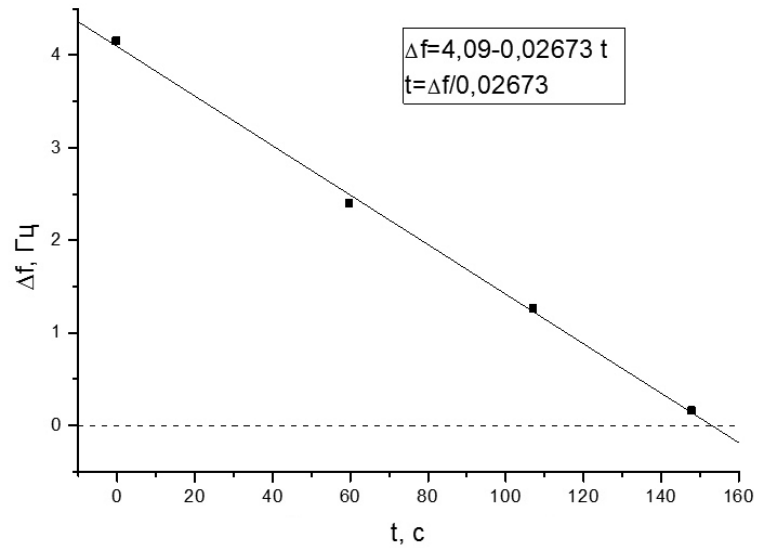


Рис. 8. Зависимость расщепления собственной частоты от среднего времени травления.

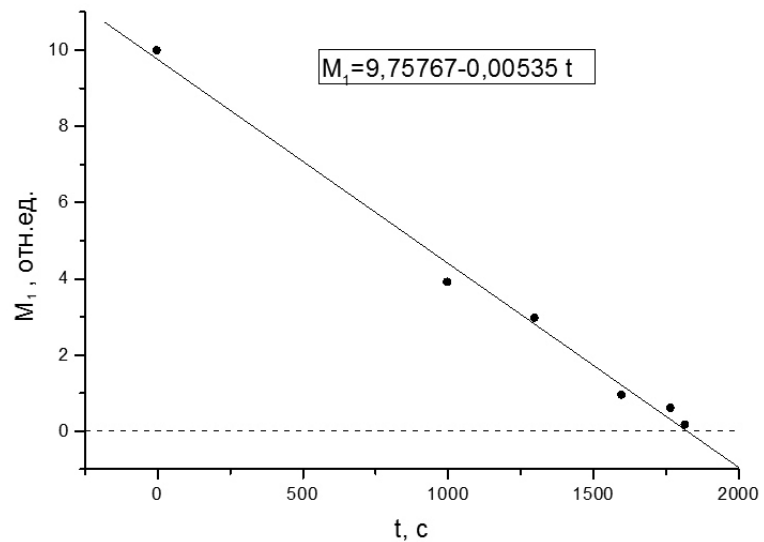


Рис. 9. Зависимость величины первой формы массового дефекта от среднего времени травления.

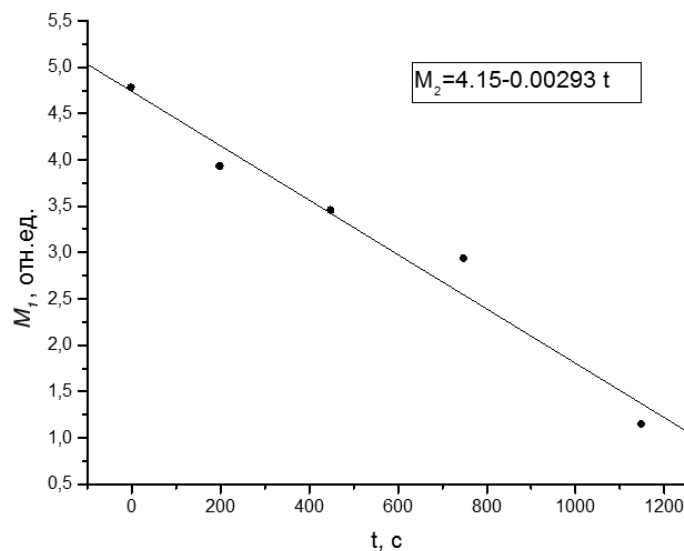


Рис. 10. Зависимость величины второй формы массового дефекта от среднего времени травления.

балансировки с точки зрения уменьшения вибрации центра масс можно оценить по рисунку 11, где приведена зависимость полной амплитуды вибрации (определяемую как $U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}$) от ориентации стоячей волны для одного из резонаторов. Видно, что амплитуда вибрации уменьшилась приблизительно на порядок, примерно в той же пропорции уменьшается амплитуда систематического дрейфа ВТГ. Конечная точность разработанной технологии балансировки обусловлена лишь точностью измерения параметров дисбаланса.

Повышение стабильности характеристик ВТГ

Нестабильность систематического дрейфа стоячей волны представляет собой основной источник погрешностей прибора. ВТГ представляет собой двумерный осциллятор с малой диссипацией, причем скорость его систематического дрейфа определяется разностью внутреннего трения по двум ортогональным осям вязкости резонатора. Систематический дрейф ВТГ очень чувствителен к случайному несимметричному изменению внутреннего трения в резонаторе, которое для точных приборов не должно превышать 10^{-12} – 10^{-11} . С другой стороны, ВТГ как тип содержит ряд источников внутреннего трения, стабильность и осевая симметрия которых невысока, а их зависимость от температуры препятствует созданию высокоточных приборов с долговременной стабильностью характеристик, способных работать в тяжелых условиях окружающей среды. С точки зрения авторов, именно это обстоятельство является основной причиной ограниченного использования ВТГ в современной технике. Улучшение точности ВТГ может быть достигнуто калибровкой прибора непосредственно перед его работой [21], однако выполне-

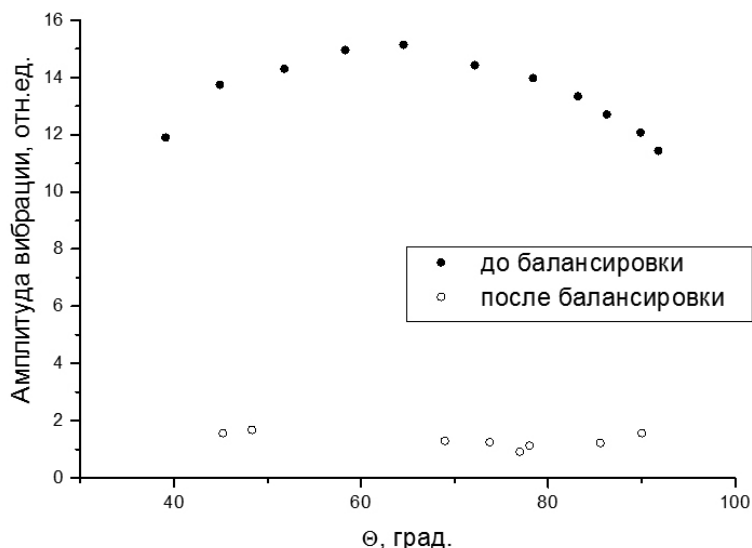


Рис. 11. Зависимость полной амплитуды вибрации от ориентации стоячей волны.

ние такой процедуры требует определенного времени и в ряде случаев невозможно.

В то же время необходимая точность и стабильность характеристик могут быть достигнуты при термостатировании ВТГ аналогично тому, как это реализуется для гироскопических приборов с другим принципом действия, например динамически настраиваемых гироскопов [22]. Стабилизация температуры позволяет резко ослабить влияние факторов, вызывающих неоднородную диссипацию в механическом резонаторе. При этом основное внимание должно быть уделено осевой симметрии температурного поля прибора (градиент температуры по окружному углу прибора не должен превышать десятых долей градуса), тогда как абсолютная величина температуры термостата не имеет решающего значения, она может быть выбрана из технологических или эксплуатационных соображений. Такой подход, конечно, ограничивает сферу применений ВТГ, однако он позволяет наиболее полно реализовать возможности этого прибора на современном технологическом уровне развития.

Заключение

Выполненные научно-исследовательские работы позволяют обеспечить требуемые параметры резонатора и гарантировать работу датчика общего применения в широком диапазоне температур и внешних механических воздействий. В настоящее время освоение производства ВТГ общего применения с использованием разработанных технологий позволило достичь примерно следующий технический уровень датчиков угловой скорости общего применения:

- время готовности не превышает 1 с для всех условий применения;
- добротность резонатора около 40000;
- случайная погрешность менее 30 град/ч.

Дальнейшие исследования направлены на повышение точности приборов и уменьшение зависимости их параметров от температуры. Так, для балансировки беззубцовых металлических резонаторов

разрабатываются технологии на основе электрохимического удаления массы непосредственно с поверхности оболочки [23]. Их использование позволит дополнительно снизить себестоимость и трудоемкость производства датчиков этого типа.

Литература

1. G.H. Bryan
Proc. Camb. Phil. Soc. Math. Phys Sci., 1890, 7, 101.
2. D.D. Lynch, R.R. Rogan
IEEE Trans. Aerosp. Electron. System, 1984, № 17, 432.
3. В.Ф. Журавлев, Д.М. Климов
Волновой твердотельный гироскоп. – М.: Наука, 1985, 125 с.
4. В.Ф. Журавлев
Изв. РАН. Механика твердого тела, 1993, № 3, 6.
5. V.V. Chikovani, Yu.A. Yatsenko, A.S. Barabashov et al.
XV International Conference on Integrated Navigation Systems. 26-28 May 2008, St.Petersburg. – St.Petersburg: Elektropribor, 2008, pp.28-31.
6. В.А. Матвеев, В.И. Липатников, А.В. Алексин
Проектирование волнового твердотельного гироскопа. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997, 168 с.
7. М.А. Басараб, В.Ф. Кравченко, В.А. Матвеев
Математическое моделирование физических процессов в гироскопии. – М.: Радиотехника, 2005, 176 с.
8. Б.С. Лунин
Физико-химические основы разработки полусферических резонаторов волновых твердотельных гироскопов. – М.: Изд-во МАИ, 2005, 224 с.
9. М.А. Басараб, В.Ф. Кравченко, В.А. Матвеев
Методы моделирования и цифровой обработки сигналов в гироскопии. – М.: Физматлит, 2007, 248 с.
10. В.А. Матвеев, Б.С. Лунин, М.А. Басараб
Навигационные системы на волновых твердотельных гироскопах. – М.: Физматлит, 2008, 240 с.
11. В.А. Матвеев
Гироскоп – это просто. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, 191 с.
12. Б.С. Лунин, В.А. Матвеев, М.А. Басараб
Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология. – М.: Радиотехника, 2014, 176 с.
13. М.А. Басараб, Б.С. Лунин, В.А. Матвеев, А.В. Фомичев, Е.А. Чуманкин, А.В. Юрин
Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение, 2014, № 4 (97), 80.
14. В.А. Матвеев, М.А. Басараб, Б.С. Лунин, Е.А. Чуманкин, А.В. Юрин
Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение, 2015, № 2(101), 28.
15. N.E. Egarmin, V.E. Yurin
Introduction to theory of vibratory gyroscopes. Moscow: Binom. 1993. (Егармин Н.Е. Введение в теорию вибрационных гироскопов / Н.Е. Егармин, В.Е. Юрин. М.: БИНОМ, 1993, 111 с).
16. Ю.К. Жбанов, В.Ф. Журавлев
Изв. РАН. Механика твердого тела, 1998, № 4, 4.
17. E.J. Loper, D.D. Lynch
Proc. IEEE/AIAA 5th Digital Avionics Systems Conference. Seattle, WA. October 31-November 3, 1983, pp.18.1.1-18.1.6.
18. Б.П. Бодунов, В.М. Лопатин, Б.С. Лунин
Патент РФ 2147117, 1998.
19. В.А. Матвеев, Б.С. Лунин, М.А. Басараб, Е.А. Чуманкин
Наука и образование, 2013, № 6. DOI:10.7463/0613.0579179.
20. Ф. Розбери
Справочник по вакуумной технике и технологии. – М.: Энергия, 1972, 456 с.
21. Д. Мейер, Д. Розелле
Гироскопия и навигация, 2012, № 3(78), 45.
22. Д.С. Пельпор, В.А. Матвеев, В.Д. Арсеньев
Динамически настраиваемые гироскопы. – М.: Машиностроение, 1988, 263 с.
23. М.А. Басараб, Б.С. Лунин, В.А. Матвеев, Е.А. Чуманкин
Гироскопия и навигация, 2014, № 2(85), 43.

Development of the Theory of Cylindrical Vibratory Gyroscopes with Metallic Resonators*

Boris S. Lunin –
Lomonosov Moscow State University
1, Leninskie Gory,
Moscow, 119991, Russia
e-mail: luninboris@vandex.ru

Aleksey V. Yurin –
Bauman Moscow State Technical University
5, 2nd Baumanskaya str.,
Moscow, 05005, Russia
e-mail: yuaalex@rambler.ru

A number of issues arising in the development of cylindrical vibratory gyroscopes with metal resonators are considered. Finite-element modeling of oscillatory processes in the resonator is carried out for optimizing its parameters and studying the impact of mass imbalance of the resonator on its characteristics. A new technology for balancing the resonator, suitable for realization of the mass production of low-cost gyro sensors for low and medium accuracy applications is proposed.

Keywords: cylindrical vibratory gyroscope, balancing, finite element method.

1. **G.H. Bryan**
Proc. Camb. Phil. Soc. Math. Phys Sci., 1890, 7, 101.
2. **D.D. Lynch, R.R. Rogan**
IEEE Trans. Aerosp. Electron. System, 1984, № 17, 432.
3. **D.M. Klimov, V.F. Zhuravlev**
Volnovoi tverdotel'nyi girooskop [Hemispherical resonator gyro]. Moscow, Nauka, 1985, 125 pp. (in Russian).
4. **V.F. Zhuravlev**
Izvestiya RAN. Mekhanika Tverdogo Tela [Mech. Solids], 1993, N 3, 15.
5. **V.V. Chikovani, Yu.A. Yatsenko, A.S. Barabashov et al.**
XV International Conference on Integrated Navigation Systems, 26-28 May 2008, St.Petersburg. – St.Petersburg: Elektropribor, 2008, pp. 28-31.
6. **V.A. Matveev, V.I. Lipatnikov, A.V. Alekhin**
Proektirovanie volnovogo tverdotel'nogo giroskopa [Designing a hemispherical resonator gyro], Moscow, MG TU im. N.E. Bauman Publ., 1997, 168 pp. (in Russian).
7. **M.A. Basarab, V.F. Kravchenko, V.A. Matveev**
Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov v giroskopii [Mathematical modeling of physical processes in gyroscopy], Moscow, Radiotekhnika, 2005, 176 pp. (in Russian).
8. **B.S. Lunin**
Fiziko-khimicheskie osnovy razrabotki polusfericheskikh rezonatorov volnovykh tverdotel'nykh giroskopov [Physical-chemical basis for development of hemisphere resonator gyroscopes], Moscow, MAI Publ., 2005, 224 pp. (in Russian).
9. **M.A. Basarab, V.F. Kravchenko, V.A. Matveev**
Metody modelirovaniya i tsifrovoy obrabotki signalov v giroskopii [Methods of modeling and digital signal processing in gyroscopy], Moscow, Fizmatlit, 2007, 248 pp. (in Russian).
10. **V.A. Matveev, B.S. Lunin, M.A. Basarab**
Navigatsionnye sistemy na volnovykh tverdotel'nykh giroskopakh [Navigation systems based on solid-state wave gyros], Moscow, Fizmatlit, 2008, 240 pp. (in Russian).
11. **V.A. Matveev**
Girokop – eto prosto [Gyro – it's simple], Moscow, MG TU im. N.E. Bauman Publ., 2012, 191 pp. (in Russian).
12. **B.S. Lunin, V.A. Matveev, M.A. Basarab**
Volnovoi tverdotel'nyi girooskop. Teoriya i tekhnologiya [Hemispherical resonator gyro. Theory and Technology], Moscow, Radiotekhnika, 2014, 176 pp. (in Russian).
13. **M.A. Basarab, B.S. Lunin, V.A. Matveev, A.V. Fomichev, E.A. Chumankin, A.V. Yurin**
Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Instrument Engineering, 2014, N 4(97), 80 (in Russian).
14. **B.S. Lunin, A.V. Yurin, M.A. Basarab, V.A. Matveev, E.A. Chumankin**
Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Instrument Engineering, 2015, N 2(101), 28 (in Russian).
15. **N.E. Egarmir, V.E. Yurin**
Introduction to theory of vibratory gyroscopes, Moscow, Binom, 1993.
16. **Yu.K. Zhibanov, V.F. Zhuravlev**
Izvestiya RAN. Mekhanika Tverdogo Tela [Mech. Solids], 1998, N 4, 4 (in Russian).
17. **E.J. Loper, D.D. Lynch**
Proc. IEEE/AIAA 5th Digital Avionics Systems Conference. Seattle, WA. October 31-November 3, 1983, pp.18.1.1-18.1.6.
18. **B.P. Bodunov, V.M. Lopatin, B.S. Lunin**
Patent RU 2147117, 1998 (in Russian).
19. **V.A. Matveev, B.S. Lunin, M.A. Basarab, E.A. Chumankin**
Nauka i obrazovanie [Science and Education], 2013, N 6 (in Russian). DOI: 10.7463/0613.0579179.
20. **F. Rosebury**
Handbook of Electron Tube and Vacuum Techniques, Addison-Wesley, 1965.
21. **M.A. Basarab, B.S. Lunin, V.A. Matveev, E.A. Chumankin**
Gyroscopy and navigation, 2014, 5, N 4, 211. DOI 10.1134/S2075108714040038.
22. **D. Meyer, D. Rozelle**
Gyroscopy and Navigation, 2012, 3(4), 227. DOI: 10.1134/S2075108712040086.
23. **D.S. Pelpor, V.A. Matveev, V.D. Arseniev**
Dinamicheski nastravlaemye giroskopy [Dynamically tuned gyroscopes], Moscow. Mashinostroenie. 1988. 263 pp. (in Russian).

* *The work was financially supported by RFBR (project N 15-08-09145).*

Наноинженерия и инфокоммуникационные технологии*

Л.А. Зинченко, А.И. Власов, Е.В. Резчикова, В.А. Шахнов

Фундаментальные исследования в области наноинженерии требуют проведения комплекса взаимосвязанных работ в области нанотехнологической информатики – новом направлении в науке. В статье рассмотрены подходы к представлению знаний в информационных системах с учетом свойств наноразмерных объектов и материалов. Отличительной особенностью предложенных подходов является использование онтологий, концептуальных карт и когнитивных технологий при представлении знаний.

Ключевые слова: фундаментальные основы наноинженерии, знания, нанотехнологическая информатика, когнитивные технологии.

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (грант НШ-1152.2012.9, НШ-2903.2014.9) и РФФИ (проект № 15-29-01115-офи_м).

Введение

Э. Дрекслер в 2006 г. обратил внимание исследователей на важность разработки фундаментальных основ инженерии применительно к решению задач в области нанотехнологий. В частности, он подробно рассмотрел [1] проблемы проектирования наносистем, вызванные вероятностной природой этих научных устройств.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана проводятся комплексные исследования в области фундаментальных основ наноинженерии, в том числе исследования процессов создания, накопления и обработки информации в наноинженерии, исследования методов преобразования информации в данные и знания в наноинженерии; создание и исследование информационных моделей, моделей данных и знаний, методов работы со знаниями, методов

машинного обучения применительно к решению задач наноинженерии.

Актуальность проведения таких исследований на стыке инженерии и информатики объясняется тем, что, по оценкам ведущих экспертов, нанотехнологии являются одной из перспективных областей дальнейшего развития науки, технологий, техники. В то же время, согласно эволюционной теории, познавательные способности человека в ходе эволюции приспособлены только к миру «средних размеров» (мезокосмосу). Об этом пишет и Г. Фоллмер [2] в выдвинутой концепции, утверждающей, что когнитивной нишей человека является мезокосмос. Поэтому как при переходе в наномир, так и в мир космоса такие категории, как материя, пространство и время оказываются в сферах, к которым человеческий организм не приспособлен. Многими специалистами высказывается сомнение, что успешное использование классических компьютеров, базирующихся на принципах машины Тьюринга, для решения задач мира «средних размеров» может быть расширено для наномира и для мира космоса. Именно это ограничение познавательных способностей человека при исследовании наномира было отмечено в статье Р. Феймана [3].



ЗИНЧЕНКО
Людмила Анатольевна

профессор,
МГТУ им. Н.Э. Баумана



ВЛАСОВ
Андрей Игоревич

МГТУ им. Н.Э. Баумана



РЕЗЧИКОВА
Елена Викентьевна

МГТУ им. Н.Э. Баумана



ШАХНОВ
Вадим Анатольевич

член-корреспондент РАН, профессор,
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
ответственный секретарь Совета РФФИ

размерных объектов и материалов. Это объясняется тем, что исследования в области нанотехнологий характеризуются разнородностью данных и знаний, мультиязычностью литературных источников научной информации, междисциплинарностью, необходимостью привлечения экспертов из различных областей исследований.

В последние годы в области инженерии знаний предложены принципиально новые подходы к их представлению, хранению и обработке в глобальных компьютерных сетях. Такие модели хранения знаний, как онтологии, концептуальные карты, семантическая паутина (Semantic Web) и др. [12] включают в себя, помимо традиционных определений, информацию о связях между различными объектами, понятиями, определениями. Это позволяет перейти на принципиально новый уровень информационного обеспечения исследуемой предметной области и значительно повысить эффективность представления, поиска и анализа информации за счет визуализации связей между различными понятиями и использованием визуальной аналитики.

При реализации баз знаний для представления данных о свойствах наноразмерных объектов и материалов целесообразен выбор онтологического уровня представления знаний. Под моделью онтологии понимается упорядоченная тройка вида (1) [12].

$$O = \langle A, B, C \rangle, \quad (1)$$

где A – множество понятий (сущностей, концептов), используемых в предметной области $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$; B – множество связей между понятиями; C – множество функций интерпретации, заданных на множествах A и B .

В зависимости от степени завершенности исследований в предметной области рассматривают два возможных подхода к построению онтологии [20]. Подход, получивший название предположение закрытого мира (*closed world assumption* – CWA), подразумевает, что все возможные понятия уже включены в онтологию и дальнейшее расширение онтологии невозможно. Противоположный подход – «Предположение открытого мира» (*open world assumption* – OWA) – обеспечивает возможность дополнения онтологии новыми понятиями.

Область нанотехнологий постоянно развивается, что отражается в постоянном расширении и динамичном изменении понятийной системы. В связи с этим для формирования базы знаний в области нанотехнологий целесообразным представляется использование предположения открытого мира (OWA). Это позволяет обеспечить в дальнейшем возможность дополнения разработанной онтологии новыми понятиями.

В работах [21, 22] рассмотрены примеры реализации баз знаний по технологиям микро- и наносистем. Для представления выбранной модели исследуемой предметной обла-

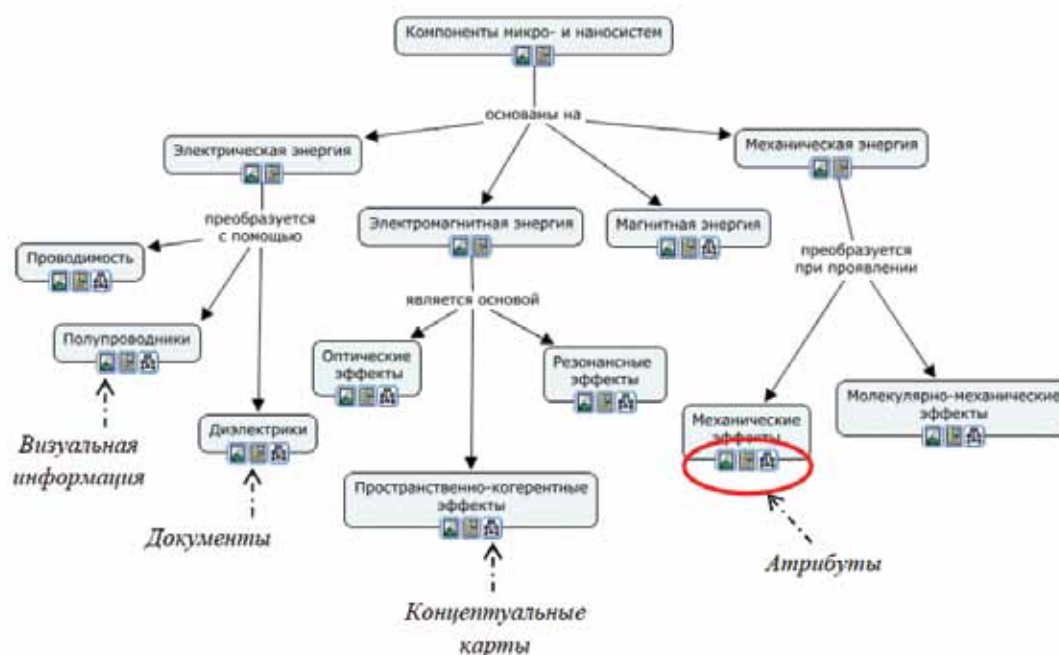


Рис. 2. Концептуальная карта выбранной предметной области.

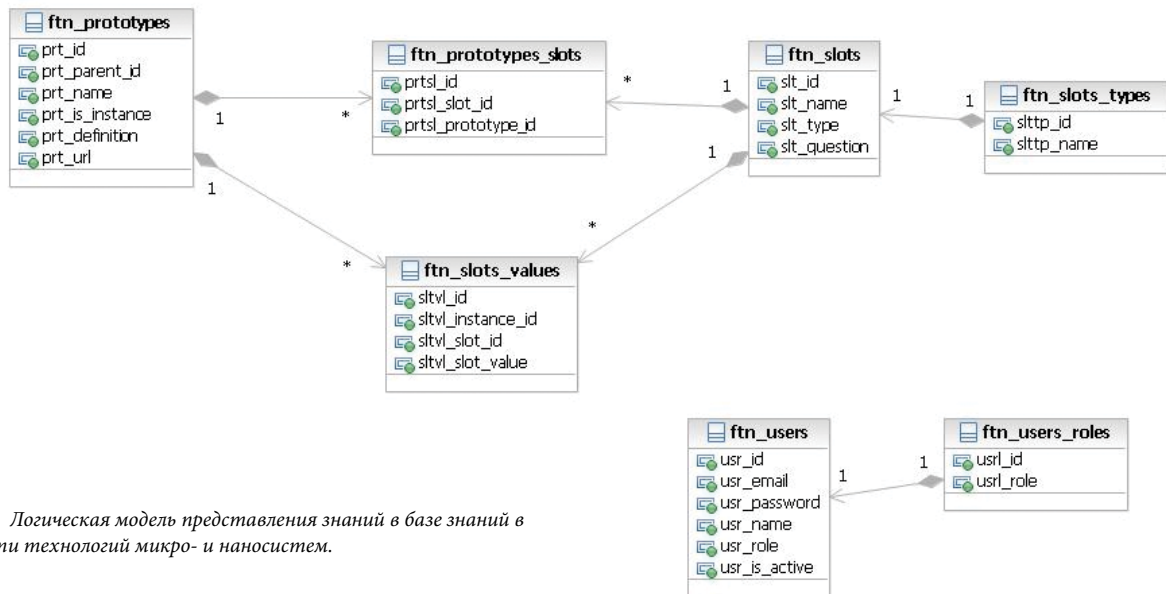


Рис. 3. Логическая модель представления знаний в базе знаний в области технологий микро- и наносистем.

сти были выбраны концептуальные карты. Пример разработанной концептуальной карты для выбранной предметной области приведен на рисунке 2. Наименования вершин графа образуют множество понятий онтологии рассматриваемой предметной области. Концепт может включать документы, заполненные по шаблону [22], визуальную информацию и концептуальные карты более низкого уровня иерархии.

Для формализованного описания знаний была выбрана модель, приведенная на *рисунке 3*. Спецификация сущностей и атрибутов приведена в *таблице 1*.

Сформированная модель позволила приблизить созданную онтологию к машинному языку, хранить ее в базе знаний и, следовательно, применять известные алгоритмы поиска решений.

Реализованная база знаний по технологиям микро- и наносистем [21, 22] включает более 600 понятий, каждое из которых связано с существующими системами патентной классификации.

Необходимо отметить, что рассмотренные выше подходы могут быть легко применены при решении других задач информационного обеспечения нанотехнологий.

Таблица 1. Спецификация сущностей и атрибутов модели

Класс	Атрибут/Метод	Описание
ftn_prototypes	prt_id	PRIMARY_KEY
	prt_parent_id	Уникальный номер родителя
	prt_name	Имя прототипа
	prt_is_instance	Прототип является экземпляром
	prt_definition	Определение
	prt_url	Ссылка на описание технологии
ftn_prototypes_slots	prtsl_id	PRIMARY_KEY
	prtsl_slot_id	Уникальный номер слота
	prtsl_prototype_id	Уникальный номер прототипа
ftn_slots	slt_id	PRIMARY_KEY
	slt_name	Имя слота
	slt_type	Тип данных
	slt_question	Вопрос, который выводится в диалог
ftn_slots_types	slttp_id	PRIMARY_KEY
	slttp_name	Имя типа значения слота
ftn_slots_values	sltlvl_id	PRIMARY_KEY
	sltlvl_instance_id	Уникальный номер прототипа-экземпляра
	sltlvl_slot_id	Уникальный номер слота
	sltlvl_slot_value	Значение слота
ftn_users	usr_id	PRIMARY_KEY
	usr_email	E-mail пользователя
	usr_password	Пароль пользователя
	usr_name	Имя пользователя
	usr_role	Роль пользователя
	usr_is_active	Статус пользователя
ftn_users_roles	usr_l_id	PRIMARY_KEY
	usr_l_name	Имя роли

English

Nanoengineering and Infocommunication Technology *

Lyudmila A. Zinchenko –

Professor

Bauman Moscow State Technical University
5, 2-nd Baumanskaya str.,
Moscow, 105005, Russia
e-mail: lyudmillaa@mail.ru

Andrei I. Vlasov –

Bauman Moscow State Technical University

5, 2-nd Baumanskaya str.,

Moscow, 105005, Russia

e-mail: vlasov@iu4.ru

Elena V. Rezhikova –

Bauman Moscow State Technical University

5, 2-nd Baumanskaya str.,

Moscow, 105005, Russia

e-mail: rezc-elena@yandex.ru

Vadim A. Shakhnov –

RAS Corresponding Member, professor

Executive Secretary of the Board of the Russian

Foundation for Basic Research,

Bauman Moscow State Technical University

5, 2-nd Baumanskaya str.,

Moscow, 105005, Russia

e-mail: shakhnov@mail.ru

Abstract

Basic research in nanoengineering requires implementation of a set of interrelated activities in this new scientific discipline. Approaches to representation of knowledge in information systems with due account of the nano-scale objects and materials are discussed in detail. Specifics of the proposed approaches involve use of ontologies, concept maps and cognitive technologies for knowledge representation.

Keywords: fundamentals of nanoengineering, knowledge, nanoinformatics, cognitive technology.

References

1. **E. Drexler**
J. Comput. Theor. Nanosci., 2006, **3**(1), 1. DOI: <http://dx.doi.org/10.1166/jctn.2006.001>.
2. **H. Vollmer**
Evolutionäre Erkenntnistheorie, S. Hirzel, 1975.
3. **R. Feynman**
Int. J. Theor. Phys., 1982, **21**, 467. DOI: 10.1007/BF02650179.
4. **D. Deutsch**
Proc. R. Soc. London A, 1985, **400**, 97. DOI: 10.1098/rspa.1985.0070
5. Report to the President and Congress on the Third Assessment of the National Nanotechnology Initiative, 2010.
6. *Nanoinformatics 2020 Roadmap*, 2011.
7. **V.A. Shakhnov, L.A. Zinchenko**
Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy [Information Technology and Computing Systems], 2012, N 3, 55 (in Russian).
8. **J. Han, M. Kamber**
Data Mining: Concepts and Techniques. – Morgan Kaufmann Publishers, 2000, 550 pp.
9. **C. M. Bishop**
Pattern Recognition and Machine Learning. – Springer, 2006, 740 pp.
10. *Bionicheskie informatsionnye sistemy i ikh prakticheskie primeneniia* [Bionical information systems and their practical applications], Eds. L.A. Zinchenko, V.M. Kureichik, V.G. Redko, Moscow, Fizmatlit, 2011, pp. 286 (in Russian).
11. **M.C. Daconta, K.T. Smith, L.J. Obrst**
The Semantic Web: A Guide to the Future of XML, Web Services, and Knowledge Management. – John Wiley & Sons, Inc., 2003, pp. 312.
12. **T.A. Gavrilova, V.F. Khorashevsky**
Bazy znaniy intellektualnikh sistem [Knowledge databases of intelligent systems], S-Pb, Piter, 2000, pp. 384 (in Russian).
13. **A. Shakhnov, L.A. Zinchenko**
Vestnik MGTU im. N.E. Bauman [BMSTU Herald], 2010, No. 5, 100 (in Russian).
14. **V.A. Shakhnov, L.A. Zinchenko**
Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy [Information Technology and Computing Systems], 2009, N 4, 84 (in Russian).
15. **V.A. Shakhnov, L.A. Zinchenko, I.A. Kosolapov**
Proc. "IEEE ASDAM'14", 2014. DOI: 10.1109/ASDAM.2014.6998679.
16. **V.A. Shakhnov, L.A. Zinchenko**
Nanoinzheneriya [Nanoengineering], 2014, N 2, 29 (in Russian).
17. **V.A. Shakhnov, L.A. Zinchenko, E.V. Rezhikova**
Int. J. Math. Comput. Simul., 2014, **8**, 141.
18. **V.A. Shakhnov, L.A. Zinchenko, E.V. Rezhikova**
Proc. SPIE 9440, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2014, 944018 (December 18, 2014); DOI: 10.1117/12.2179168.
19. **V. Shakhnov, V. Makarchuk, L. Zinchenko, V. Verstov**
Proc. "IEEE CogInfoCom'13" IEEE 4th International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom), 2013. DOI: 10.1109/CogInfoCom.2013.6719239.
20. **K. Sengupta, A.A. Krisnadhi, P. Hitzler**
LNCS, 2011, **7031**, 617. DOI: 10.1007/978-3-642-25073-6_39
21. **A.E. Averyanikhin, V.A. Shakhnov, L.A. Zinchenko**
Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2014, N S52, 8 (in Russian).
22. **V.A. Shakhnov, A.E. Averyanikhin, A.I. Vlasov, L.V. Zhuravleva, L.A. Zinchenko**
Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy [Information Technology and Computing Systems], 2014, N 3, 89 (in Russian).
23. **V.A. Shakhnov, L.A. Zinchenko, E.V. Rezhikova, I. Kosolapov**
Proc. "5th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications, CogInfoCom 2014", 2014. doi: 10.1109/CogInfoCom.2014.7020496.

*The research was carried out with partial financial support of the RF presidential grant for state support of Russian leading scientific schools (projects N NSH-1152.2012.9, NSH-2903.2014.9) and RFBR (project N 15-29-01115-ofi_m).

**Подписано в печать 21.09.2015. Формат 60 x 90 ¹/₈.
Печ. л. 13. Тираж 300 экз.**

Оригинал-макет ЗАО «ИТЦ МОЛНЕТ»
123104, г. Москва, Малый Палашевский пер., д. 6
Тел./факс: (495) 927-01-98,
e-mail: info@molnet.ru
Печать ЗАО «Линия График Кострома»
156019, г. Кострома,
ул. Петра Щербины, д. 9, а1