



РОССИЙСКИЙ
ФОНД
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ISSN 1605-8070
eISSN 2410-4639

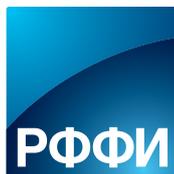
ВЕСТНИК

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. Матвеевко, 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

«Вестник РФФИ»

№ 3 (87) июль–сентябрь 2015 г. (Приложение к «Информационному бюллетеню РФФИ» № 23)

КОЛОНКА ТЕМАТИЧЕСКОГО РЕДАКТОРА

О редакторе тематического блока академике И.Б. Федорове6
 И.Б. Федоров
 Аннотация к тематическому блоку9

ТЕМАТИЧЕСКИЙ БЛОК: ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

А.Л. Свистков, В.Н. Солодько, С.Е. Евлампиева, Н.И. Ужегова, К.А. Мохирева
 Разработка методов компьютерного моделирования механического поведения эластомерного нанокомпозита на основе знаний о структуре материала и активности наполнителя..... 15

А.И. Простомолотов, Н.А. Везуб, В.С. Бердников
 Явление образования «холодных термиков» при выращивании кристаллов методом Чохральского 23

А.М. Ефремов, А.А. Жерлицын, Б.М. Ковальчук, Н.Н. Педин, А.В. Харлов
 Источник сильноточного релятивистского сфокусированного электронного пучка на основе плазмонаполненного диода.....32

Г.Ю. Гончарова, И.Г. Никифорова, Т.Г. Устюгова, Н.Д. Разомасов
 Исследование возможностей снижения фрикционного взаимодействия в паре «конек-лед» путем модификации структуры обеих контактирующих поверхностей 45

Г.А. Филиппов, А.Р. Аветисян
 Эйлеровые методы моделирования полидисперсных турбулентных течений влажного пара в турбинных решетках и соплах Лавала с учетом нестационарных фазовых переходов 54

В.Г. Гришина, Е.П. Дербаква, О.И. Додулад, Ю.Ю. Клосс, П.В. Шувалов, А.В. Морозов, Ф.Г. Черемисин
 Моделирование и анализ газокINETических процессов на основе кинетического уравнения Больцмана для решения проблем ядерных технологий..... 62

В.Н. Евдокименков, М.Н. Красильщиков
 Управление смешанными группами пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов в условиях единого информационно-управляющего поля 74

В.А. Матвеев, М.А. Басараб, Б.С. Лунин, Е.А. Чуманкин, А.В. Юрин
 Развитие теории создания волновых твердотельных гироскопов с металлическим резонатором..... 84

Л.А. Зинченко, А.И. Власов, Е.В. Резчикова, В.А. Шахнов
 Наноинженерия 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. Примеры 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 швов, 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. Везуб, В.С. Бердникова «Явление образования «холодных термик» 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 внебортовую и бортовую компоненты. Рассмотрены алгоритмы предполетного планирования действий смешанной группы, составляющие основу внебортовой 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 наноразмере 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



СВИСТКОВ
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

дый из которых выделяет объекты определенного масштабного уровня (рис. 3). Новый метод был протестирован на задачах анализа качества структуры эластомерного материала в процессе изготовления материала при разных временах смешения с наполнителем. Установлено, что в случае небольшого времени смешения наполнителя с эластомером при изготовлении образца в материале существуют области «непромеса» наполнителя, в которых его концентрация значительно выше, чем в остальном материале. По мере увеличения времени смешения области «непромеса» уменьшаются в размерах. Этот процесс напоминает таяние льдинок в воде. Разработанный метод позволил исключить из рассмотрения особенности рельефа, связанные с ветвлениями трещины перед кончиком ножа ультрамикротомы при изготовлении образцов.

Молекулярная модель формирования упругого поведения эластомерного связующего

В работе предложена новая модель упругого поведения эластомеров в рамках статистической механики. Ее особенностью является использование феноменологической связи между тензором ориентации полимерных звеньев молекулярного уровня и левым тензором растяжений материала. Преимущество такого подхода заключается в простоте математических выражений, удобных для проведения вычислений, и хорошем описании макроскопического поведения материала. К недостаткам следует отнести то, что это феноменологическое выражение не является результатом анализа особенностей строения эластомерной сетки на молекулярном уровне и ее изменений при деформировании материала. Построение полностью молекулярной модели, учитывающей различие в длинах полимерных цепей, количество и функциональность хи-

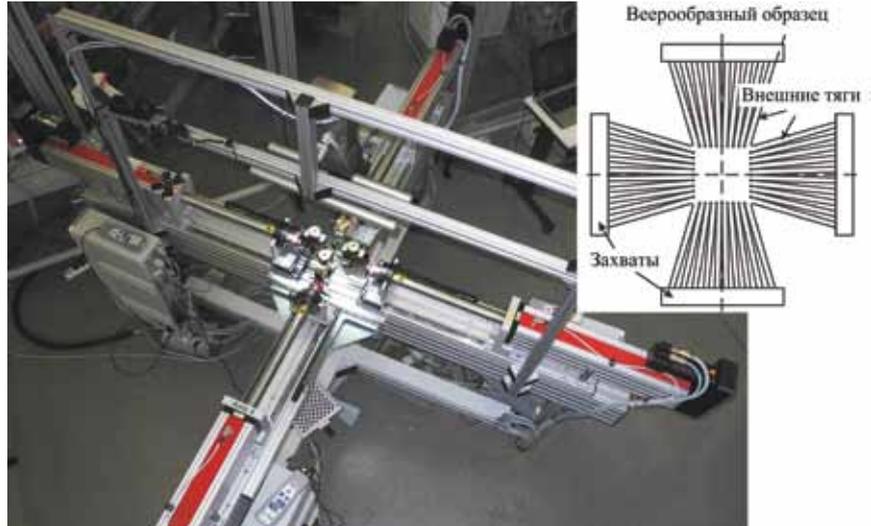


Рис. 1. Универсальная испытательная машина фирмы Zwick, изготовленная по заказу Пермского государственного научно-исследовательского университета, позволяет осуществлять исследования двухосного растяжения крестообразных и веерообразных образцов с индивидуальной историей деформирования по каждой оси.

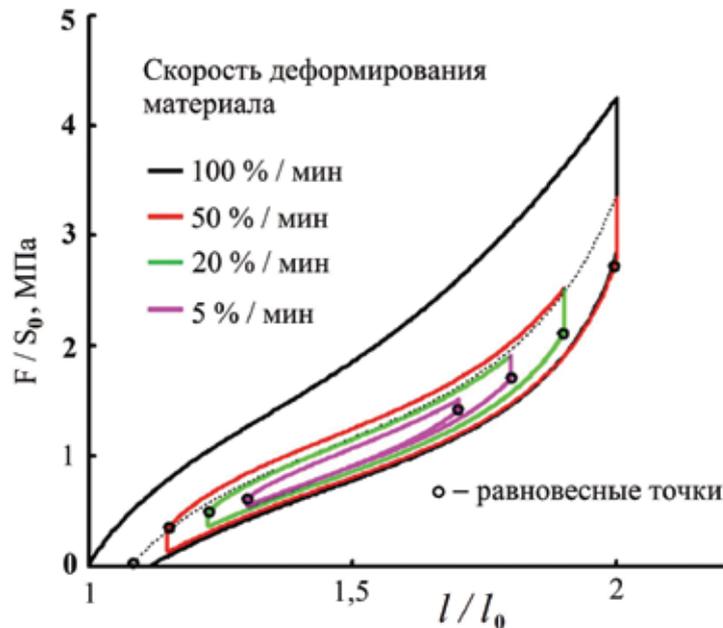


Рис. 2. Эксперимент одноосного нагружения материала, позволяющий на одном образце получить информацию об эффекте размягчения (эффекте Маллинза), вязкоупругом поведении материала (в условиях деформирования с постоянными скоростями растяжения и в условиях релаксации напряжений), остаточных деформациях и о равновесных точках при различных степенях удлинения. Обозначения: F – действующая сила, S₀ – начальное сечение образца, l и l₀ – текущая и начальная длины образца.

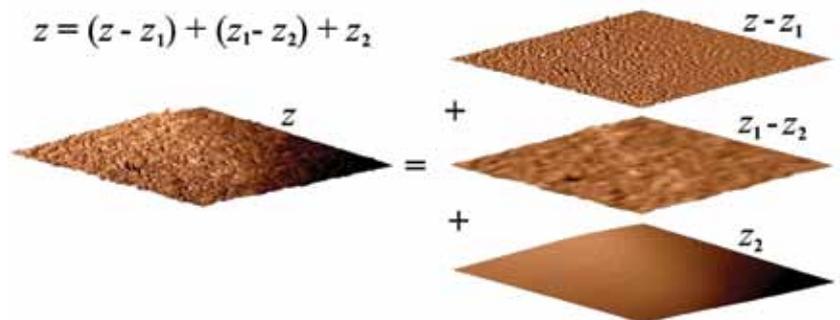


Рис. 3. Исследуемый рельеф поверхности в виде сумм поверхностей высокой z-z₁, средней z₁-z₂ и малой кривизны z₂.

мических швов, представляет собой серьезную проблему. При этом необходимо использовать различные гипотезы и упрощающие предположения. Мы пошли более простым путем и написали разумную феноменологическую связь между макроскопическими параметрами деформирования материала и ориентацией звеньев полимерных цепей.

В предложенной модели рассматривается формирование упругих свойств эластомерного материала. Полимерная сетка образована цепями. Для описания их состояния использовали модель свободносочлененных цепей. Звенья представляют собой отрезки заданной длины (сегменты Куна), на концах которых осуществляется шарнирное соединение с соседними звеньями. Полимерная сетка получается за счет соединения друг с другом полимерных цепей по концам с помощью химических швов. Ориентацию в пространстве i -го звена цепи определяли с помощью вектора τ_i единичной длины. Тензор $\tau_i \otimes \tau_i$ – тензор ориентации i -го звена.

Ключевым моментом модели является формулировка феноменологического выражения, которое связывает тензор ориентации с левым тензором растяжения материала (уравнение (1)).

$$\frac{1}{N} \sum_i \int_r \left(\tau_i \otimes \tau_i - \frac{I}{3} \right) \rho d\Gamma = a \ln V, \quad (1)$$

где N – количество полимерных звеньев в выделенном объеме материала, Γ – фазовое пространство обобщенных координат и импульсов точек, которые соединены жесткими связями и образуют звенья полимерных цепей, ρ – плотность распределения вероятности точек системы в фазовом пространстве иметь соответствующие координаты и импульсы, I – единичный тензор, a – коэффициент пропорциональности, зависящий от деформированного состояния материала и максимальной кратности удлинения материала.

Соотношение (1) дает разумное описание особенностей поведения материала:

1. Предложенное равенство качественно отражает изменение направления звеньев полимерных цепей, которое происходит при деформировании материала в условиях одно- и двухосного деформирования, а также сдвига.

2. В недеформированном материале выполняется следующее равенство:

$$\frac{1}{N} \sum_i \int_r \tau_i \otimes \tau_i \rho d\Gamma = \frac{I}{3}. \quad (2)$$

Это полностью соответствует физическому смыслу тензора, стоящего в левой части (условие полного хаоса в ориентации звеньев).

3. При максимально возможном удлинении материала все полимерные цепочки растянуты в направлении удлинения эластомера.

4. Материал при деформировании не изменяет своего объема.

5. Максимальная кратность удлинения материала не может превышать величины заранее заданного числа, определяемого длиной полимерных цепей.

Пример вычисления кривой растяжения эластомера по предложенной нами модели полимерных сеток показан на *рисунке 4*. Расчеты проведены для полидиметилсилоксана, сетка которого состоит из коротких и длинных полимерных цепей, зашитых по концам с помощью тетрафункциональных швов. Используются экспериментальные точки, опубликованные в работе [4]. Параметр ϕ показывает отношение числа коротких цепей к общему числу цепей. Коэффициент пропорциональности a (математическое выражение от кратности максимального удлинения материала) в феноменологической связи был определен по экспериментальным данным для одного материала, в котором все полимерные цепи имели молекулярную массу 18500 г/моль. Для всех остальных эластомеров найденная зависимость использована без изменений.

Моделирование поведения эластомерного связующего является первым шагом в построении многоуровневой модели. Следующим шагом явился учет наличия наполнителя и его влияния на механическое поведение материала.

Теоретический анализ упругих свойств зернистых композитов с разными типами структуры расположения частиц наполнителя

В наполненных эластомерах включения хаотично располагаются, собираются в агломераты, формируют сетку наполнителя. Поэтому представляет интерес осуществить анализ того, насколько это может повлиять на

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,

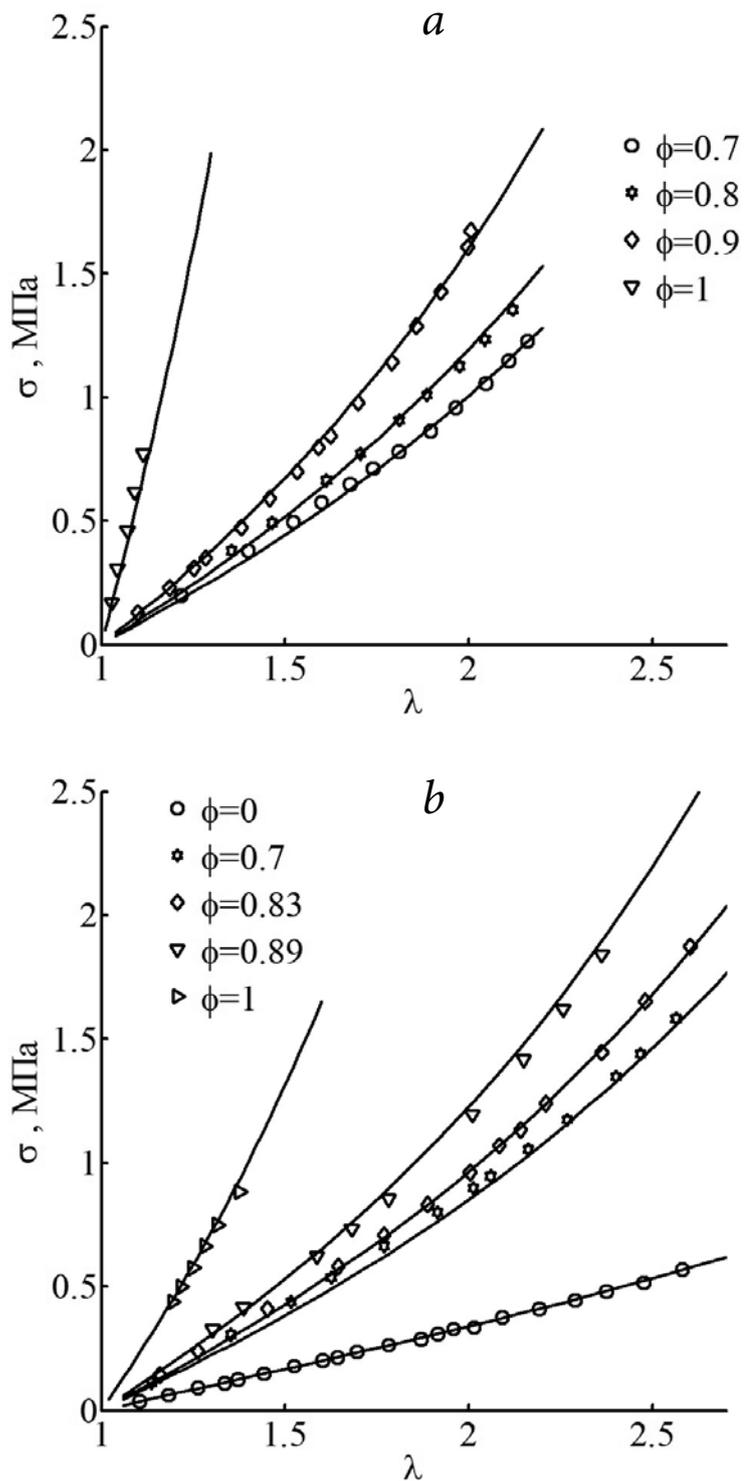


Рис. 4. Зависимость напряжения от удлинения материала в условиях одноосного нагружения полидиметилсилоксана. Сплошными линиями показаны теоретические кривые, точками – экспериментальные данные. Использованы полимерные цепи с молекулярными массами 660 и 18500 г/моль (а), 1100 и 18500 г/моль (b).

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-

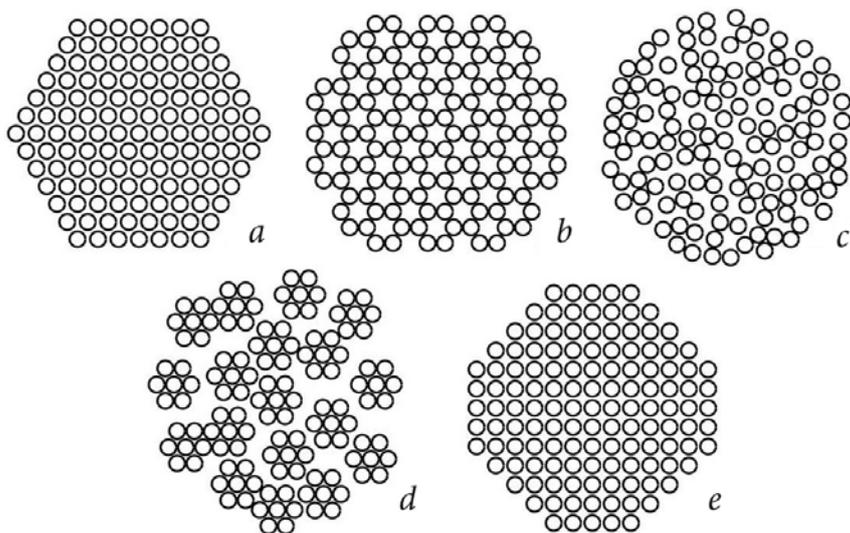


Рис. 5. Используемые для анализа ансамбли частиц наполнителя: регулярные, с расположением центров включений в узлах треугольной (а) и квадратной (е) решеток; структуры с сеткой наполнителя в материале (b), с хаотическим расположением частиц (с); с агломератами частиц (d).

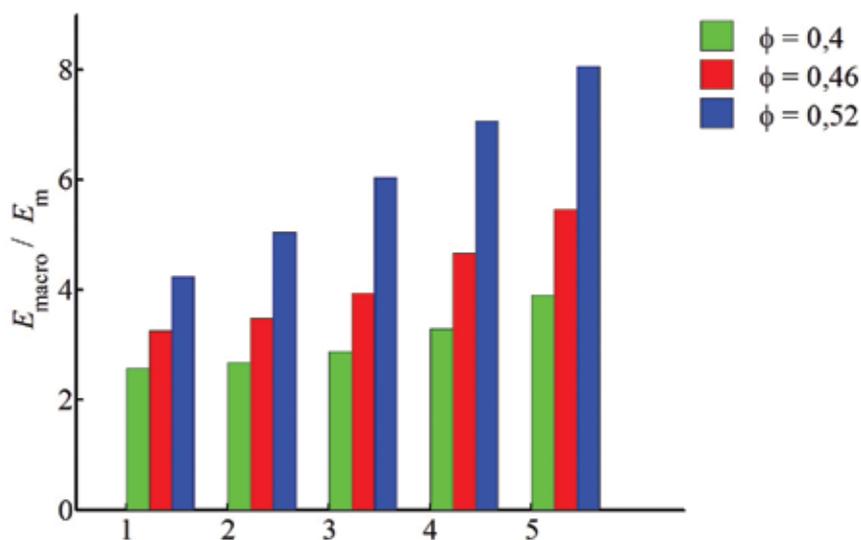


Рис. 6. Зависимость эффективного модуля от концентрации наполнителя, объемные доли которого равны 0,4, 0,46 и 0,52; E_{macro} и E_m – эффективный модуль материала и модуль матрицы соответственно. Диаграммы отвечают регулярным структурам с расположением центров включений в узлах треугольной (1) и прямоугольной (5) решеток, структурам с сеткой наполнителя в материале (2), с хаотическим расположением частиц (3) и с агломератами частиц (4).

моугольных решеток возрастает в несколько раз по отношению к треугольным решеткам. Осуществлен анализ поворотов частиц в структурно неоднородном материале при его деформировании. Повороты частиц оказались небольшими, поэтому не отражаются на макроскопических свойствах материала.

Определяющие уравнения двухуровневой структурно-феноменологической модели эластомерно-го нанокompозита

На макроскопическом уровне материала предложено использовать упруговязкопластическую модель. Иллюстрация изменения геометрии при однородном

деформировании прямоугольного образца показана на рисунке 7. Буквами обозначены следующие состояния материала: А – начальное состояние; В – состояние образца после снятия внешней нагрузки и завершения всех переходных процессов; С – состояние после мгновенного снятия внешней нагрузки; G – состояние образца в рассматриваемый момент времени. На схеме механического поведения материала каждому состоянию ставится в соответствие точка, обозначенная той же буквой, что и на рисунке изменения геометрии образца. Символы «пружинка», «поршень» и «зацепление» показывают, что соответствующие состояния связаны уравнениями теории гиперупругих материалов, теории течения неньютоновской жидкости и теорией пластического течения при конечных деформациях. Если речь идет об однородно деформированном образце, то все рассматриваемые состояния (обозначенные буквами А, В, С, G) существуют в реальном мире, определяются однозначно и могут исследоваться экспериментально.

Важным моментом при переходе от структурного к макроскопическому уровню в структурно-феноменологической модели является удовлетворение требований термодинамической согласованности параметров. Заключаются они в следующем:

1. Скорость совершения работы и скорость необратимых потерь, выделяемых в виде тепла, вычисленные с помощью параметров макроскопического уровня, должны совпадать со значениями соответствующих величин, рассчитанных с помощью параметров структурного уровня.
2. Если на структурном уровне происходит циклический процесс, то и на макроскопическом уровне должен осуществляться циклический процесс.
3. Если все компоненты материала являются несжимаемыми и в материале отсутствуют микроразрывы, то и на макроскопическом уровне материал должен быть несжимаем.

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-

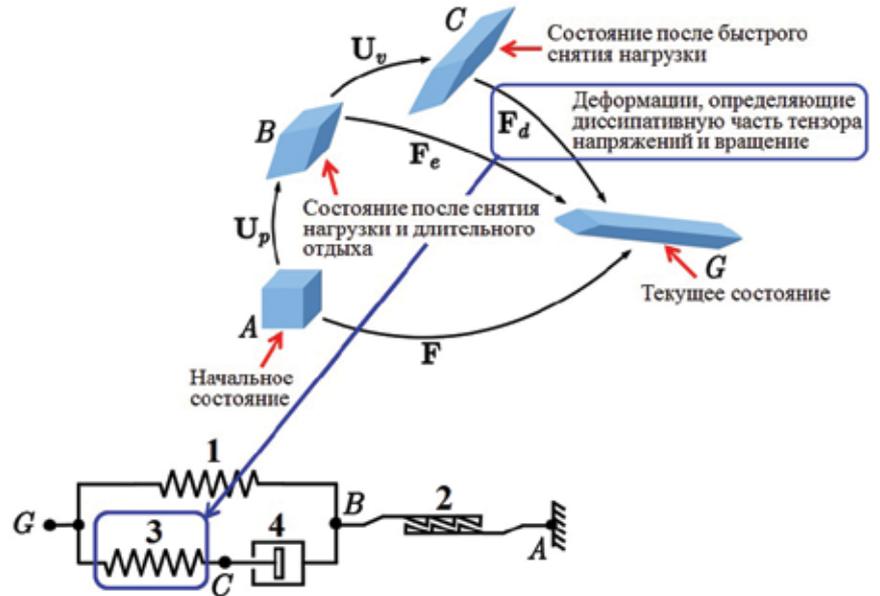


Рис. 7. Иллюстрация идеи использования множества конфигураций для построения определяющих уравнений среды, обладающей упруговязкопластическими свойствами и работающей в условиях конечных деформаций. Точками A, B, C, G на схеме обозначены состояния материала, а два упругих, вязкий и пластический элементы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

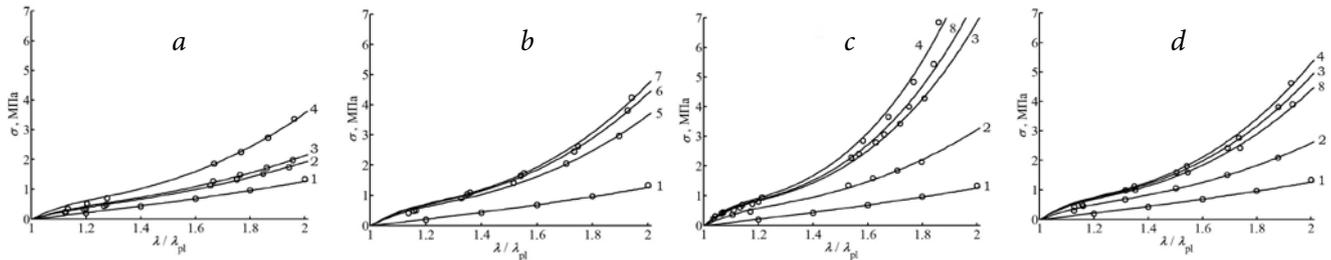


Рис. 8. Зависимость напряжения от отношения кратности удлинения материала λ к кратности остаточного удлинения λ_{pl} для наполненных эластомеров с массовыми долями наполнителя $\phi_{fr}=30$ (a), 40 (b,c) и 50 (d). Кривые для материалов с наполнителем: 1 – ненаполненный эластомер; 2 – Aerosil R974; 3 – 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 – бутадиенстирольный 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. Евлампиева

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2013617009, 2013.

7. С.Е. Евлампиева, 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.

Явление образования «холодных термик» 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 термик» 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 термик».

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 массопереноса 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 термик» 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

установлено семь термопар, на модели кристалла – три термопары для контроля распределения температуры на стенках в радиальном и азимутальном направлениях.

В экспериментах по кристаллизации гептадекана вытягивания кристалла не происходит, но создаются такие условия охлаждения вала 4, чтобы на его нижней поверхности 3 поддерживалась заданная температура $T_s < T_M$. В расплавленном состоянии гептадекан является прозрачным, но его прозрачность исчезает по мере отвердевания. Граница расплава и закристаллизовавшейся фракции является достаточно отчетливой и может быть зафиксирована цифровой видеокамерой. Кроме этого, может быть измерена температура в ряде контрольных точек с помощью термопарного зонда 9.

Математическое моделирование

Прямое численное моделирование на основе решения нестационарных уравнений Навье–Стокса и конвективного теплопереноса проводили применительно к упрощенной (т.е. только гидродинамической) CZ-модели. В процессе решения рассчитывали усредненные по времени поля значения скорости, температуры и спектры их колебаний в ряде контрольных точек, соответствующих расположению датчиков в лабораторной модели.

Геометрия расчетной области и расположения контрольных точек в жидкости для регистрации пульсаций температуры показаны на рисунке 2. Жидкость заполняет цилиндрическую тигель радиуса $R_c = 0.1475$ м до высоты $H = 0.1032$ м. Диск радиуса $R_s = 0.0536$ м расположен на поверхности жидкости коаксиально с тиглем.

В спирте координаты контрольных точек были следующие ((z, r), м): $S^1 - (0.0982, 0.0268)$; $S^2 - (0.05, 0.0268)$; $S^3 - (0.0516, 0.1425)$; в гептадекане: $S^1 - (0.0516, 0.0134)$; $S^2 - (0.005, 0.0134)$; $S^3 - (0.0516, 0.1425)$.

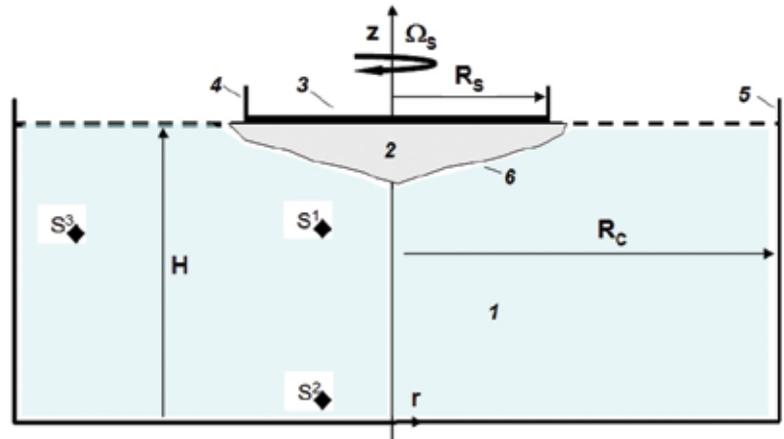


Рис. 2. Схема расчетной модели: расплав (1) и кристалл (2) модельного материала; термостатированная при $T_s < T_w$ поверхность (3) диска (4); цилиндрический тигель (5) с термостатированной боковой стенкой при T_w и теплоизолированным дном; ФК при температуре плавления T_M (6); контрольные точки для записи температуры $S^1 - S^3$.

Структура потока определяется как тепловой конвекцией (термогравитационной в объеме жидкости и термокапиллярной на ее свободной поверхности), так и вращением диска с угловой скоростью Ω_s .

Тепловые условия следующие: температура диска $T_s = 300.00$ (для этанола) и 292.53 К (для гептадекана), дно тигля теплоизолировано, а его боковая стенка нагревается до температуры $T_w = T_s + \Delta T$.

Скорость, колебания температуры и динамика «холодных термиков» под кристаллом были исследованы в зависимости от температуры нагрева тигля. В этаноле переход к гидродинамически нестабильным потокам изучали при различных температурных перепадах между боковой стенкой тигля и диском: $\Delta T = 1 - 15$ К. В гептадекане исследование проведено при фиксированной величине перепада температуры $\Delta T = 3.37$ К.

Численное решение проводили с помощью метода контрольных объемов, причем в случае этанола использовали методику расчета в приближении Буссинеска [6] для осесимметричной и трехмерной постановок задач. В расчетах с учетом кристаллизации расплава гептадекана использован пакет программ *AnsysFluent*[®] и задавались температурные зависимости плотности $\rho(T)$, теплопроводности $\lambda(T)$ и динамической вязкости жидкости $\mu(T)$. В этом случае предполагалось, что между кристаллом (твердой фракцией) и расплавом (жидкой фракцией) существует промежуточная фракция – область кристаллизации при значениях температуры T , больших температуры солидуса T_{SOL} и меньших температуры ликвидуса T_{LIQ} .

В расчетах используется единая разностная сетка: для осесимметричного случая 15750 узлов ($r \times z$:

150×105), для трехмерного 378000 узлов ($r \times z \times \varphi$: 150×105×24), минимальный шаг сетки был примерно 1 мм. Анализ временной неустойчивости течения и теплообмена проводили на основе записей в каждой точке сетки для статистически однородного температурного поля в объеме жидкости. Затем усредняли итерационные решения по времени (полученные с шагом 0.01 с) для интервала 200 с. Одновременно рассчитывались средние квадратичные отклонения пульсаций температуры. Достижение времени статистически однородного поля температуры контролировали по данным пульсаций температуры в контрольных точках $S^1 - S^3$. Для этих контрольных точек были также рассчитаны

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, $Re = R_s^2 \Omega_s/\nu$	–	$5.54 \cdot 10^2$ ($\Omega_s = 1$ рад/с)

Влияние нагрева тигля на образование «холодных термик»

В графическом виде эволюция «холодного термика» (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-

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

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.

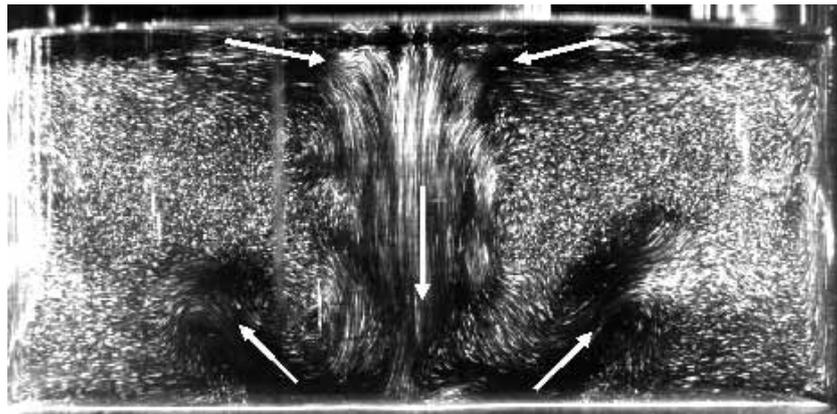


Рис. 3. Визуализация структуры течения с помощью мелкодисперсных частиц. Стрелками показаны направления течения жидкости.



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^1 показаны на рисунке 5. Эти спектры были построены на основе регистрации колебаний температуры в S^1 , 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.

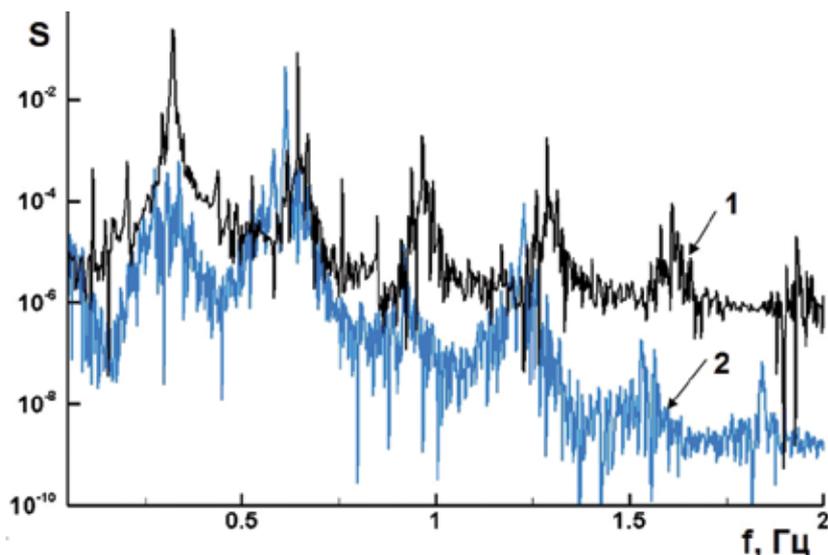


Рис. 5. Расчетная спектральная мощность колебаний температуры в контрольной точке S^l при $\Delta T = 15$ К в осесимметричном (1) и трехмерном (2) случаях.

Данные лабораторного моделирования также соответствовали дискретным спектрам ламинарно-турбулентного перехода и удовлетворительно согласовывались с приведенными выше результатами расчетов.

Образование «холодных термиков» при кристаллизации гептадекана

Согласно данной модели (рис. 2) в тигле находится расплавленная фракция 1 кристаллизующего при температуре T_M материала. Его расплавленное состояние обеспечивается нагревом боковой стенки тигля 5 до температуры $T_W > T_M$. Дно тигля и свободная поверхность расплава (пунктирная линия) предполагаются адиабатическими. Центральная часть поверхности расплава закрыта жестким диском, соосным с тиглем. На всей поверхности 3 охлаждаемого диска 4 поддерживается температура $T_S < T_M$. Диск может вращаться со скоростью Ω_S , на расплав действует сила тяжести g . Охлаждение диска приводит к кристаллизации расплавленного материала под поверхностью диска с образованием затвердевшей области 2.

Нагрев боковой стенки тигля вызывает в гравитационном поле g тепловую конвекцию, при которой нагреваемый расплав движется вверх вдоль этой стенки к охлаждаемому диску. Это движение усиливается действием термокапиллярных сил на свободной поверхности расплава. Вблизи диска происходит кристаллизация расплава с образованием твердой фракции, объем и форма которой зависит от режима конвекции.

В лабораторном эксперименте был рассмотрен режим тепловой конвекции в гептадекане при сле-

дующих задаваемых температурах: на диске $T_S = 292.53$ К, на боковой стенке $T_W = 295.9$ К. Этот вариант использован для верификации результатов математического моделирования. Анализировали формирование формы ФК.

Расчетный тест соответствовал данным лабораторного эксперимента. Расчетную форму ФК определяли по изотерме солидуса T_{SOL} . Особенность теплопереноса в расплаве при кристаллизации гептадекана (как и для оксидных и органических материалов) состояла в большом значении числа Прандтля ($Pr = 66.37$). Тепловые условия задавали, как в лабораторном эксперименте: на диске $T_S = 292.53$ К, на боковой стенке тигля $T_W = 295.9$ К (т.е. разность температур $\Delta T = 3.37$ К). Предполагалось действие термогравитационной и термокапиллярной конвекции, а также вынужденной конвекции от вращения диска с угловой скоростью $\Omega_S = 1$ рад/с (см. критерии подобия этого теста в таблице 1).

В соответствии с картиной течения, показанной на рисунке 6, основное подъемное движение происходит за счет термогравитационной конвекции вблизи боковой стенки тигля. Скорость подъемного течения достигает 7.7×10^{-4} м/с. Оно несколько усиливается в радиальном направлении к ФК в приповерхностном слое за счет действия термокапиллярных сил. Охлаждение диска приводит к кристаллизации расплава в подкристалльной области с формированием выпуклой в расплав отвердевшей области. Однако вращение диска существенно влияет на течение расплава в подкристалльной области. Центробежные силы, возникающие при вращении твердой выпуклой области, создают вихревое движение (вынужденную конвекцию) противоположно направлению тепловой конвекции. Линейная скорость вращения кромки закристаллизовавшейся части достигает большой величины (5.56×10^{-2} м/с), что вовлекает во

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-

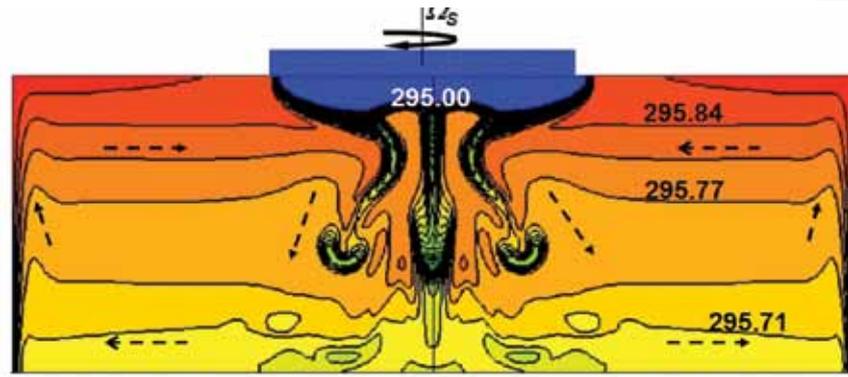


Рис. 6. Образование «холодных термиков» под фронтом кристаллизации ($T_m = 295.00$ К) при кристаллизации гептадекана в режиме совместного действия тепловой конвекции и вращения закристаллизовавшейся области. Сплошные линии – изотермы со значениями температуры [К]. Направление основного течения расплава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

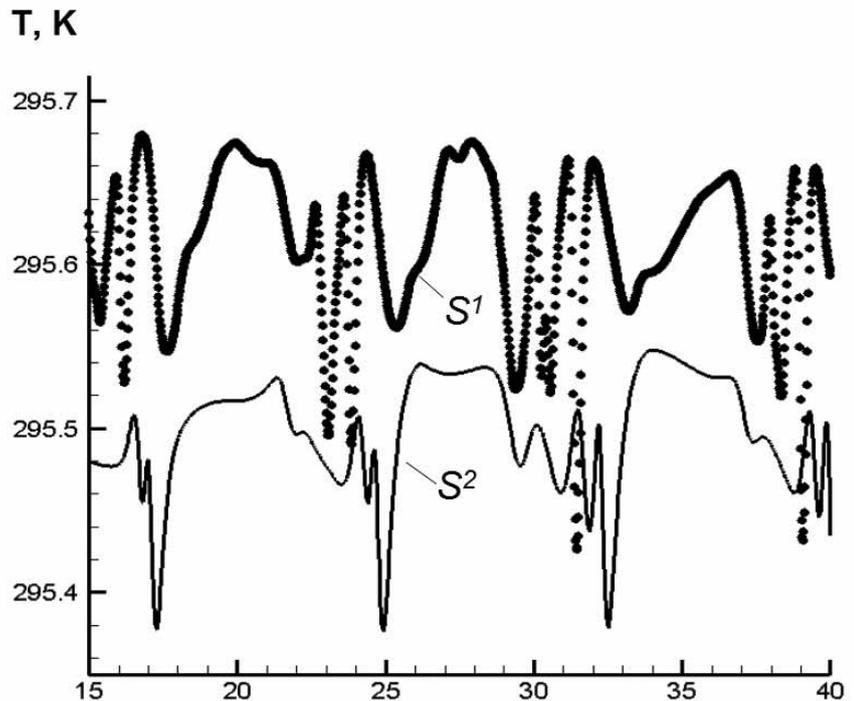


Рис. 7. Графики колебаний температуры в контрольных точках S^1 и S^2 .

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-

Источник сильноточного релятивистского сфокусированного электронного пучка на основе плазмонаполненного диода*

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

Плазмонаполненный диод позволяет совмещать функции источника электронного пучка и прерывателя тока. В этом случае мощность диода определяется запасенной в индуктивности контура энергией и скоростью нарастания сопротивления диода. Проблема увеличения мощности сводится к сохранению переходной характеристики сопротивления диода при наращивании запасаемой в индуктивности энергии.

Исследована возможность увеличения мощности электронного источника. Эксперименты с энергией индуктивного накопителя до 3.5 кДж выполнены на линейном импульсном трансформаторе (53 нФ, 480 кВ). Эксперименты с энергией индуктивного накопителя, равной 7 кДж, выполнены с использованием промежуточного емкостного накопителя в виде коаксиальной линии с водяным заполнением (5.3 Ом, 56 нс, 1.5 МВ), заряжаемого от генератора Маркса.

Получено сохранение скорости нарастания сопротивления диода в высокоомной фазе на уровне около 0.5 Ом/нс при увеличении запасаемой в индуктивности энергии от 0.2 до 7 кДж. В результате напряжение на диоде выросло от 0.2 до 1.9 МВ, мощность диода выросла от 7 до 250 ГВт.

Результаты экспериментов позволяют проводить дальнейшее масштабирование по мощности электронного источника.

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

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-00109-а).

Введение

В настоящее время исследования в области генерации релятивистских сильноточных сфокусированных электронных пучков субтераваттного уровня мощности и выше, в частности, стимулируются целями получения импульсов тормозного рентгеновского излучения для импульсной рентгенографии в гидродинамических экспериментах [1] и генерации макроскопических объемов горячей плазмы [2, 3]. В современных источниках мощного сфокусированного электронного пучка в основном применяют вакуумные диоды: пинч-диоды, стержневые пинч-диоды, параксиальные диоды и диоды с магнитной изоляцией [1, 4]. Выходное напряжение существующих

источников лежит в диапазоне 0.8–10 МВ. Высокое сопротивление вакуумных диодов >50 Ом ограничивает ток электронного пучка <100 кА и, следовательно, мощность пучка. Кроме того, ограничена возможность использования низкоомных сильноточных генераторов для таких диодов.

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



ЕФРЕМОВ

Анатолий Михайлович

Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук



ЖЕРЛИЦЫН

Андрей Алексеевич

Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук



КОВАЛЬЧУК

Борис Михайлович

Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук



ПЕДИН

Николай Николаевич

Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук



ХАРЛОВ

Анатолий Васильевич

Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук

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-

жение (1) правомерно лишь в случае, если время нарастания сопротивления диода превышает длительность фронта генерируемого напряжения. Максимальная мощность рассеивания энергии в диоде

$$P_d = I_0^2 \sqrt{\frac{kL}{2e}} = \frac{W_0}{\sqrt{L}} \sqrt{2k/e} \quad (2)$$

достигается в момент времени $t_p = \sqrt{L/2k}$.

Данный упрощенный анализ дает связь между мощностью и скоростью нарастания сопротивления диода, током диода, индуктивностью контура. В соответствии с уравнением (2) задача увеличения мощности может быть решена за счет увеличения запасаемой энергии в индуктивности контура при условии сохранения переходной характеристики сопротивления диода. При этом прирост мощности можно осуществить как за счет тока низкоомной фазы, так и за счет напряжения высокоомной фазы плазмонаполненного диода.

Схема эксперимента

Отличительной особенностью конфигурации нашего диода является размещение источника плазмы на центральном катодном проводнике и, соответственно, инжекция плазмы в направлении внешнего анодного проводника. Такой вариант целесообразнее с точки зрения практического использования генерируемого электронного пучка и позволяет сводить несколько сфокусированных пучков на общую мишень, наращивая удельную мощность энерговыделения на аноде.

Конструкция диода показана на рисунке 1. Энергия к диоду подводится по вакуумной коаксиальной линии 1 с диаметром внешнего проводника 202 мм. На конце линии установлен катод в виде трубки 2 из нержавеющей стали с внутренним диаметром

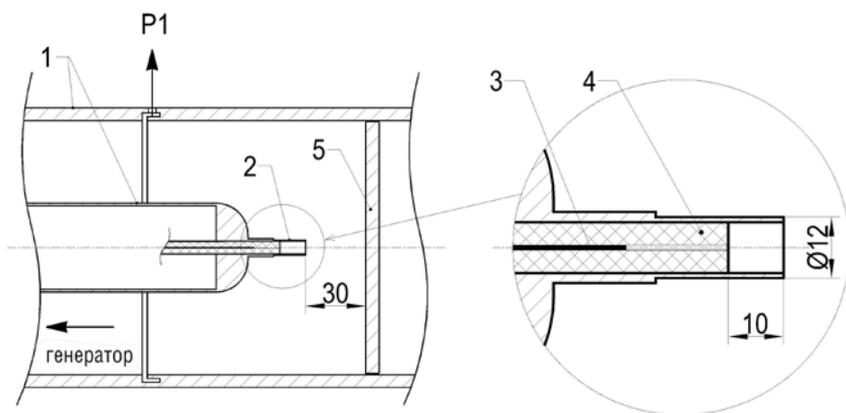


Рис. 1. Конструкция плазмонаполненного диода: 1 – передающая вакуумная линия; 2 – внешний электрод плазменной пушки и потенциальный электрод диода; 3 – центральный проводник плазменной пушки; 4 – изолятор пушки с каналом разряда; 5 – анод диода; P1 – индуктивный датчик тока диода.

10 мм. Плазма образуется в результате разряда в капилляре диэлектрика 4 между центральным электродом пушки 3 и катодом диода 2. Материал диэлектрика – силиконовая резина. Диаметр капилляра 0.4 мм. Расстояние между катодом 2 и анодом 5 составляет 30 мм.

В качестве питающего генератора в первой серии экспериментов использовали линейный импульсный трансформатор с шестью последовательно включенными ступенями [11]. Конструкция и фотография трансформатора приведены на рисунках 2 и 3. Ступень трансформатора содержит четыре параллельно включенных конденсаторных блока 1 [12] и три ферромагнитных сердечника 2. Вторичный виток трансформатора образуется вакуумной коаксиальной линией 3 и плазмонаполненным диодом. Линия и нагрузка откачиваются турбомолекулярным насосом ТМН-500 до остаточного давления не более 5×10^{-5} торр. Эквивалентная емкость первичного накопителя линейного трансформатора 53 нФ, запасаемая энергия 6.1 кДж при зарядном напряжении 80 кВ.

Блочная конструкция трансформатора позволяет варьировать количество параллельно включенных конденсаторных блоков в ступени и число последовательно включенных ступеней, изменяя параметры электрического контура и скорость нарастания тока в нагрузке. Также скорость нарастания тока варьируется изменением индуктивности контура за счет диаметра центрального проводника вакуумной коаксиальной линии трансформатора.

Система регистрации состоит из резистивных делителей напряжения на выходе каждой ступени и индуктивных датчиков тока в линии и диоде. Напряжение на диоде рассчитывается из измеренного напряжения на выходе ступеней с учетом индуктивного падения на участке до диода. Мощность и сопротивление диода вычисляются из напряжения и тока диода.

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.

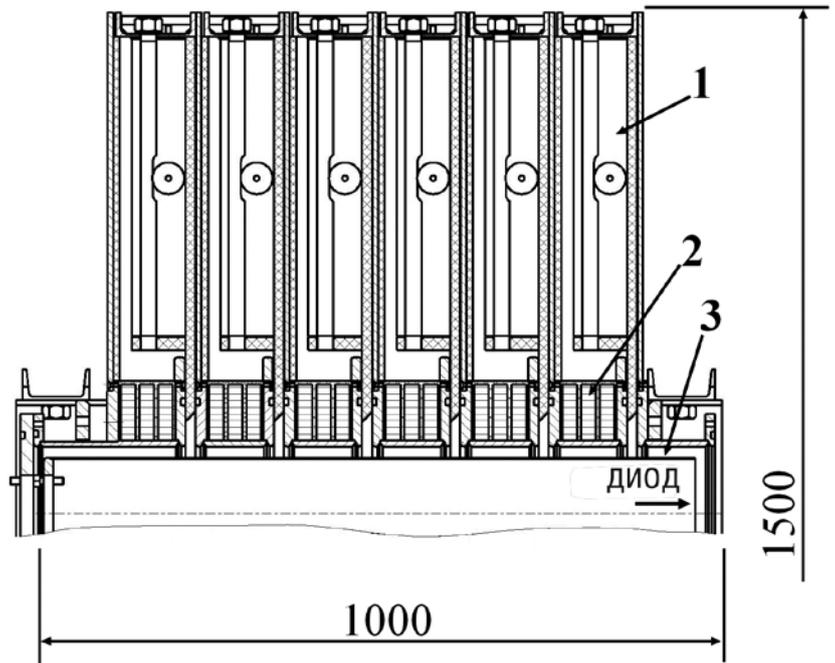


Рис. 2. Конструкция линейного импульсного трансформатора без нагрузки (вид сверху): 1 – конденсаторный блок; 2 – сердечники ступени; 3 – вакуумная коаксиальная линия.



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.

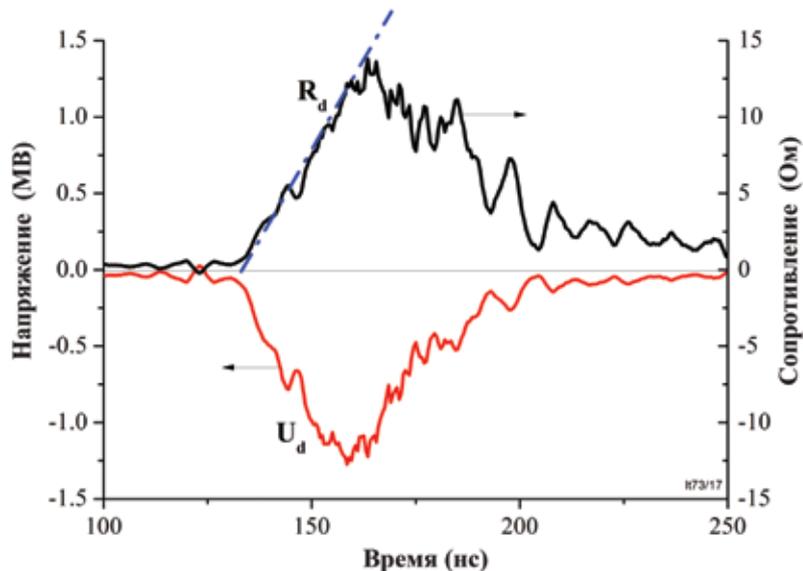


Рис. 5. Напряжение U_d и сопротивление диода R_d для режима разряда 5.

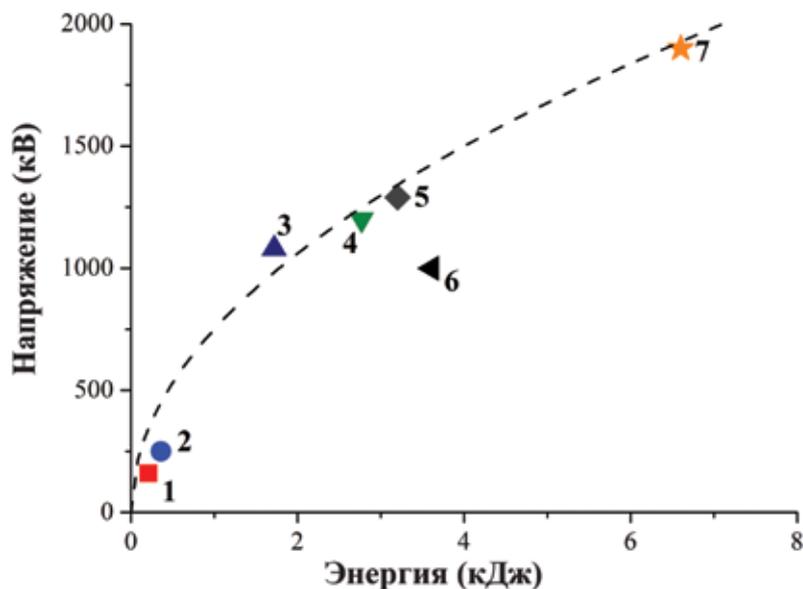


Рис. 6. Экспериментальные значения напряжения на диоде U_d в зависимости от запасаемой энергии W_0 . Пунктирной линией показана расчетная кривая $U_d = \text{const} \times W_0^{1/2}$.

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

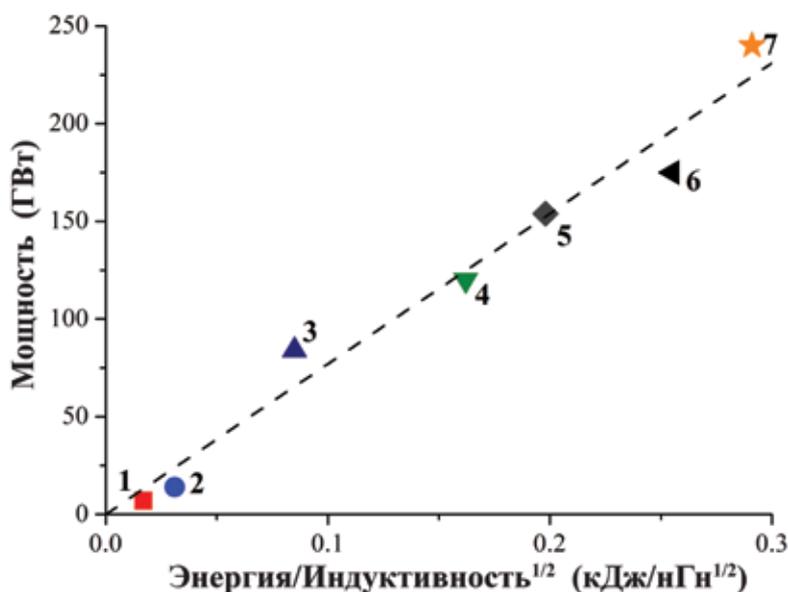


Рис. 7. Экспериментальные значения мощности диода P_d в зависимости от отношения запасаемой энергии к индуктивности контура $W_f/L^{0.5}$. Пунктирной линией показана расчетная кривая $P_d = \text{const} \times W_f/L^{1/2}$.

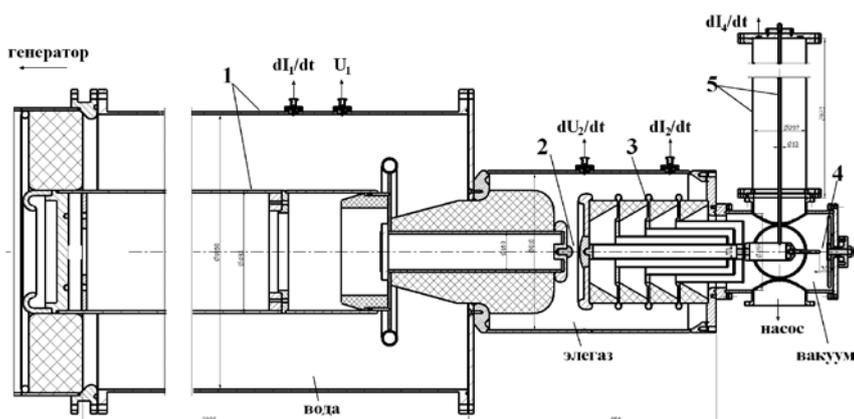


Рис. 8. Конструкция электронного источника (без генератора Аркадьева–Маркса).

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 $C_1 = 12$ нФ, индуктивность $L_1 = 12$ 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 регистрируются 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-

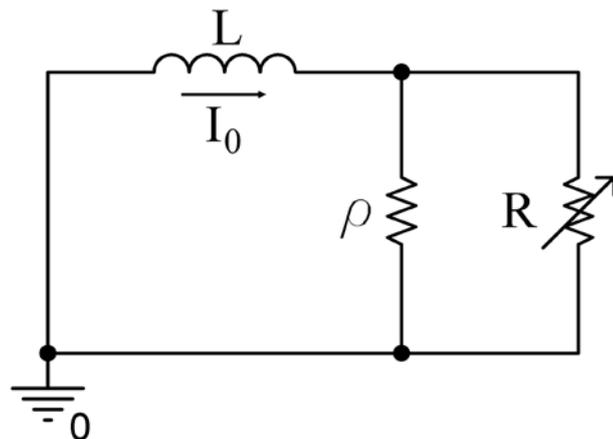


Рис. 9. Схема замещения для высокоомной стадии плазмонаполненного диода.

кнutoй линии к началу высокоомной фазы плазмонаполненного диода $I_4 = 0.05 \times I_2$. При токе $I_2 = 160$ кА ток подмагничивания 8 кА, что существенно выше минимального тока.

Расчет с использованием модели [19, 20] показывает, что при токе подмагничивания 8 кА в линии с соотношением диаметров проводников 207/10 уменьшение волнового сопротивления при распространении волны напряжения амплитудой до 2 МВ составляет менее 2% от значения волнового сопротивления «холодной» линии. Поэтому для расчета напряжения на входе линии по току на короткозамкнутом конце оправдано использование постоянного значения волнового сопротивления 182 Ом.

Напряжение на входе линии U_4 рассчитывается по току I_4 с помощью выражения (5).

$$U_4(t) = 0.5Z_0 [I_4(t + \tau) - I_4(t - \tau)], \quad (5)$$

где τ – электрическая длина линии. Рассчитанное напряжение U_4 сопоставляется с напряжением U_3 в точке подключения линии.

В ряде выстрелов выполняли измерение тормозного рентгеновского излучения, генерируемого в плазмонаполненном диоде. В этом случае в качестве мишени для электронного пучка использовали тантал толщиной 300 мкм. Измерения проводили за фланцем из алюминия толщиной 10 мм на расстоянии 1 м от мишени. Для регистрации использовали рентгеновский детектор СКД1-01 и термолюминесцентные дозиметры ДПГ-03.

Результаты экспериментов

Тестирование генератора и системы регистрации выполнено при закороченном зазоре в плазмонаполненном диоде и зарядном напряжении 50 кВ. Результаты экспериментов показали достаточно высокий уровень потерь энергии на коммутацию первичного и вторичного накопителей. Суммарные потери энергии на их коммутацию в линии с водяным заполнением в короткозамкнутой линии составляют 4.1 кДж, или 25% от запасаемой в первичном емкостном накопителе. При напряжении в ударе генератора Аркадьева–Маркса 1.65 МВ напряжение на входе в вакуумную камеру U_2 не превышает 0.9 МВ. Ток нагрузки на линейном участке нарастания составляет лишь 140 кА. В связи с этим для реализации тока в плазмонаполненном диоде более 150 кА потребовалось увеличение зарядного напряжения до 60 кВ.

В экспериментах с плазмонаполненным диодом при зарядном напряжении 60 кВ получен ток диода в низкоомной фазе I_d 150–160 кА. Напряжение диода в высокоомной фазе U_d варьировали от 1.65 до 1.9 МВ.

Режим работы генератора на плазмонаполненный диод иллюстрирует рисунок 10. При времени задержки коммутации линии с водяным заполнением относительно инжекции плазмы 1.3 мкс полный ток в вакуумной камере составляет $I_2 = 160$ кА. При этом к началу резкого роста напряжения в короткозамкнутой вакуумной линии протекает ток $I_4 = 10$ кА, в диоде $I_d = 150$ кА. Запасаемая в индуктивности энергия – около 7 кДж. В высокоомной фазе напряжение на диоде U_d достигает 1.9 МВ. Пиковое значение сопротивления диода 15 Ом, средняя скорость нарастания сопротивления превышает 0.5 Ом/нс. В диоде рассеивается энергия $W_d = 8.5$ кДж с пиковой мощностью $P_d = 250$ ГВт. Мощность рентгеновского излучения на расстоянии 1 м за анодом из тантала толщиной 300 мкм и алюминия толщиной 10 мм достигает 10^8 Р/с. Доза излучения за импульс составляет более 2 Р.

На рисунке 11 показано напряжение на входе линии U_4 , рассчитанное по току на короткозамкнутом конце вакуумной линии I_4 в соответствии с выражением (5). Для сравнения на рисунке также показано напряжение в точке подключения линии U_3 , рассчитанное из измеряемых сигналов напряжения на изоляторе U_2 и производной тока dI_2/dt . Наблюдается хорошее соответствие расчетных кривых, что подтверждает достоверность определения напряжения на плазмонаполненном диоде.

Данные эксперимента добавлены на рисунках 6 и 7 (маркер 7). В эксперименте продемонстрировано сохранение переходной характеристики сопротивления плазмонаполненного диода. Вследствие этого данные находятся близко к значениям функций (1) и (2) при продвижении по шкале энергии, запасаемой в индуктивности, до 7 кДж. Полученные результаты показывают возможность масштабирования по мощности электронного источника на основе 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).

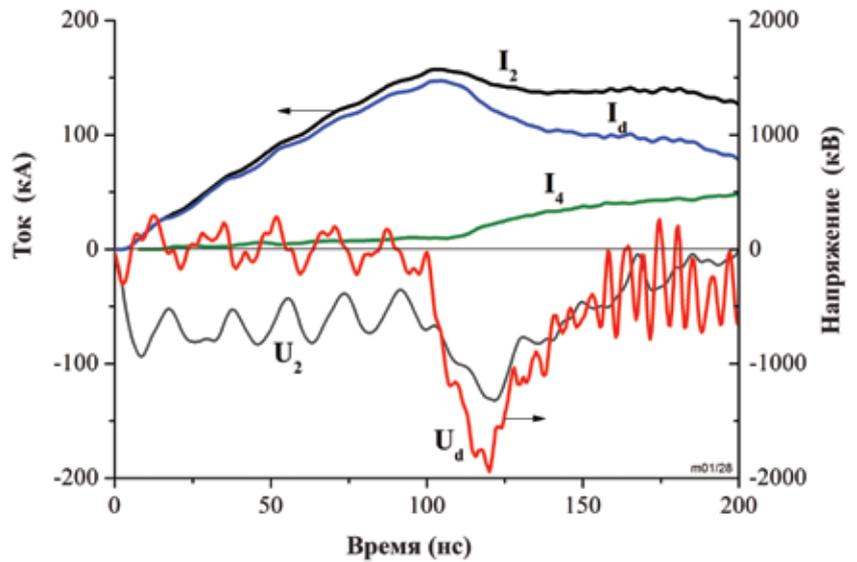


Рис. 10. Осциллограммы тока и напряжения при работе на плазмонаполненном диоде: полный ток в вакуумной камере I_2 , ток в короткозамкнутой линии I_d , ток в диоде I_d , напряжения на вакуумном проходном изоляторе U_2 и в диоде U_d .

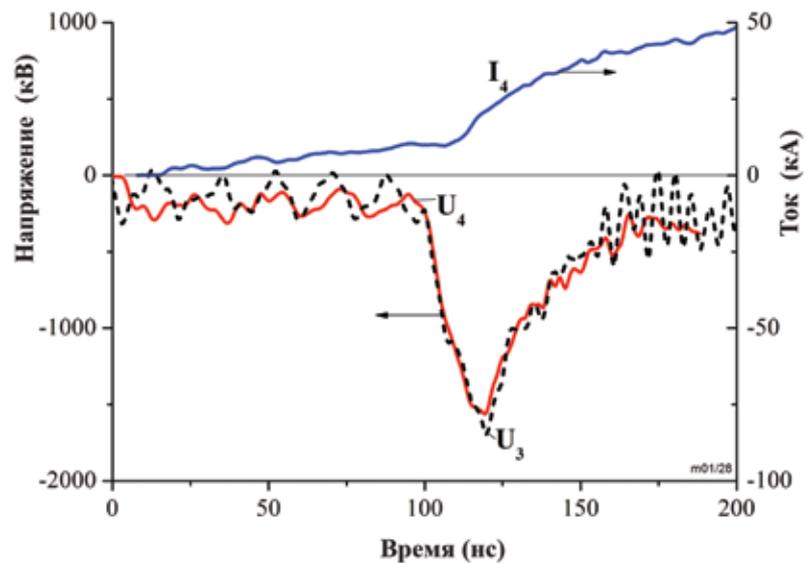


Рис. 11. Напряжение на входе линии U_4 (сплошная линия), рассчитанное из тока на короткозамкнутом конце I_d , U_3 – напряжение в точке подключения линии (пунктирная линия).

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,

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. В.Е. 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. Bastrikov, 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. А.А. Жерлицын, Б.М. Ковальчук, Н.Н. Педин *Журнал технической физики*, 2014, **84**, вып. 4, 132.
11. А.А. Зherlitsyn, B.M. Kovalchuk, G.V. Smorudov, N.V. Tsou, V.A. Visir, V.B. Zorin *Proc. 15th Int. Symp. High Current Electronics, Tomsk, Russia*, 21–26 September 2008, p. 296.
12. А.А. 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. Tsoy, 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. Tsoy, 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. Tsoy, 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»

скольжению конька. Кроме этого, они демпфируют взаимодействия кристаллов при агрессивном воздействии коньков, улучшают прочностные свойства льда и купируют развитие возникающих трещин [2]. Исследования предыдущих лет, проведенные по контрактам с Министерством спорта РФ и в рамках проекта РФФИ, позволили из неограниченного множества высокомолекулярных соединений выбрать те группы, которые в силу строения и свойств способны в максимальной степени снижать фрикционное взаимодействие между коньком и льдом и интенсивность межкристаллических взаимодействий.

При этом предполагалось, что скользящие поверхности конька или полоза априори уже прошли механическую обработку, нивелирующую неровности и дефекты. Однако визуализация состояния поверхностей коньков показала, что даже на уровне сборных команд России после штатной обработки поверхности соответствуют классу не выше 7–8 в конькобежном спорте и шорт-треке, еще ниже для хоккейных коньков, а глубина поверхностных дефектов достигает 5–10 и 20–30 мкм соответственно (рис. 2). Обнаруженные рваные кромки, царапины, точечные

дефекты порядка десятков микрон потребовали «замкнуть» задачу со стороны твердого тела и использовать возможности новейших методов наноструктурирования, позволяющие кардинальным образом менять свойства поверхности.

Согласно концепции молекулярно-механической природы трения И.В. Крагельского сила сопротивления скольжению определяется молекулярной и деформационной составляющими: $F_{тр} = F_{мол} + F_{деф}$. При взаимодействии твердых тел выступы и микронеровности не совпадают, и по образному сравнению Ф. Боудена [3] «...наложение двух твердых тел одного на другое подобно наложению перевернутых швейцарских Альп на австрийские Альпы». Сопротивление сдвигу этих «горных вершин» и является основным источником деформационной составляющей трения. При низком уровне обработки поверхности скольжения высота выступов существенно больше величины образующейся жидкостной пленки, поэтому доведение класса обработки до 12–13 является необходимым условием качественного скачка в снижении $F_{деф}$. При достижении 12–13 класса чистоты обработки лезвия конька большой вклад в суммарную силу сопротивления скольжению начинает вносить молекулярная (или адгезионная) составляющая трения $F_{мол}$, т.е. на первый план исследования выходят такие понятия, как гидрофобность поверхности конька и поверхностное натяжение жидкости в контактной зоне, совокупно определяющие силу адгезии между ними.

Модификация структуры ледового покрытия

В зависимости от вида спорта состав и концентрации вносимых в лед модификаторов различны, однако наиболее значимым требованием считается стабильность полученных свойств, которая неразрывно связана с поддержанием оптимального состава и структуры приповерхностных

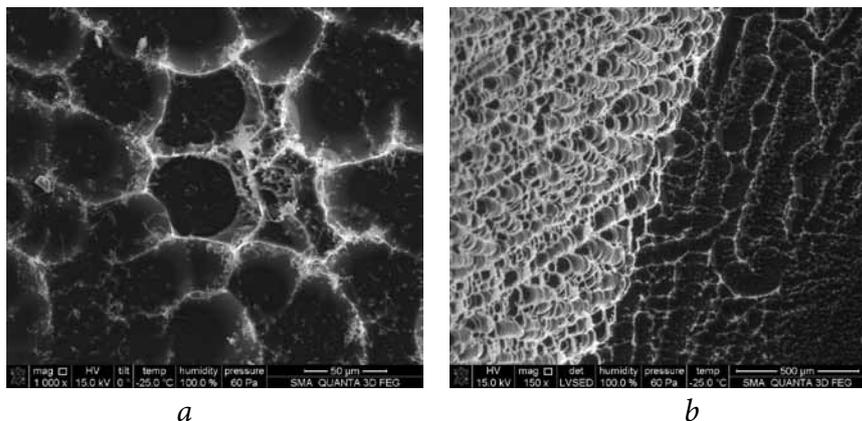


Рис. 1. Криомикроскопическое изображение модифицированного льда: вид сверху (a) и боковой скел (b).

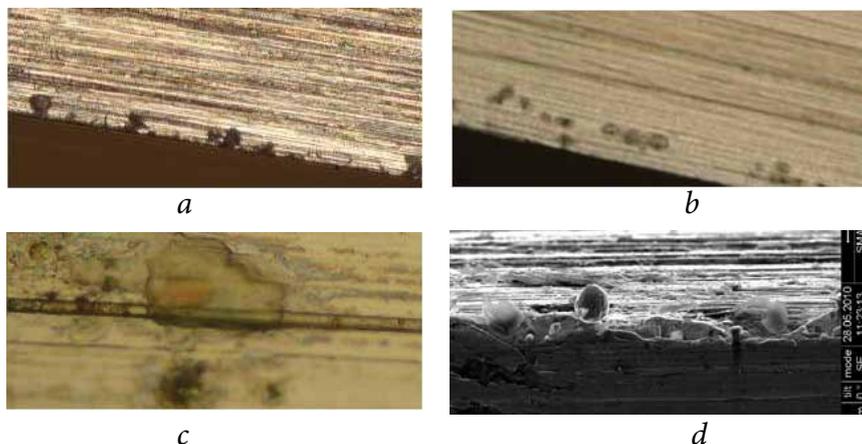


Рис. 2. Скользящая поверхность лезвий с увеличением в 50 (a, b) и 500 (c) раз и кромка лезвия (d) с увеличением в 1000 раз.

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 $\xi_{нач}$ по глубине δ ледового массива $\xi_{нач} = f(\delta)$. Далее изучали закономерности перераспределения модификаторов ξ^t 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-

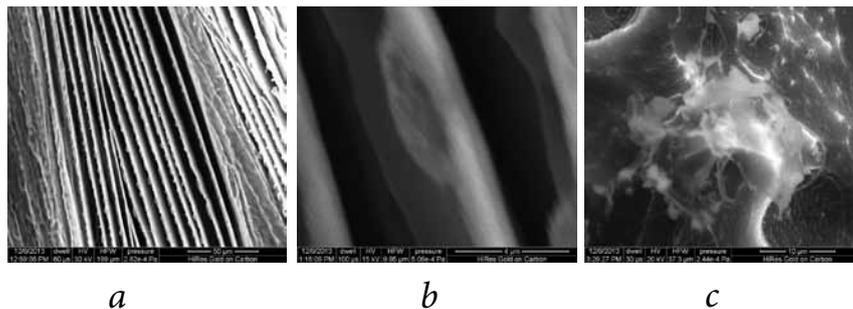


Рис. 3. Структура льда с фторсодержащей суспензией ФС (увеличение в 1500 (а) и 30000 раз (b)) и смесь в штатной концентрации (с, увеличение в 8000 раз).

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

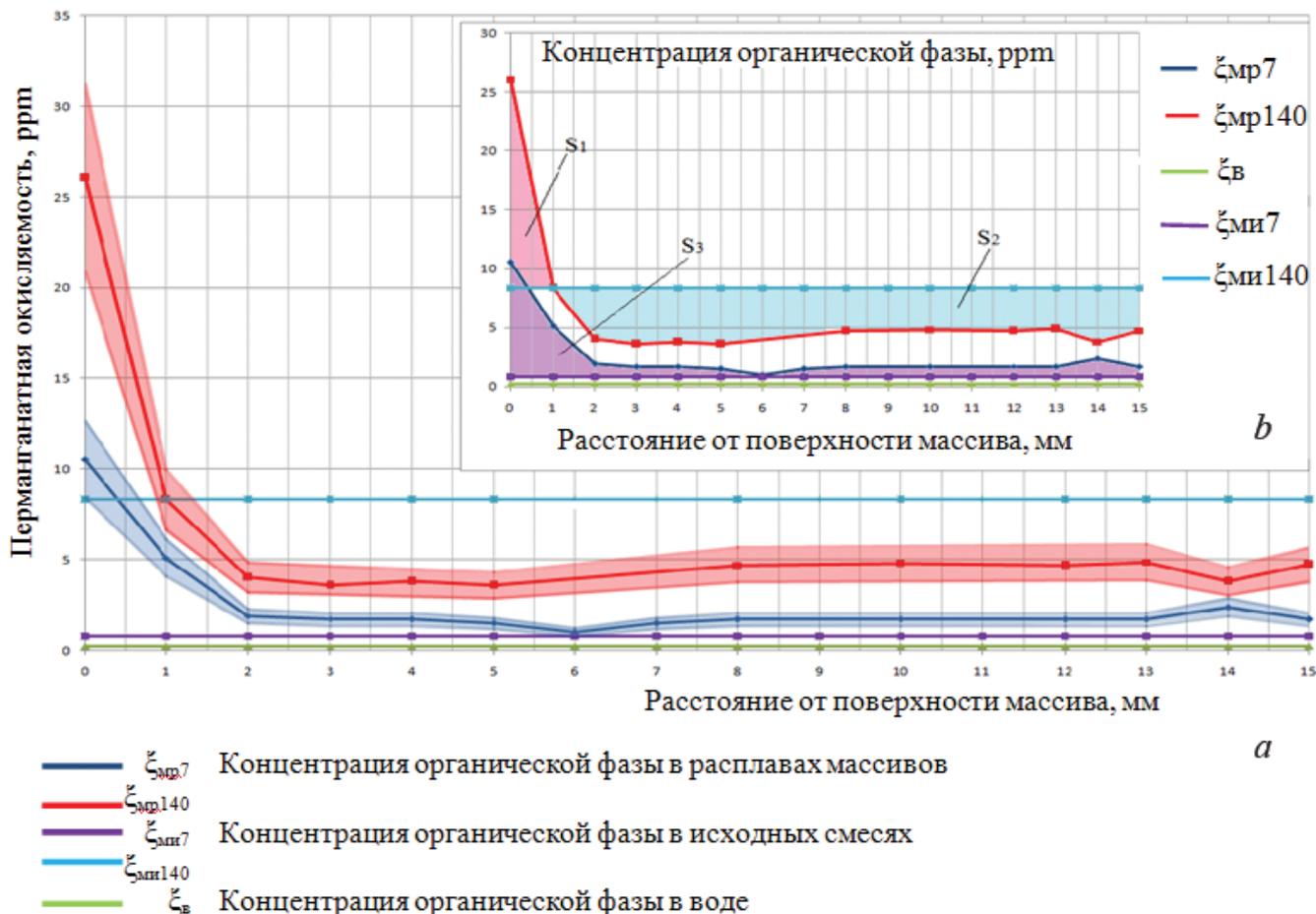


Рис. 4. Результаты химических анализов расплавов льда верхней зоны ледового массива.

заливок чистой водой до уровня 20 мм и далее с помощью миниатюрного ледозаливочного 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) $\xi_{\text{мин}} = 7$ 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. 1b*).

На *рисунке 4b* 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

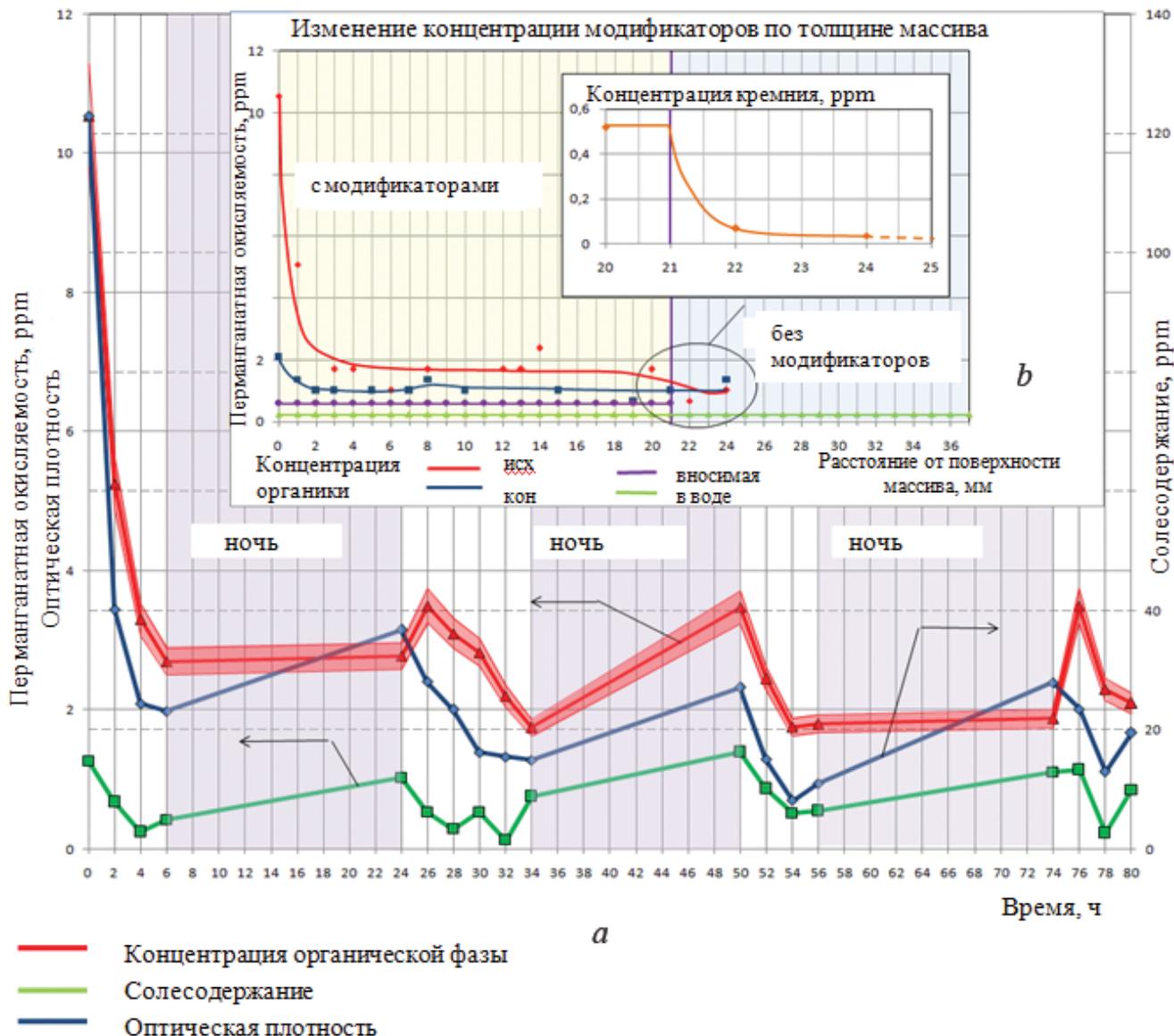


Рис. 5. Концентрация модификаторов в поверхностном слое.

зависит динамика изменения поверхностной концентрации внесенных соединений.

Эта задача имеет большое практическое значение для определения времени сохранения ледовым покрытием своих свойств за счет «подтягивания» модификаторов из внутренних слоев льда. С этой целью на ФЛП была проведена серия экспериментов, в которых сначала намораживали модифицированный ледовый массив, а затем по аналогии с реальным процессом эксплуатации проводили периодические подрезки льда и заливки горячей водой без внесения добавок. Результаты представлены на *рисунке 5*.

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

различными методами элементного анализа. Из рисунка можно видеть, что результаты, полученные спектроскопическим методом, и данные перманганатной окисляемости идентичны. Большую точность имеют данные, полученные с помощью спектроскопии (синяя линия), так как первоначально нами были сняты спектры исходных веществ и их смесей во всем используемом диапазоне концентраций. Аналогичный тренд имеет и зависимость от времени солевого содержания расплавов льда (зеленая линия).

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 $F_{деф}$ должно быть искусственное увеличение гидрофобности поверхности

скольжения для снижения адгезионной составляющей силы трения $F_{тол}$. 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 Барлоттом и Найнуисом 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

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, теплообмена, 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 теплообмена 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 имплементируются в промышленные и исследовательские вычислительные коды (CFD-коды).

Постановка задачи. Рассматриваются турбулентные двухфазные парокapельные 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:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho W_i}{\partial x_i} = 0, \tag{1}$$

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

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

Здесь $\rho = (1 - \Phi)\rho_g + \Phi\rho_\ell \approx \rho_g + M$ – плотность двухфазной парокapельной 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_p, 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

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

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

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

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

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}_{α} – 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):

$$L_{\gamma k} = \int_{m_{\gamma}^0}^{m_{\gamma+1}^0} m^k P_m(m) dm,$$

$$\frac{\partial L_{\alpha k}}{\partial \tau} + \frac{\partial V_i L_{\alpha k}}{\partial x_i} = I m_*^k \delta_{1\alpha} + k \int_{m_{\alpha}^0}^{m_{\alpha+1}^0} m^{k-1} J(m) P_m(m) dm +$$

$$+ \frac{1}{2} \int_{m_{\alpha}^0}^{m_{\alpha+1}^0} \int_0^{\infty} [(m_1 + m_2)^k - m_1^k - m_2^k]. \quad (13)$$

Здесь m_{α}^0 – некоторое значение массы, заключенное между $\bar{m}_{\alpha-1}$ и \bar{m}_{α} . 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 $k = 1$.

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

$$\frac{\partial M_{\alpha}}{\partial \tau} + \frac{\partial V_i M_{\alpha}}{\partial x_i} = I \bar{m}_1 \delta_{1\alpha} + J(\bar{m}_{\alpha}) N_{\alpha}. \quad (14)$$

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-

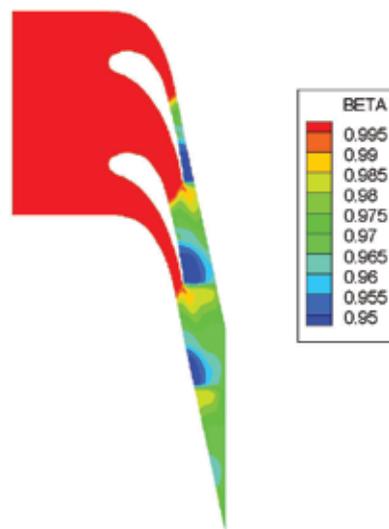


Рис. 3. Распределение степени сухости в канале решетки С9012 [12].

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 С9012. 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,

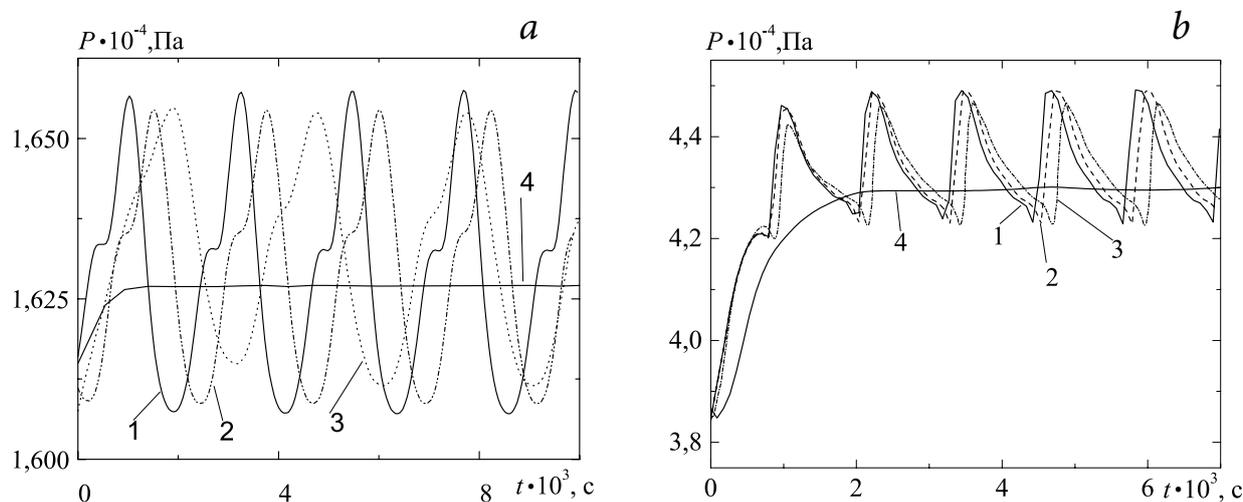


Рис. 4. а – Осцилляции давления в сопле [10] при $\chi_0=0.02$ (1), 0.06 (2), 0.10 (3) и 0.15 (4); б – осцилляции давления в сопле [12] при $\chi_0=0.02$ (1), 0.04 (2), 0.06 (3) и 0.10 (4).

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 $\epsilon_0 = k_0^{3/2}/h_0$, 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 Tulsкая 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. Philippov, 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. 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. **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).*

Метод решения кинетического уравнения Больцмана

Для решения кинетического уравнения Больцмана

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \xi \nabla f = I(\xi) \tag{1}$$

в скоростном пространстве выбирается область Ω объема V , в которой строится сетка из N^Ξ равноотстоящих скоростных узлов $\Xi = \{\xi_j\}$. В качестве области Ω обычно берется шар, радиус которого определяется условием, что функция распределения вне шара пренебрежимо мала [1]. Решение уравнения (1) на шаге по времени находится методом расщепления [2]. Используется симметричное расщепление на задачу адвекции на шаге $\tau/2$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \xi \cdot \nabla f = 0, \tag{2}$$

задачу релаксации на шаге

$$\frac{\partial f}{\partial t} = I(\xi), \tag{3}$$

и задачу адвекции на шаге $\tau/2$. Для аппроксимации уравнения (2) используются явные монотонные консервативные TVD-схемы второго порядка точности на прямоугольных или неструктурированных сетках в пространстве координат. Математическую основу описываемого подхода составляет консервативный метод вычисления интеграла столкновений $I(\xi)$, предложенный в работах [3–5] и обобщенный на случай смеси газов с большой разницей молекулярных масс [6].

Воспользовавшись свойством симметрии интеграла столкновений и свойствами δ -функции Дирака, запишем интеграл столкновений в скоростном узле ξ_γ в следующем виде:

$$I_\gamma[f_i, f_j] = \frac{1}{4} \int \left(\delta(\xi - \xi_\gamma) + \delta(\xi_* - \xi_\gamma) - \delta(\xi' - \xi_\gamma) - \delta(\xi'_* - \xi_\gamma) \right) (f'_i f'_j - f_i f_j) g b db d\varepsilon d\xi d\xi_* \tag{4}$$

Для вычисления уравнения (4) применяется метод интегрирования, основанный на регулярных сетках Коро-

бова [24], с оценкой сходимости, близкой к $O(1/N)$. Интегрирующая сетка из N_v узлов строится для $\xi_{\alpha_v}, \xi_{\beta_v}, b_v, \varepsilon_v$ в области $\Omega \times \Omega \times [0, 2\pi] \times [0, b_m]$ так, что $\xi_{\alpha_v}, \xi_{\beta_v}$ совпадают с узлами скоростной сетки Ξ . Скорости после столкновения $\xi'_{\alpha_v}, \xi'_{\beta_v}$ не лежат в узлах скоростной сетки, поэтому две последние δ -функции в выражении (4) требуют преобразования:

$$\delta(\xi_{\alpha_v} - \xi_\gamma) = (1 - r_v) \delta(\xi_{\lambda_v} - \xi_\gamma) + r_v \delta(\xi_{\lambda_v + s_v} - \xi_\gamma),$$

$$\delta(\xi_{\beta_v} - \xi_\gamma) = (1 - r_v) \delta(\xi_{\mu_v} - \xi_\gamma) + r_v \delta(\xi_{\mu_v - s_v} - \xi_\gamma).$$

Узлы $\xi_{\lambda_v}, \xi_{\lambda_v + s_v}, \xi_{\mu_v}, \xi_{\mu_v - s_v}$ и коэффициент r_v выбираются так, чтобы выполнялись законы сохранения массы, импульса и энергии. Коэффициент r_v находится из условия сохранения энергии $E_0 = (1 - r_v)E_1 + r_v E_2$, где $E_0 = \xi_{\alpha_v}^2 + \xi_{\beta_v}^2, E_1 = \xi_{\lambda_v}^2 + \xi_{\mu_v}^2, E_2 = \xi_{\lambda_v + s_v}^2 + \xi_{\mu_v - s_v}^2$. Выбор узлов $\xi_{\lambda_v}, \xi_{\lambda_v + s_v}$ должен обеспечивать выполнение условия $0 \leq r_v \leq 1$. Сохранение импульса обеспечивается симметричным выбором узлов $\xi_{\lambda_v}, \xi_{\lambda_v + s_v}$ и ξ_{μ_v} . Для вычисления $f'_{\alpha_v}, f'_{\beta_v}$ используется интерполяция, которая обеспечивает равенство нулю интеграла столкновений для максвелловского распределения

$$f'_{\alpha_v} f'_{\beta_v} = (f_{\lambda_v} f_{\mu_v})^{1-r_v} (f_{\lambda_v + s_v} f_{\mu_v - s_v})^{r_v}. \tag{5}$$

Окончательно формула вычисления интеграла столкновений приобретает следующий вид:

$$\sum_{v=1}^{N_v} B \left[(1 - r_v) (\delta_{\gamma^{\lambda_v}} + \delta_{\gamma^{\mu_v}}) + r_v (\delta_{\gamma^{\lambda_v + s_v}} + \delta_{\gamma^{\mu_v - s_v}}) - (\delta_{\gamma^{\alpha_v}} + \delta_{\gamma^{\beta_v}}) \right] \Delta_v, \tag{6}$$

$$\text{где } B = \frac{V \pi b_m^2 N^\Xi}{4 N_v},$$

$$\Delta_v = (f_{\alpha_v} f_{\beta_v} - (f_{\lambda_v} f_{\mu_v})^{1-r_v} (f_{\lambda_v + s_v} f_{\mu_v - s_v})^{r_v}) g_v.$$

Аналогичный проекционный метод применим для смеси газов. В этом случае уравнение Больцмана имеет вид:

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + \frac{p}{m_i} \cdot \nabla f_i = \sum_j \int (f_j(p_j) f_i(p) - (f_i(p_i) f_j(p)) \left| \frac{p}{m_i} - \frac{p_j}{m_j} \right| \sigma(\Theta, g) d^2 n d^3 p_j,$$

где f_i – функция распределения по импульсам молекул i -го сорта, $i = 1 \dots N$. Консервативность метода достигается переходом от функции распределения по скоростям к функции распределения по импульсам при условии, что сеточные шаги в импульсном пространстве для каждой из компонент смеси равны $\Delta p_i = \Delta p, i = 1 \dots N$. Каждый импульс после столкновений, как и прежде, проецируется на два узла на сетке. Метод хорошо работает при умеренном отношении молекулярных масс компонент смеси, однако равенство шагов в импульсных сетках приводит к увеличению числа узлов в сетках тяжелых компонент смеси. Число узлов растет согласно зависимости $N_i \sim \left(\frac{m_i}{m_{\min}} \right)^{\frac{3}{2}}$, что резко увеличивает трудоемкость

расчета при большом отношении масс.

Чтобы устранить этот недостаток, рассмотрим импульсные сетки с равномерным, но различным для каждой компоненты шагом Δp_i и будем осуществлять проецирование вкладов независимо для каждой компоненты смеси. После представления функции распределения и интеграла столкновений в базисе δ -функций, приведения интеграла столкновений к симметричному виду и применения кубатурной сетки Коробова $\{p_{\alpha_v} \cdot p_{\beta_v} \cdot n_v\}$ выражение для вычисления интеграла столкновений приобретает вид (7).

$$I_i(p_i) = \sum_{j=1}^N \sum_{v=1}^{N_v} B_v \left(\delta(p'_1 - p_\gamma) + \delta(p'_1 - p_\gamma) - \delta(p_{\beta_v} - p_\gamma) - \delta(p_{\alpha_v} - p_\gamma) \times f_j(p'_1) f_i(p') - f_i(p_{\alpha_v}) f_j(p_{\beta_v}) \right) \left| \frac{p_{\alpha_v}}{m_i} - \frac{p_{\beta_v}}{m_j} \right|, \quad (7)$$

где $\delta(p_{\alpha_v} - p_\gamma) = \delta_{\alpha_v, \gamma}$, $\delta(p_{\beta_v} - p_\gamma) = \delta_{\beta_v, \gamma}$ – символы Кронекера, $f_i(p_{\alpha_v}) = f_{i\alpha_v}$, $f_i(p_{\beta_v}) = f_{i\beta_v}$ – значения сеточной функции распределения. Так же, как и в случае простого газа, следующие величины требуют определения с помощью процедуры проецирования:

$$\delta(p_{\alpha_v} - p_\gamma), \delta(p_{\beta_v} - p_\gamma), f_i(p'), f_j(p'_1). \quad (8)$$

Для обеспечения сохранения массы, трех компонент импульса и энергии минимальное количество узлов проецирования равно пяти. Используемый шаблон $\Lambda_5 = \{0, i, j, k, 5\}$ проецирования показан на рисунке 1, где $s_{\lambda_v} = \frac{p_{\lambda_v} - p'_1}{\Delta p}$, $s_{\mu_v} = \frac{p_{\mu_v} - p'_1}{\Delta p}$, а p_{λ_v}, p_{μ_v} – ближайšie к p', p'_1 импульсы на сетке. Для функций $f_i(p')$ и $f_i(p'_1)$ применяется интерполяция, являющаяся аналогом интерполяции (5) и обладающая тем же свойством равенства нулю интеграла столкновений от максвелловской функции.

$$f_i(p'_1) = \prod_{\alpha \in \Lambda} f_i(p_{\lambda+\alpha})^{r_{\lambda\alpha}}. \quad (9)$$

Методом многоточечного проецирования удалось, в частности, рассчитать структуру ударной волны в смеси газов с большой разницей молекулярных масс и концентраций [25–27], где обнаружено значительное преобладание высокоэнергетических столкновений.

Проблемно-моделирующие среды

Проблемно-моделирующие среды (ПМС), представленные в публикациях [28, 29–36] позволяют эффективно решать широкий класс задач динамики разреженных газов. Ее главной частью являются солверы решения кинетического уравнения Больцмана, основанные на ранее разработанном проекционном методе вычисления интеграла столкновений. Как отмечалось, подобный подход позволяет моделировать и анализировать медленные течения газа в микро- и наноструктурах с высокой степенью точности. Особенностью анализа реальных физических систем является необходимость использования трехмерных моделей для описания процессов. По этой причине в ПМС имеются солверы, которые дают возможность проводить моделирование на основе двумерных моделей на прямоугольных структурированных и неструктурированных тетраэдрических сетках, позволяющих описывать произвольные трехмерные гео-

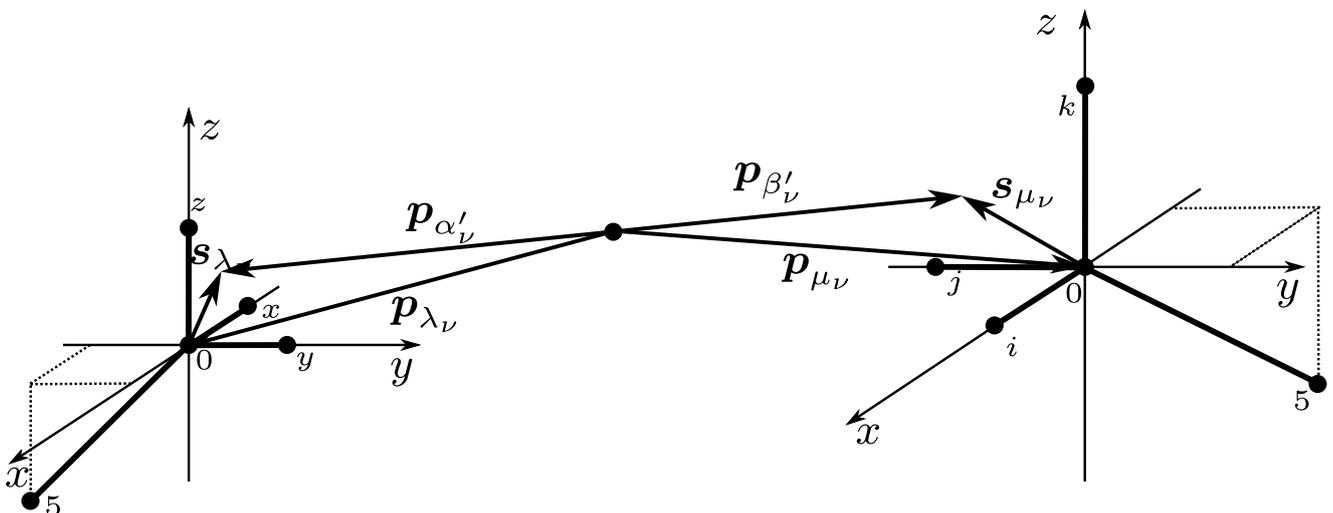


Рис. 1. Шаблон многоточечного проецирования.

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-

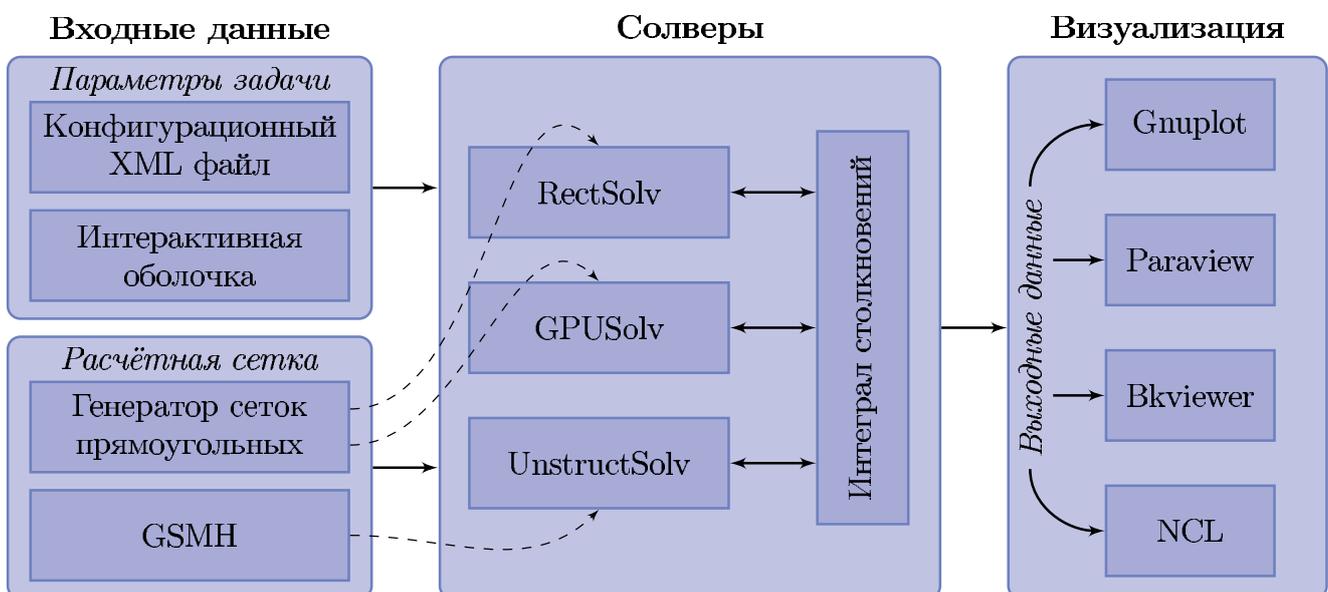


Рис. 2. Схема ПМС.

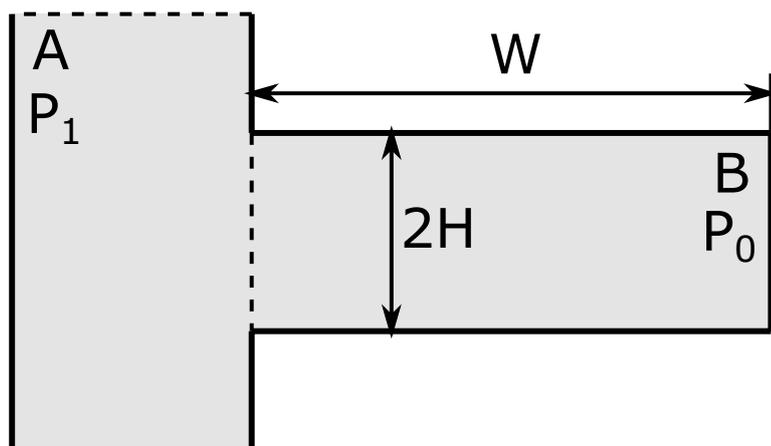


Рис. 3. Геометрия задачи.

ми пакетом GMSH (www.geuz.org/gmsh). Уравнение Больцмана решается методом расщепления: по очереди моделируются перенос и столкновения молекул. Поскольку результат соударений молекул не зависит от пространственной конфигурации, в частности от координатных сеток, то перечисленные солверы используют единый модуль, отвечающий за вычисление интеграла столкновений проекционным методом. Результаты компьютерного моделирования анализируются с помощью различных программных продуктов. Для наглядной визуализации потоков используется пакет NCL (NCAR Command Language, www.ncl.ucar.edu) с трехмерным распределением макропараметров удобно оперировать в среде Paraview (www.paraview.org), которая, кроме того, обладает возможностью обработки большого объема данных на кластерных системах. Для работы с прямоугольными сетками применяется система Vviewer [38], ориентированная на анализ выходных данных в случае моделирования систем с прямоугольной геометрией.

Моделирование и анализ прикладных физических систем и явлений

В настоящем разделе приведены краткие результаты моделирования и анализа процессов теплопереноса в разреженном газе в микросистемах. Подробное описание результатов содержится в публикациях [39–52].

Ударные волны в микроканалах

Моделируемая ударная труба показана на *рисунке 3* и состоит из двух секций: более широкой толкающей секции (секция А) и узкой измерительной секции (секция В). В начальный момент времени давление в толкающей секции в 10 раз больше, чем в измерительной, а температуры в обеих секциях равны.

На стенках сосудов задано условие полной аккомодации с диффузным отражением молекул, имеющих максвелловскую функцию распределения по скоростям. Распад начального разрыва давления создает ударную волну (УВ), которая движется внутри измерительной секции. Распространение УВ в канале квадратного сечения детально изучено для $Kn = 0.05$. Графики плотности, температуры, скорости и локального числа Маха вдоль центральной линии для двух моментов времени представлены на *рисунке 4*.

На рисунках, представленных ниже, все макропараметры приво-

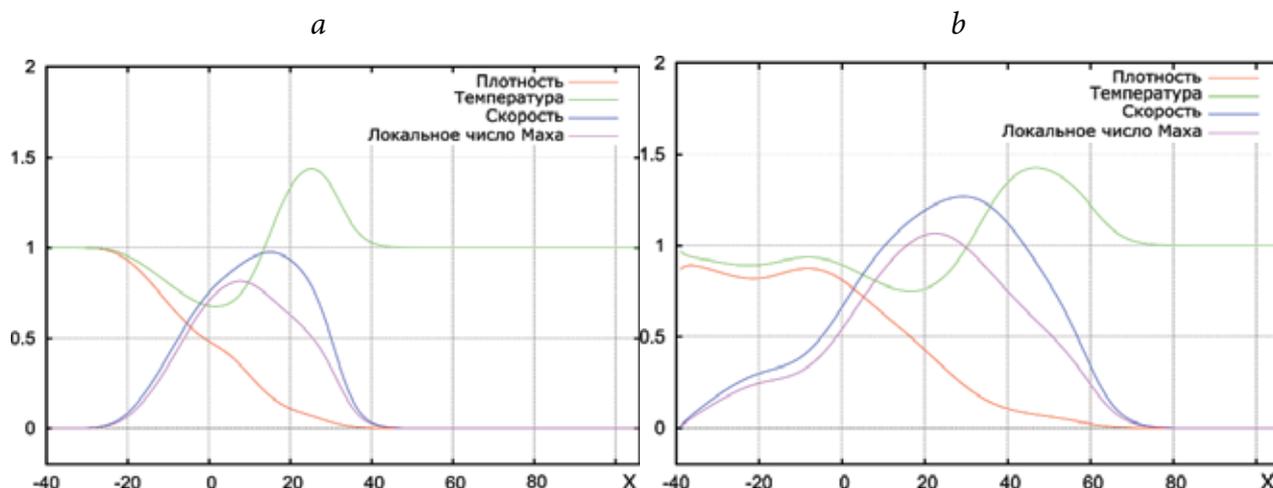


Рис. 4. Параметры газа на центральной линии для $Kn=0.05$: $t=30$ (а) и 60 (б).

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-

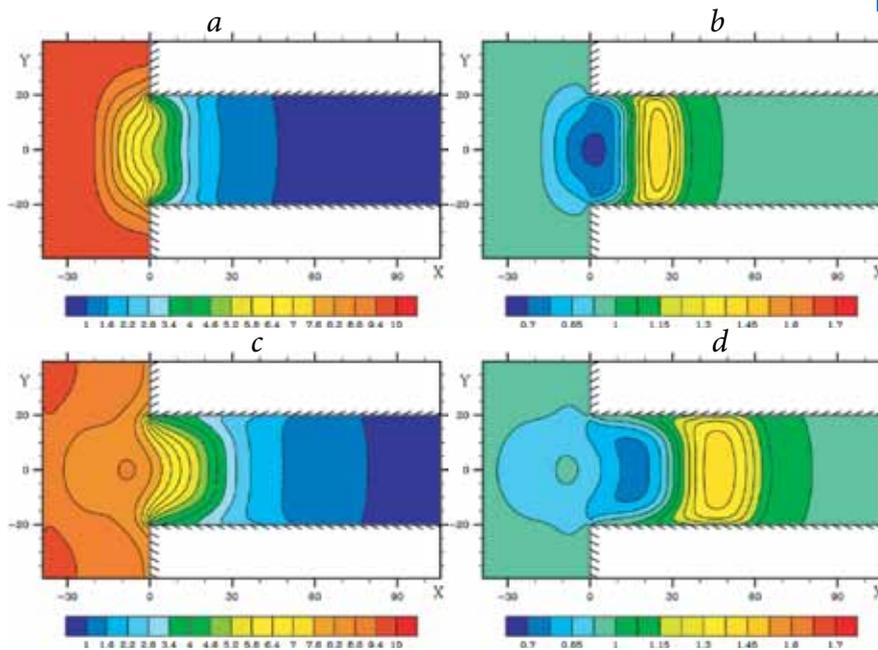


Рис. 5. Поля плотности и температуры для $Kn=0.05$: а – плотность, $t=30$; б – температура, $t=30$; в – плотность, $t=60$; д – температура, $t=60$.

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

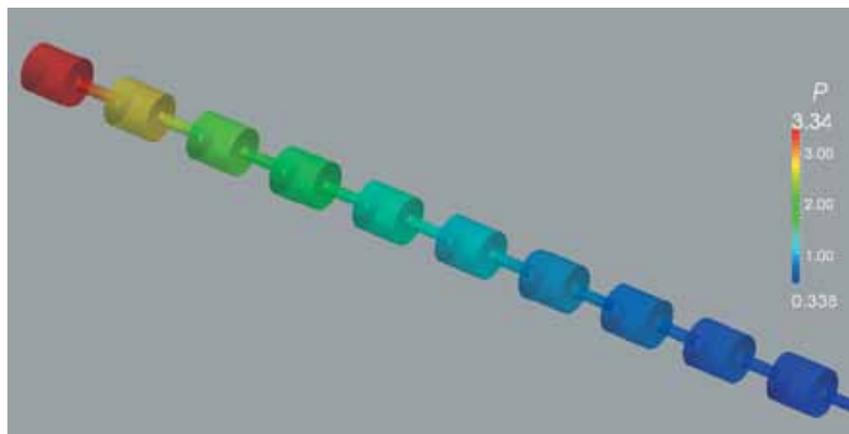


Рис. 6. Распределение давления в десятикаскадном насосе Кнудсена.

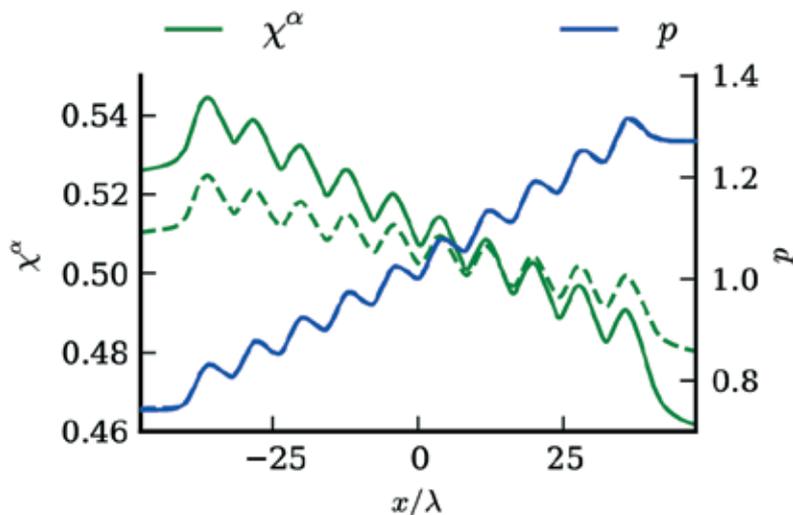


Рис. 7. Разделение смеси гелия–неона.

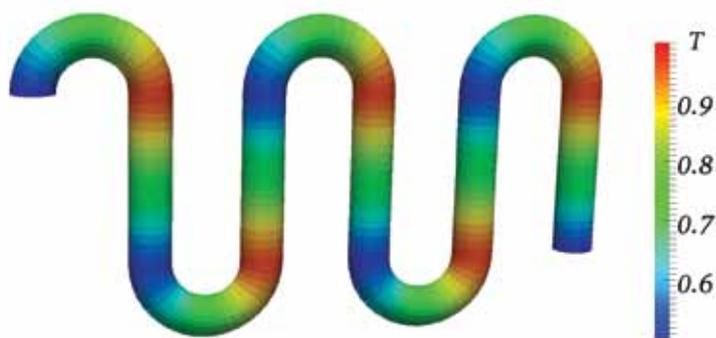


Рис. 8. Геометрия устройства и распределение температуры на стенках, благодаря которому создается откачивающий эффект.

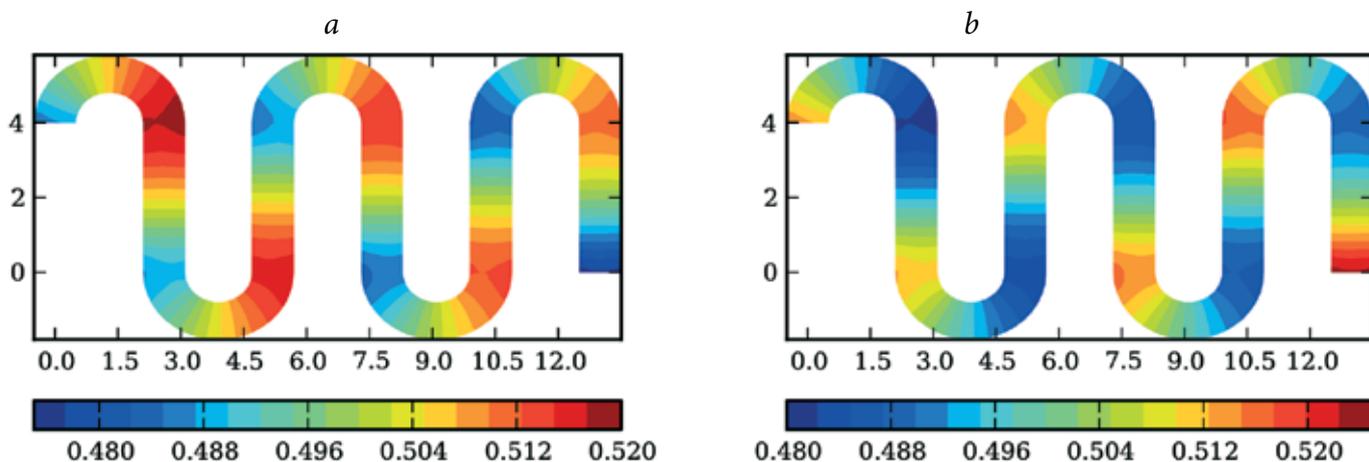


Рис. 9. Распределение доли легкого (а) и тяжелого (b) газов на оси.

на моделирование, в среднем равнялось 50 ч.

Моделирование смеси газов в классическом Кнудсеновском насосе

Рассчитывали разделение смеси газов с отношением молекулярных масс 1:10, что соответствует смеси гелия–неон, в 10-каскадном кнудсеновском насосе из предыдущего раздела. Расчет проводили для молекулярной модели твердых сфер и реалистичного потенциала Леннарда–Джонса с параметрами из работы [53]. Параметры взаимодействия между атомами гелия и неона определяли из комбинаторных соотношений [54].

На рисунке 7 показаны распределения давления p и доли неона χ^{Ne} на линии симметрии. Сплошная линия соответствует потенциалу твердых сфер, пунктирная – потенциалу Леннарда–Джонса. Наблюдается совпадение распределения давления в насосе для обоих потенциалов взаимодействия, но имеется отличие в отношении разделения смеси. Для реалистичного потенциала Леннарда–Джонса разделение смеси примерно в два раза меньше.

Течение смеси газов в «змейчатом» насосе Кнудсена

Работа данного устройства основана на изогнутости трубок, а не на различии их диаметров. В расчете на стенках поставлено диффузное граничное условие. Геометрия

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-

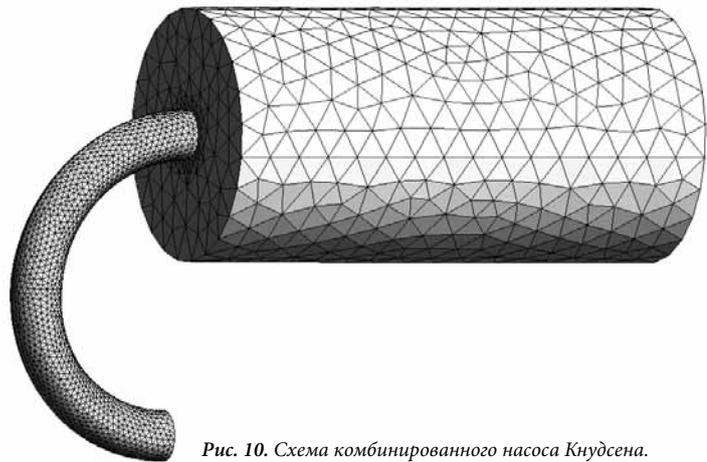


Рис. 10. Схема комбинированного насоса Кнудсена.

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-

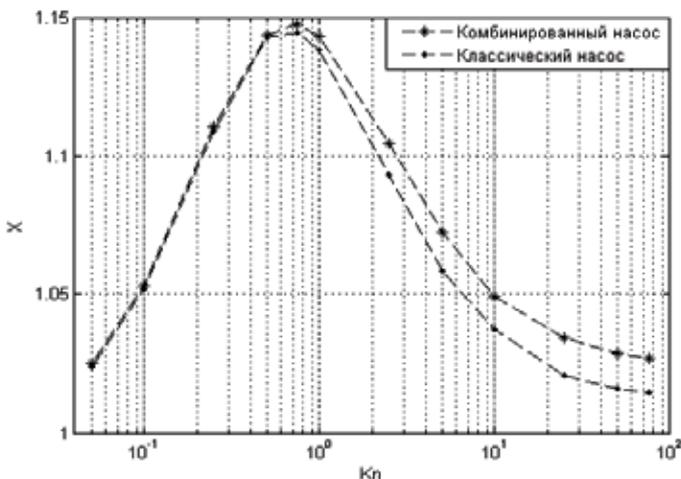


Рис. 11. Зависимость отношения давлений на концах комбинированного и классического насосов от числа Кнудсена.

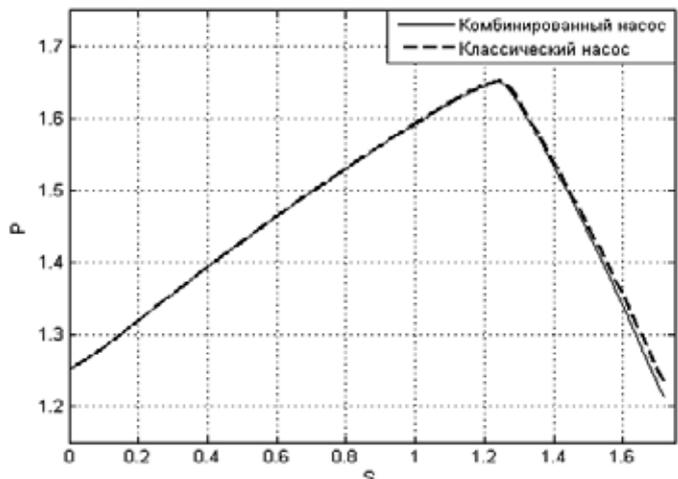


Рис. 12. Распределение давления в комбинированном и классическом насосах Кнудсена.

ет большей, чем они, эффективностью. Его можно сконструировать более компактным по сравнению с классическим насосом. Исследование комбинированного насоса показало, что узкие трубки можно изгибать для экономии места. Это одновременно ведет к увеличению уровня откачки. На такую модификацию насоса нами получен патент [54].

Заключение

Таким образом, основные достижения, связанные с проводимыми исследованиями, можно сформулировать следующим образом.

- Разработаны вычислительные методики и проблемно-моделирующая среда на основе метода расщепления по физическим процессам кинетического уравнения Больцмана, в которых реализован консервативный проекционный метод вычисления интеграла столкновений, для анализа и полномасштабного моделирования неравновесных газокинетических процессов тепломассопереноса в системах для чисел Кнудсена $0.01 < Kn < 10$.

- Предложен адаптирующийся к геометрии устройства метод численного решения уравнения адвекции на основе прямоугольных и неструктурированных тетраэдрических сеток, численных схем различного порядка точности, что позволило проводить моделирование и анализ широкого класса устройств произвольной геометрии.

- Разработан метод многоточечного проецирования на основе развития метода двухточечного проецирования для вычисления интеграла столкновений газовых смесей с произвольными молекулярными массами.

- Созданы эффективные параллельные алгоритмы с высокой степенью масштабируемости для программных солверов численного решения уравнения адвекции на кластерных вычислительных системах (технология MPI).

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

го назначения (GPU-GP, технология CUDA).

- Разработаны параллельные солверы с эффективным программным кодом для решения уравнения адвекции на прямоугольных и неструктурированных тетраэдрических сетках для вычислительных систем с кластерной архитектурой и графическими процессорами.

- Разработан программный солвер вычисления интеграла столкновений на основе консервативного проекционного метода для смеси газов с произвольным отношением молекулярных масс, который является ключевым и впервые реализован в проблемно-моделирующих средах.

- Разработана методика оптимизации алгоритмов вычисления интеграла столкновений, в которой применена степенная интерполяция вычисления выражения, применены технологии для потоковой обработки в режиме SIMD (SSE, SSE2) процессора Intel, использованы многомерные сетки Коробова с большим числом кубатурных узлов, что позволило создать эффективный программный код вычисления интеграла столкновений.

- На основе созданных проблемно-моделирующих сред разработана методика вычислительного эксперимента и впервые проведен анализ неравновесных газокинетических 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**
Vacuum, 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. **О. 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**
Vacuum, 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.

English ||||||||||||||||||

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@lokip.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/10.1116/1.1581765>.
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-khimicheskaja 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-chislovye 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-khimicheskaja 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 Protsessy [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 tehnika [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'uternykh 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. 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**
Vacuum, 2014, **109**, 360. DOI:10.1016/j.vacuum.2014.06.019
40. **F.G. Tcheremissine**
Fiziko-khimicheskaja 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 tehnika [Journal of Nano and Microsystem Technique], 2010, **8**, 6 (in Russian).
44. **Yu.Yu. Kloss, D.V. Martynov, F.G. Tcheremissine**
Informacionnye tehnologii [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. Hirshfelder, 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.

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, находящимся 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, находящимся 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-

ления смешанной группой ЛА входит в состав автоматизированного комплекса планирования применения ЛА, их средств поражения и подготовки для них полетных заданий. В результате обеспечивается принятие обоснованных решений по основным элементам плана выполнения задачи вылета.

В настоящее время наблюдается значительный интерес, прежде всего со стороны зарубежных специалистов, к проблеме алгоритмической поддержки процесса предполетного планирования групповых действий авиации. Например, в работах [2, 3] развивается подход, использующий аппарат математического программирования для решения задач планирования групповых действий беспилотных ЛА. Различные алгоритмы в рамках подобного подхода объединяет то, что задача целераспределения, то есть назначения для каждого ЛА в составе группы наиболее предпочтительного целевого объекта, в конечном итоге интерпретируется как задача математического программирования. В работах [4, 5] предлагается использование сети Петри для решения задач предполетного планирования маршрутов выхода ЛА смешанной группы на целевые объекты и последующей коррекции первоначального плана с учетом фактически сложившейся ситуации. В качестве модели, описывающей сценарий группового применения ЛА, в упомянутых работах используется ориентированный граф. Изложен метод построения маршрутов БЛА применительно к задаче обнаружения наземных объектов [6]. В основе метода лежит

использование математического ожидания информационной энтропии для оценки оптимальности альтернативных вариантов маршрута.

В последние годы появилось большое число работ, основу которых составляет использование триангуляции Делоне [7] для решения задачи предполетного планирования групповых действий ЛА. В этом случае маршрут формируется в виде набора промежуточных пунктов маршрута (ППМ), прохождение которых является обязательным. На характер маршрута движения ЛА между ППМ жестких ограничений не накладывается, что позволяет строить траектории, максимально учитывающие динамические возможности ЛА (рис. 1). Однако известные методы предполетного планирования, базирующиеся на триангуляции Делоне, требуют развития, так как не учитывают следующие важные особенности применения смешанных групп пилотируемых и беспилотных ЛА:

- наличие неопределенности в расположении источников потенциальной угрозы (постов противовоздушной обороны противника);
- наличие в составе смешанной группы ЛА как пилотируемых, так и беспилотных ЛА, что предполагает их ранжирование по степени важности, поскольку последствия потери пилотируемого или беспилотного ЛА существенно различны;
- неоднородность состава объектов, являющихся областью применения смешанной группы ЛА, которая в процессе планирования требует учета степени важности каждого из них.

С учетом этого разработан альтернативный метод предполетного планирования действий смешанной группы ЛА, развивающий известные подходы на основе триангуляции Делоне с учетом вышеперечисленных особенностей смешанных тактических групп ЛА.

Алгоритм, реализующий разработанный метод, обеспечивает выработку решений по выбору наиболее предпочтительного варианта

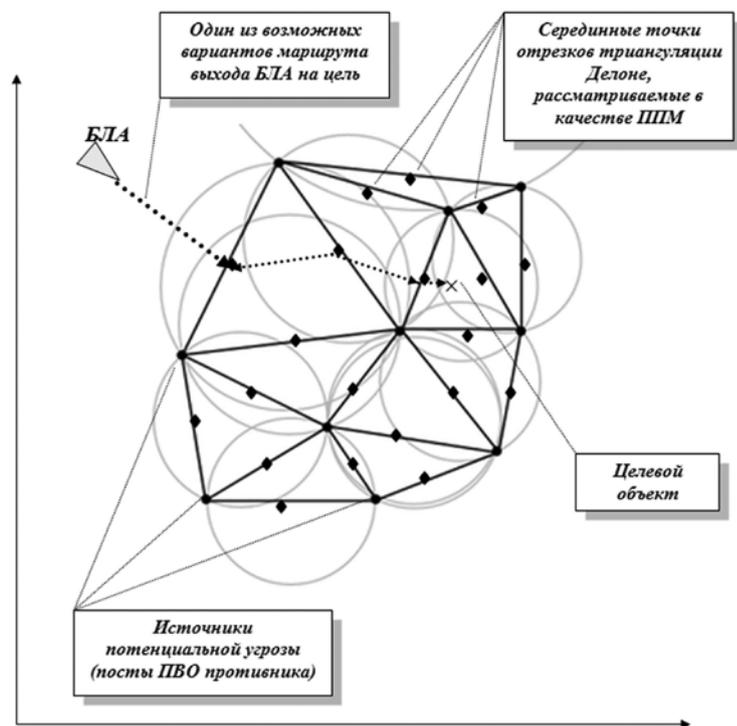


Рис. 1. Пример построения триангуляции Делоне в задаче планирования маршрутов движения БЛА.

применения смешанной группы ЛА в операции поражения (разведки) наземных целей, когда имеет место статистическая неопределенность относительно местоположения комплексов противовоздушной обороны (ПВО) в районе целевого применения. Статистическая интерпретация подобной неопределенности представляется наиболее адекватной реальным условиям применения смешанных групп ЛА, действия которых поддерживаются разведывательной информацией. На ее основе может быть сформирована модель, содержащая априорную статистику относительно координат местоположения комплексов ПВО.

В качестве исходных данных для работы алгоритма используется следующая информация:

- 1) состав смешанной группы ЛА, привлекаемой для решения задачи поражения (разведки) группы наземных объектов;
- 2) координаты, определяющие положение каждого ЛА в момент выхода в район целевого применения в инерциальной системе координат, начало которой совмещено с аэродромом вылета;
- 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

местоположения комплексов ПВО противника.

Результатом работы алгоритма являются:

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

2) матрица S , определяющая в рамках конкретного варианта целераспределения, задаваемого структурой матрицы R , схему маршрута выхода ЛА смешанной группы на назначенную цель. Элементы матрицы S задают для каждого ЛА порядок прохождения ППМ, причем нулевое значение указывает на то, что соответствующий ППМ не включается в маршрут.

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 покрывает 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

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	$X_{C_i}, \text{км}$	$Y_{C_i}, \text{км}$	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	$m_{xk}, \text{км}^2$	$m_{yk}, \text{км}^2$	$\sigma_{xk}^2, \text{км}^2$	$\sigma_{yk}^2, \text{км}^2$	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 критерияльной 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;

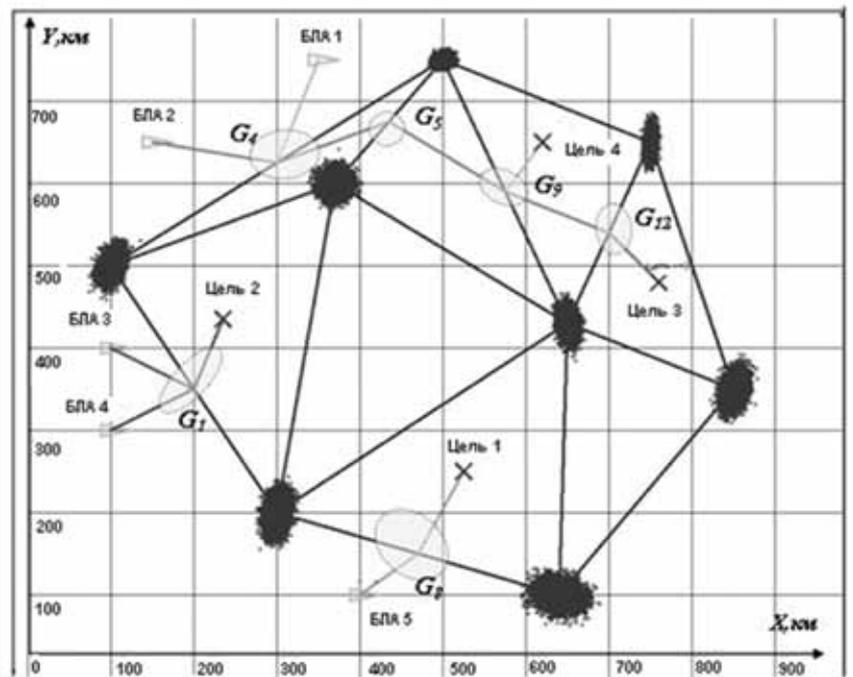


Рис. 2. Результаты решения задачи предполетного планирования действий смешанной группы ЛА по комплексу наземных объектов в условиях статистической неопределенности расположения источников угрозы.

$\tau_{\Psi_V}, \tau_{V_W}, \tau_{\Psi_L}, \tau_{V_L}$ – постоянные времени, характеризующие динамические свойства БЛА и ПЛА в каналах управления углом курса и скоростью.

Модель (1), описывающая динамику смешанной пары, состоящей из беспилотного и пилотируемого ЛА, позволяет сформировать систему управления в виде двух независимых каналов (рис. 4). Управляющим сигналом во втором канале является командное значение курсового угла беспилотного ЛА Ψ_{Wc} , за счет которого обеспечивается устранение рассогласования по интервалу ΔY и курсовому углу Ψ_L . В качестве возмущающего сигнала в этом контуре выступает командное значение курсового угла Ψ_{Lc} .

Первый канал управления имеет один основной управляющий сигнал – командное значение скорости БЛА V_{Wc} и командное значение курсового угла БЛА, синтезированное во втором канале. За счет этих сигналов обеспечивается устранение рассогласования по дистанции ΔX и скорости ΔV относительно требуемых значений.

Для компенсации ошибок в указанных выше каналах предлагается использовать традиционные ПИ-регуляторы. Использование ПИ-регулятора во втором канале приводит к реализации следующего закона управления:

$$\Psi_{Wc}(t) + k_1 e_2(t) + k_2 \int_0^t e_2(t) dt, \quad (2)$$

$$e_2(t) = k_y \Delta Y(t) + k_\psi \Delta \Psi(t), \quad (3)$$

где k_1, k_2 – коэффициенты ПИ-регулятора, с помощью которых осуществляется его настройка, k_y, k_ψ – весовые коэффициенты, за счет выбора которых устанавливается компромисс между рассогласованиями по интервалу и курсовому углу относительно требуемых значений.

Аналогичным образом представляется закон управления для первого канала:

$$V_{Wc}(t) = k_3 e_1(t) + k_4 \int_0^t e_1(t) dt, \quad (4)$$

$$e_1(t) = k_x \Delta X(t) + k_v \Delta V(t), \quad (5)$$

где k_3, k_4 – коэффициенты ПИ-регулятора, k_x, k_v – весовые коэффициенты, за счет выбора которых устанавливается компромисс между рассогласованиями по дистанции и скорости относительно требуемых значений.

Настройку ПИ-регуляторов производили путем выбора таких коэффициентов усиления пропорциональной и интегральной составляющих, при которых достигалось минимальное время переходных процессов в соответствующих каналах управления. Поиск оптимальных настроек ПИ-регулятора проведен путем имитационного моделирования, в процессе которого также исследовали влияние параметров, присутствующих в модели, на качество управления БЛА при движении в составе смешанной пары.

Начальные условия для уравнений (1–5) выбирали следующими: $\Delta X_0 = \Delta Y_0 = 0, V_W = V_L = 150$ м/с, $\Psi_W = \Psi_L = 0$ рад. В качестве постоянных времени в модели ПЛА приняты $\tau_{V_L} = 4.5$ с, $\tau_{\Psi_L} = 4$ с что соответству-

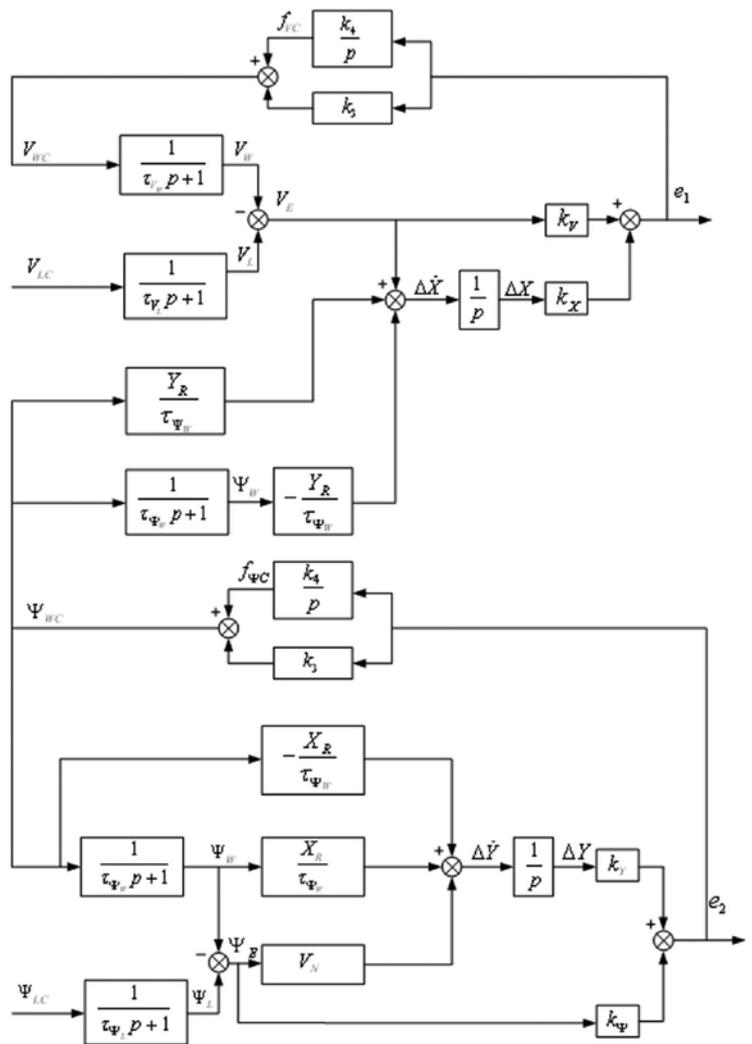


Рис. 4. Структурная схема системы управления БЛА.

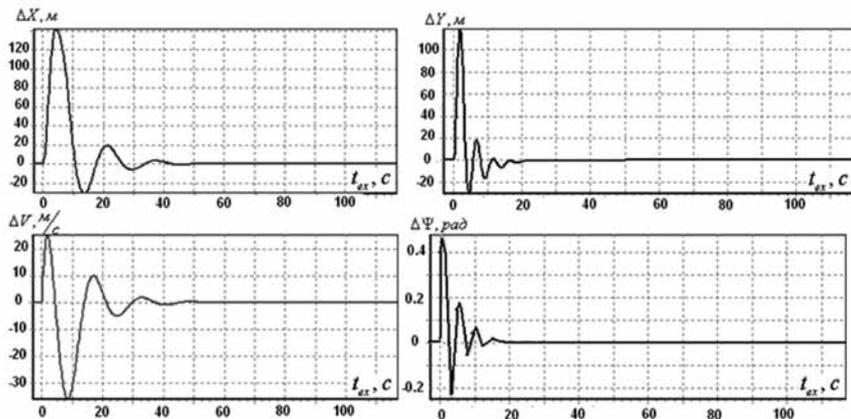


Рис. 5. Качество процессов регулирования в каналах управления углом курса и скоростью ведомого БЛА при однократном маневре ведущего ПЛА.

ет тактико-техническим характеристикам самолета Су-27. Постоянные времени в модели БЛА принимались $\tau_{V_w} = 2.5$ с, $\tau_{\Psi_w} = 2$ с.

Предполагалось, что изначально пара БЛА–ПЛА совершает полет строем с параметрами: интервал $Y_R = 27$ м, дистанция $X_R = 42$ м, значения курсовых углов $\Psi_w = \Psi_L = 0$ рад, скоростей $V_w = V_L = 150$ м/с. Начальные рассогласования по дистанции и интервалу отсутствуют: $\Delta X_0 = \Delta Y_0 = 0$. В процессе движения ведущий ПЛА совершает однократный маневр с изменением курсового угла и скорости. На рисунке 5 приведены зависимости, отражающие отработку системой управления ведомого БЛА рассогласований по параметрам строя (интервалу и дистанции), скорости и курсовому углу, возникших в результате маневра, предпринятого ведущим ПЛА. Видно, что система управления ведомого БЛА на основе ПИ-регуляторов обеспечивает возврат к заданной конфигурации строя в течение 26 с.

Заключение

В статье изложены теоретические положения и описаны алгоритмы, необходимые для решения прикладных задач анализа и синтеза управления смешанными группами пилотируемых и беспилотных ЛА с учетом новых условий применения, связанных с формированием единого информационно-управляющего поля.

На основе анализа целевых задач, составляющих область приоритетного использования смешанных групп пилотируемых и беспилотных ЛА, и вариантов информационного взаимодействия этих ЛА разработан облик (архитектура и алгоритмы) распределенной системы интеллектуального управления, включающей внебортовую и бортовую компоненты. Рассмотрены алгоритмы, составляющие программно-математическую основу этих компонент и примеры, иллюстрирующие их работу.

Таким образом, содержащиеся в статье результаты исследований, выполненных при финансовой поддержке РФФИ, представляют специалистам соответствующего профиля «инструмент» для решения актуальных задач управления смешанными группами ЛА и планирования их целевых действий в условиях единого информационно-управляющего поля.

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

где k – параметр, определяющий моду колебаний кольца.

Эффект Брайана можно использовать для построения датчика угловой скорости (1) и углового перемещения (2). Поскольку положение узлов и пучностей стоячей волны относительно кольца зависит от его углового перемещения, то, измеряя их эволюцию $\varphi(t)$, можно определить угловую скорость $\Omega(t)$. Для определения произвольного углового движения объекта относительно инерциального пространства необходимо иметь три таких датчика, ориентированных по трем взаимно перпендикулярным осям.

В конструкциях ВТГ, как правило, используют тонкостенные полусферические или цилиндрические резонаторы, колебания кромки таких резонаторов идентичны колебаниям тонкого кольца и подчиняются тем же закономерностям.

В ВТГ отсутствует вращающийся ротор, что дает такому гироскопу ряд преимуществ:

- большой ресурс работы;
- высокая точность и малая случайная погрешность;
- устойчивость к тяжелым условиям эксплуатации (перегрузки, вибрация, гамма-излучение);
- сравнительно небольшие габаритные размеры, масса и потребляемая мощность;
- сохранение инерциальной информации при кратковременном отключении электропитания.

С точки зрения практического применения и используемых технологий можно выделить три основные группы ВТГ.

1. Волновые твердотельные гироскопы высокой точности. В таких приборах применяют высокочастотные (с добротностью Q свыше $1 \cdot 10^7$) кварцевые резонаторы, бесконтактные датчики и актюаторы, а также сложные электронные системы управления. Область применения высокоточных ВТГ на сегодняшний день, в силу различных причин,

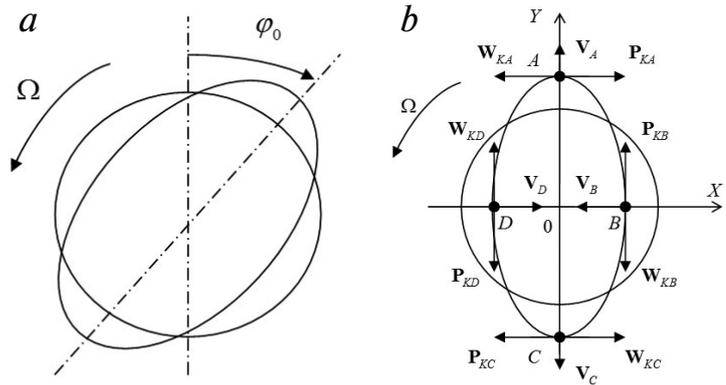


Рис. 1. Эффект Брайана в ВТГ: а – ориентация стоячей волны по второй форме колебаний; б – механизм возникновения прецессии.

ограничивается космической техникой, требующей наряду с высокой точностью длительного рабочего ресурса.

2. Микромеханические приборы низкой точности массового применения (переносные компьютеры, игрушки, промышленное оборудование и т.п.). Комплексирование микромеханических ВТГ со спутниковыми системами позволяет создавать малогабаритные недорогие навигационные системы широкого применения. Этот сегмент рынка развивается очень быстро, однако производство таких приборов требует весьма высокого уровня развития микроэлектронной промышленности.

3. Промежуточную группу составляют датчики общего применения средней и низкой точности с металлическими резонаторами. Хотя по габаритам эти приборы превышают микромеханические, технология их производства гораздо проще. Металлические резонаторы с добротностью $(3-5) \cdot 10^4$ могут быть изготовлены на универсальном металлорежущем оборудовании; такие приборы имеют простую конструкцию, не требуют создания в их корпусе высокого вакуума, а в блоках управления можно использовать широко распространенные радиоэлементы. В результате приборы этой группы, обладая незначительным энергопотреблением и длительным рабочим ресурсом, имеют и невысокую себестоимость. С другой стороны, сравнительно большие размеры резонатора позволяют проводить их точную настройку, а следовательно, резко повысить точность гироскопов. В связи с этим ВТГ общего применения с металлическим резонатором является наиболее перспективным прибором, который должен прийти на смену используемым сегодня электромеханическим гироскопам роторного типа и производство которого может быть быстро освоено отечественной промышленностью.

Удачным примером такого устройства является ВТГ фирмы InnaLabs, который использован в ка-

честве прототипа в ряде разработок [5]. Основной деталью такого датчика является металлический цилиндрический резонатор, на донную поверхность которого наклеены пьезоэлементы, используемые для возбуждения и измерения колебаний. Резонатор помещен в корпус, внутри которого поддерживается вакуум (≈ 0.01 мм рт. ст.). Устройство управления выполнено на основе микроконтроллера в виде внешнего блока. Прибор имеет небольшие габариты, вес, энергопотребление и обеспечивает измерение угловой скорости с погрешностью 10–20 град/ч. Себестоимость такого прибора по оценке авторов составляет порядка 1000 USD, что делает его конкурентоспособным в данном сегменте рынка.

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.

Конечно-элементное моделирование физических процессов в резонаторе ВТГ

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,

что накладывает ограничения на его виброустойчивость. Изменяя размеры элементов резонатора (толщина стенки, диаметр рабочей части и т.д.), добиваются отсутствия собственных частот в диапазоне частот внешних механических воздействий. Другая задача состоит в минимизации термоупругого внутреннего трения, которое существенно снижает добротность металлических тонкостенных резонаторов. Конечно-элементное моделирование можно проводить с помощью различных программных средств. В данной работе использована среда программирования COMSOL Multiphysics [13], предназначенная для моделирования и численного решения методом конечных элементов (МКЭ) научных и инженерных задач, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных. Для оценки адекватности расчетов в среде COMSOL расчетные значения сравнивали с экспериментальными данными, полученными для цилиндрического резонатора, изготовленного из сплава. Конечно-элементная сетка задавалась с учетом конструктивных особенностей резонатора (рис. 2a).

Вид колебаний по второй (основной) форме показан на рисунке 2 b, c. 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

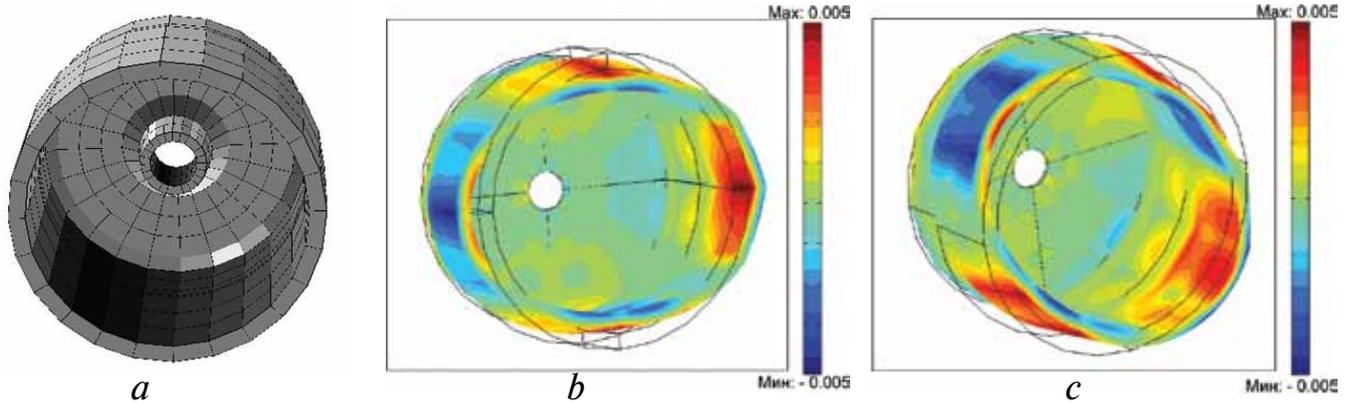


Рис. 2. Конечно-элементная аппроксимация геометрии резонатора (а); вторая форма колебаний резонатора и распределение температурного поля, вызванного термоупругими потерями в материале (b, c).

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:

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

Здесь ρ – объемная плотность; \mathbf{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).

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

Будем искать решение для ΔT и \mathbf{U} в виде

$$\begin{aligned} \Delta T &= T - T_0 = e^{\lambda t} \Theta, \\ \mathbf{u} &= e^{\lambda t} \mathbf{U}, \\ \mathbf{v} &= \dot{\mathbf{u}} = e^{\lambda t} \mathbf{V}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\lambda = i\omega + \delta$.

Следует отметить, что Θ , \mathbf{U} , \mathbf{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 \mathbf{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 материала существенно нарушается,

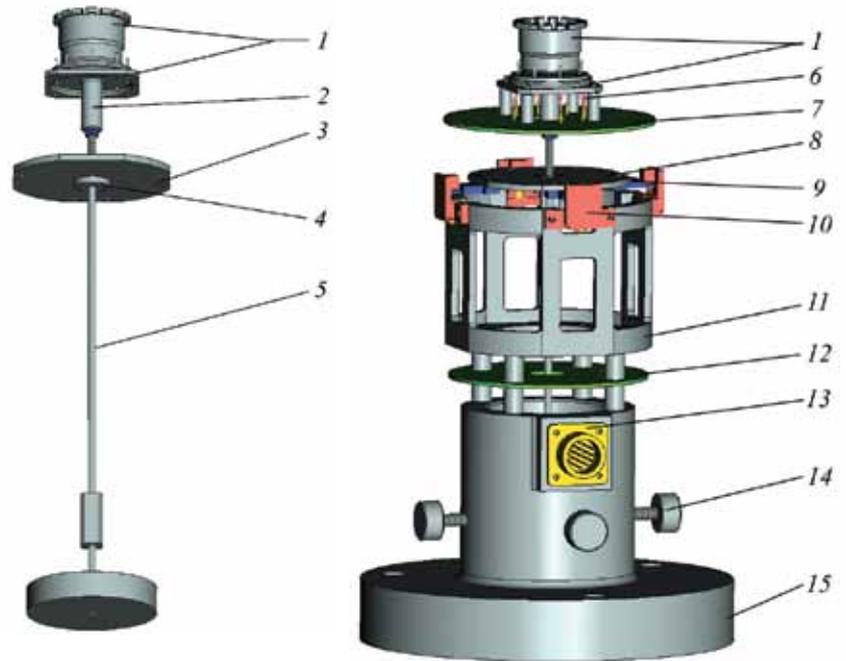


Рис. 3. Стенд для измерения массового дисбаланса резонатора: 1 – узел резонатора; 2 – установочный переходник; 3 – блок вибродатчиков; 4 – ограничитель; 5 – стержень; 6 – гибкий проводник; 7 – блок предварительных усилителей; 8 – плата усилителей вибродатчиков; 9 – плата вибродатчиков; 10 – узел вибродатчиков; 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

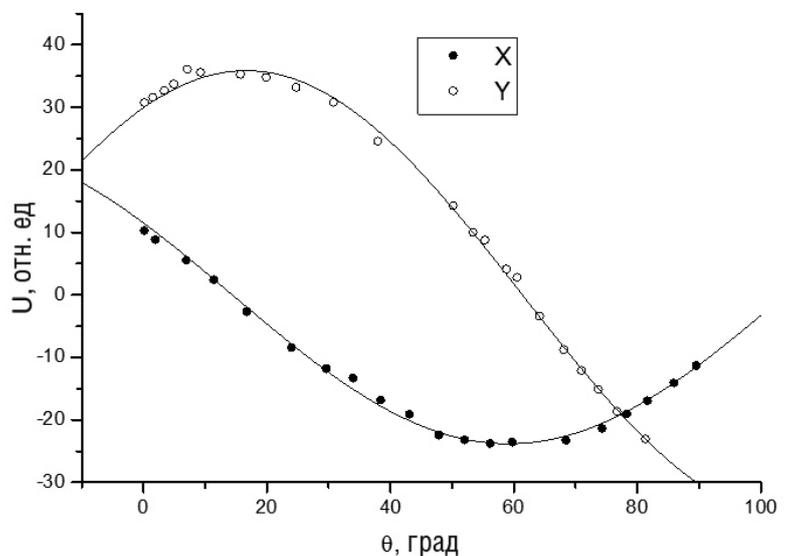


Рис. 4. Зависимость амплитуды вибрации стержня от ориентации стоячей волны в резонаторе.

гораздо меньшей скоростью, чем с поверхности зубцов. Кроме того, удаление материала оболочки приводит не только к изменению распределения массы по окружному углу, но и к изменению жесткости. Положительной стороной этого подхода является упрощение конструкции резонатора и технологии его изготовления благодаря отсутствию зубцов.

Учитывая, что нарезка зубцов на кромке металлического резонатора достаточно проста, металлические резонаторы ВТГ целесообразно изготавливать в зубчатом варианте – это позволяет существенно уменьшить трудоемкость балансировки. В данной работе был использован именно такой подход: на кромке резонатора нарезалось 16 балансировочных зубцов (рис. 5), с которых и проводилось удаление неуравновешенной массы.

Алгоритм балансировки (то есть порядок и количество вещества, удаляемого с каждого зубца) также может быть различным.

Хорошо известен алгоритм балансировки резонатора путем удаления точечных масс [16]. Распределение массы оболочки резонатора вдоль окружного угла φ при удалении с нее точечной массы Δm , расположенной в направлении $\varphi=0$, может быть описано разложением в ряд Фурье дельта-функции:

$$M(\varphi) = M_0 - 2\Delta m \sum_{i=1}^{\infty} \cos i\varphi . \tag{14}$$

Из выражения (14) понятны проблемы балансировки резонатора этим методом. Пусть, например, необходимо устранить первую форму массового дефекта величиной M_1 , ее ориентацию относительно резонатора для простоты примем равной нулю. Удаление с кромки резонатора точечной массы $\Delta m = M_1/2$ (в направлении $\varphi=0$) устраняет ее, но одновременно создает такие же по величине



Рис. 5. Зубчатый металлический резонатор ВТГ общего применения.

вторую, третью и четвертую формы массового дефекта, которые необходимо устранять, причем их последующая балансировка также будет сопровождаться появлением кратных гармоник. Так, балансировка второй формы массового дефекта двумя точечными массами будет сопровождаться появлением четвертой формы, балансировка третьей – появлением шестой и т.д. То есть в этом случае устранение любой формы массового дефекта требует удаления строго определенного количества материала в нескольких точках. Например, устранение массового дефекта первой формы вида $M_1 \cos \varphi$ требует удаления масс в десяти точках [16]. Очевидно, что процесс балансировки резонатора методом удаления точечных масс оказывается сложным. Основная проблема состоит в удалении строго определенной массы с каждого зубца, что представляет сложность с технической точки зрения.

Гораздо более простой алгоритм балансировки зубчатого резонатора описан в работе [19]. В этом варианте с каждого k -го балансировочного зубца удаляется следующая масса $M_{y\partial,k}$:

$$M_{y\partial,k} = M_i \cdot [1 + \cos i(\alpha_k - \varphi_i)], \tag{15}$$

где α_k – угловое положение k -го зубца; M_i и φ_i – параметры удаляемой формы дефекта.

Этот алгоритм может быть использован при любом числе балансировочных зубцов на кромке резонатора и не создает более высоких форм массового дефекта, а потому может быть успешно использован как при одновременном удалении всех форм массового дефекта, так и при их поочередном удалении. Кроме того, удаляемая масса распределяется по зубцам более равномерно, в результате чего общая удаляемая масса гораздо меньше, чем при использовании алгоритма, описанного в работе [16]. На рисунке 6 приведены диаграммы, иллюстрирующие удаление одинакового массового дефекта первой формы с 24-зубцового

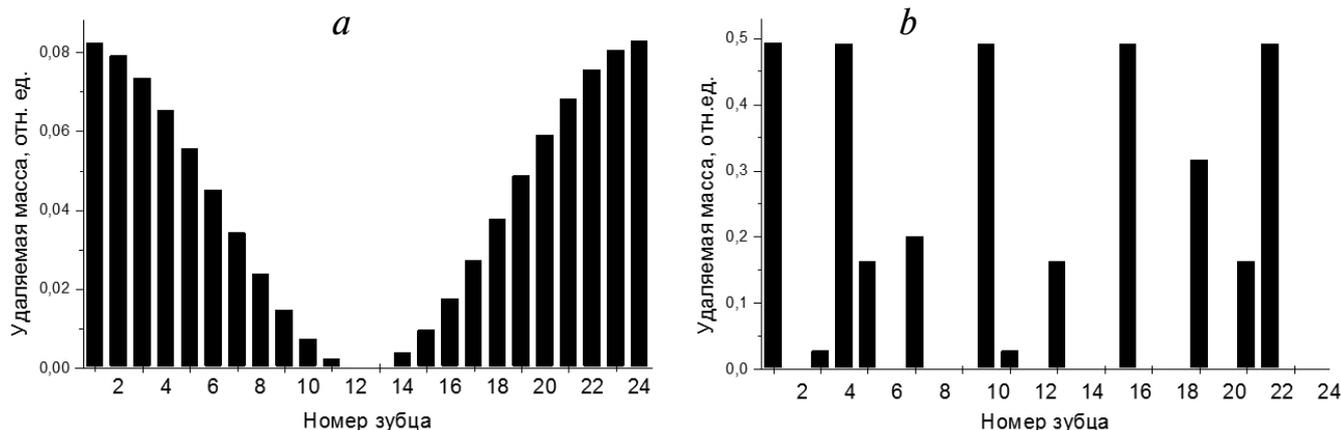


Рис. 6. Распределение удаляемой массы по зубцам при устранении одинаковой первой формы массового дефекта ($\varphi_1=10^\circ$) алгоритмом, приведенным в работах [16] (a) и [19] (b).

резонатора обоими алгоритмами. Сравнение результатов показывает, что при использовании алгоритма, приведенного в работе [19], максимальное значение удаляемой массы примерно в 6 раз меньше, чем это необходимо при использовании алгоритма, указанного в работе [16]. Это позволяет сократить время балансировочного процесса в разы, благодаря чему предложенная процедура балансировки оказывается гораздо более удобной для практической реализации.

Способы удаления вещества с поверхности резонатора также различны, для этой цели используют механические методы, лазерное испарение, ионно-плазменное травление. Учитывая, что данная работа нацелена на разработку датчиков общего применения, то есть сравнительно недорогих и выпускаемых в значительных объемах

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. 7a). 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. 7b). 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-

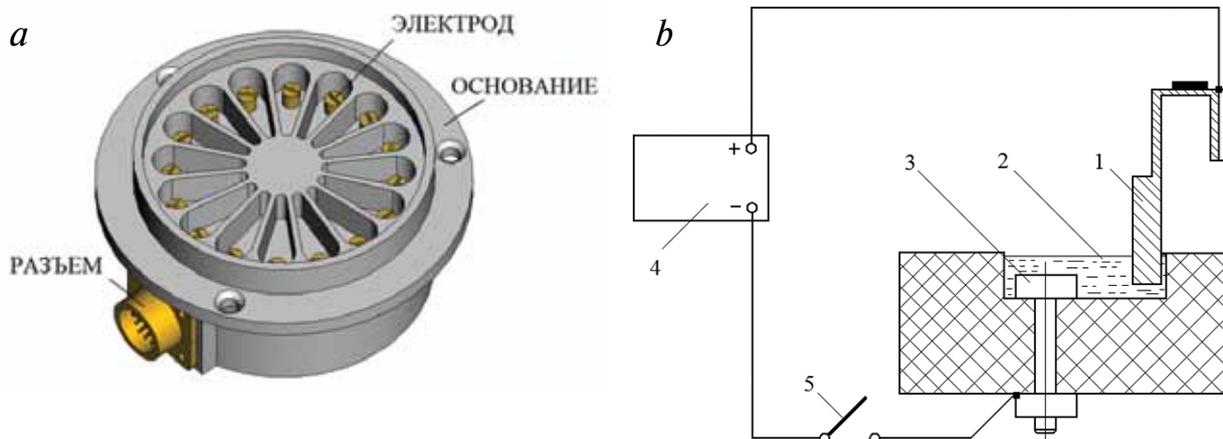


Рис. 7. Секционированная электрохимическая ванна (a) и схема электрохимического растворения металла с поверхности зубца (b): 1 – резонатор; 2 – электролит; 3 – электрод; 4 – источник тока; 5 – выключатель.

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

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

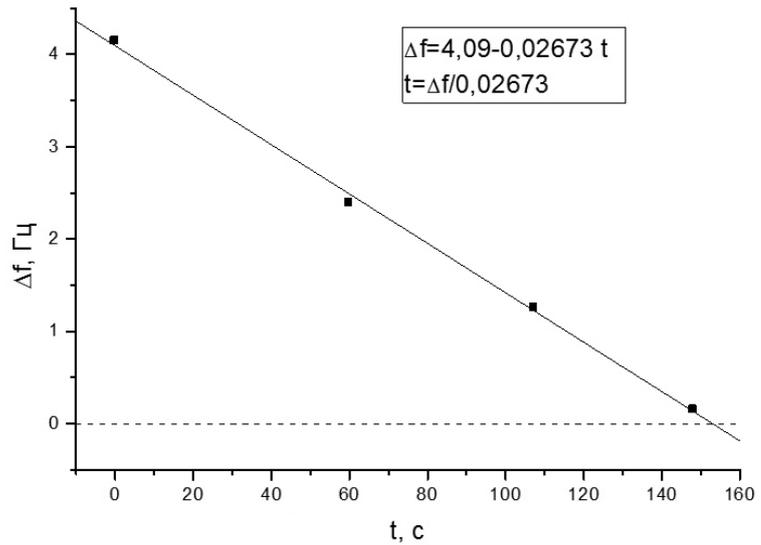


Рис. 8. Зависимость расщепления собственной частоты от среднего времени травления.

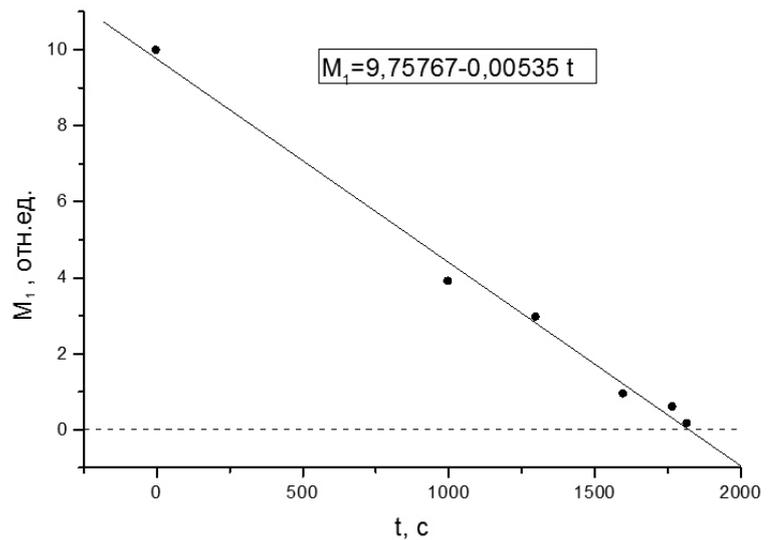


Рис. 9. Зависимость величины первой формы массового дефекта от среднего времени травления.

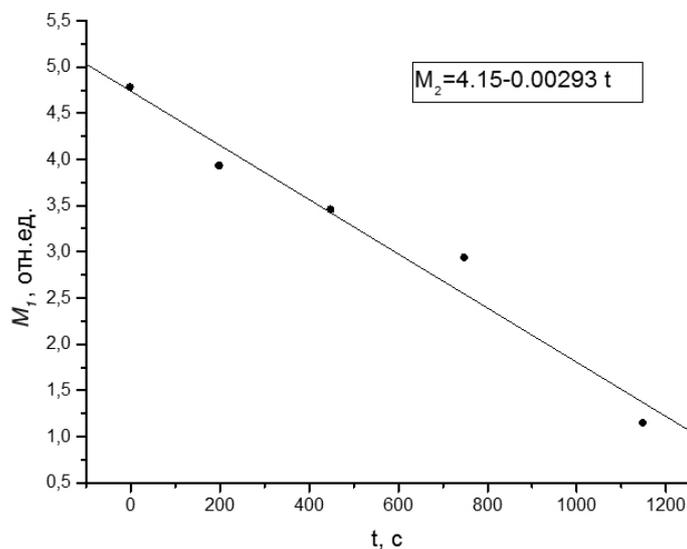


Рис. 10. Зависимость величины второй формы массового дефекта от среднего времени травления.

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-

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.

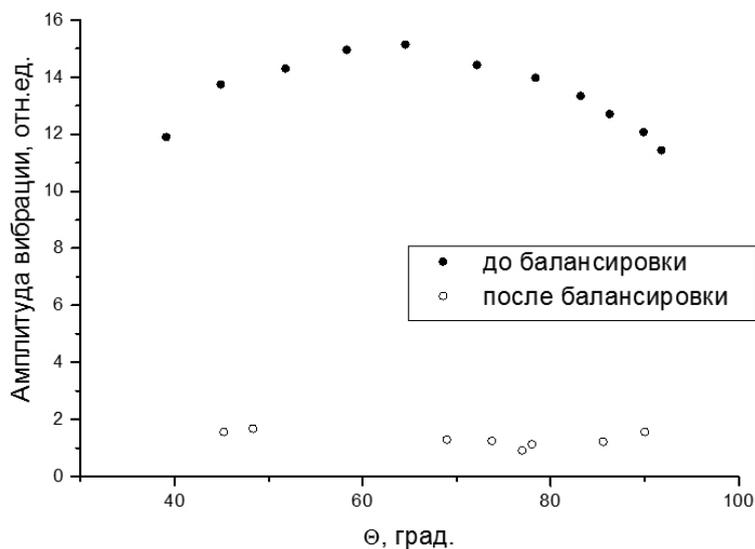


Рис. 11. Зависимость полной амплитуды вибрации от ориентации стоячей волны.

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. **Н.Е. Егармин, В.Е. Юрин**
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. Loree, 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.

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 наукоемких 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

Нанотехнологическая информатика как основа дальнейшего эффективного развития нанотехнологий

Дальнейшее эффективное развитие нанотехнологий зависит от возможностей эффективного накопления, обработки и обмена информацией, полученной в области нанотехнологий [6, 7]. Нанотехнологическая информатика позволяет использовать потенциал, накопленный в современных информационных технологиях, для проведения научных исследований, организации эффективного производства наносистем, а также обеспечения безопасности нанотехнологий для окружающей среды и потребителя. Нанотехнологическая информатика позволяет повысить эффективность работы во всех областях нанотехнологий за счет использования возможностей современных информационных технологий.

Одной из важнейших задач, относящихся к области нанотехнологической информатики, является разработка информационных систем, позволяющих проводить извлечение информации, проверку на корректность включения в указанную информационную систему, хранение, доступ различных пользователей к этой информации, а также ее анализ с целью практического использования. К области нанотехнологической информатики следует также отнести системы, в том числе интеллектуальные, для разработки и описания параметров наноматериалов, системы проектирования наносистем, разработку усовершенствованных процессов производства наноприборов и наносистем, позволяющих обеспечить охрану окружающей среды и здоровья потребителей. Эффективные исследования в области нанотехнологий на текущем этапе невозможны без применения инструментов анализа данных (datamining) [8] и машинного обучения (machinelearning) [9, 10]. Семантический поиск [11] и онтологии [12] являются одними из мощных

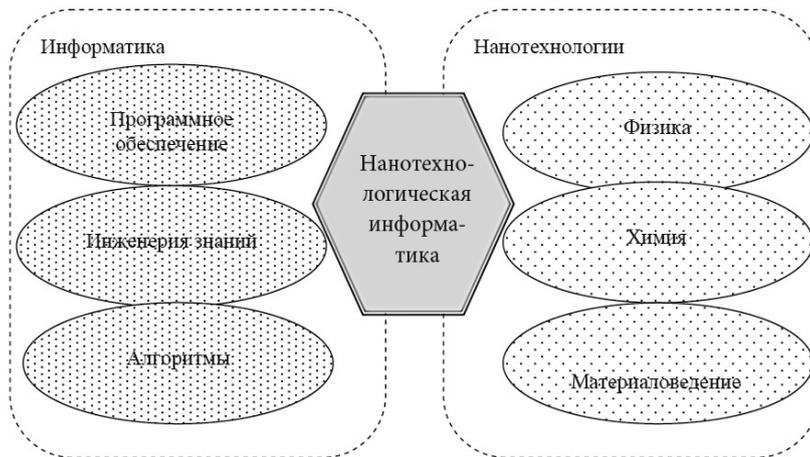


Рис. 1. Связь нанотехнологической информатики с нанотехнологиями и информатикой.

инструментов для поиска и многократного использования данных.

Вычислительные системы в наноинженерии [13–16] являются одной из составных частей нанотехнологической информатики, ориентированных на решение задач моделирования и проектирования наноматериалов, наноприборов и наносистем и технологических процессов их производства.

В работах [17, 18] рассмотрены особенности моделирования наносистем с учетом когнитивных технологий. Визуализация и анализ полученных экспериментальных данных и результатов моделирования в области нанотехнологий позволяет выделить перспективные области для дальнейших исследований. Использование систем моделирования позволяет дополнить экспериментальные данные и скорректировать области дальнейших исследований. Переход к упорядоченным данным позволяет использовать механизмы анализа данных с целью нахождения новых законов и определения областей, требующих дальнейшего исследования.

Представление знаний в информационных системах с учетом свойств наноразмерных объектов и материалов

Экспоненциальный рост объема информации, полученной в области нанотехнологий, требует новых подходов к представлению накопленных знаний.

Визуальные методы представления знаний в информационных системах являются мощными инструментами в условиях все возрастающего потока информации [7, 19]. При решении задачи представления знаний в информационных системах в наноинженерии одна из наиболее сложных проблем – формализация представления знаний в информационных системах с учетом фундаментальных свойств нано-

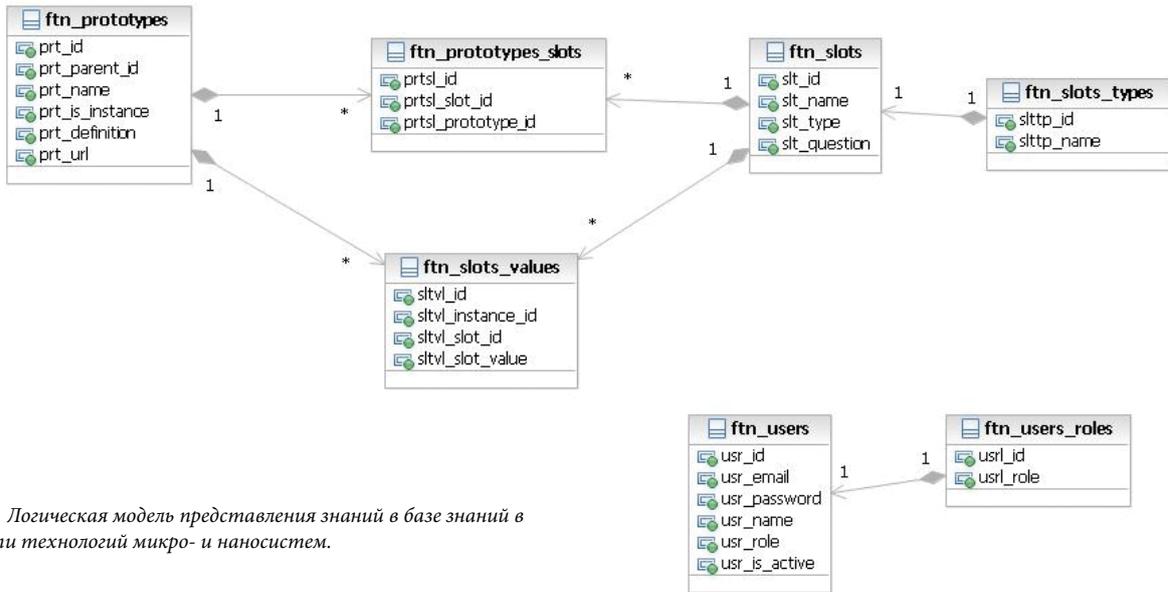


Рис. 3. Логическая модель представления знаний в базе знаний в области технологий микро- и наносистем.

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 nanoинженерии.

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	sltv_id	PRIMARY_KEY
	sltv_instance_id	Уникальный номер прототипа-экземпляра
	sltv_slot_id	Уникальный номер слота
	sltv_slot_value	Значение слота
ftn_users	usr_id	PRIMARY_KEY
	usr_email	Е-mail пользователя
	usr_password	Пароль пользователя
	usr_name	Имя пользователя
	usr_role	Роль пользователя
	usr_is_active	Статус пользователя
ftn_users_roles	usr_id	PRIMARY_KEY
	usr_name	Имя роли

Заключение

Каждая из перечисленных выше проблем в области фундаментальных нанотехнологий и информатики включает в себя необходимость проведения работ достаточно большого объема. В частности, необходима систематизация данных по наноматериалам и определение областей неполной или отсутствующей информации. Также необходима разработка стандартов для документирования накопленных данных для дальнейшего эффективного развития нанотехнологий в России. Кроме того, перспективными представляются исследования в области метаонтологии применительно к области нанотехнологий.

Нанотехнологическая информатика позволяет повысить эффективность взаимодействия исследовательских центров и промышленности. В частности, поставки наноматериалов могут дополняться базами знаний, содержащими информацию об их структуре и характеристиках. Использование систем моделирования позволит предсказать особенности процесса производства и учесть эти особенности при проектировании и разработке технологических процессов.

Использование онтологического уровня представления знаний при разработке базы знаний в области нанотехнологий [21, 22] позволило реализовать информационные системы, отличающиеся достаточно большой гибкостью по сравнению с системами, базирующимися на теории формальных систем, и с ин-

формационными системами-словарями [22]. При этом реализованные информационные системы обладают достаточной физически корректной внутренней структурой для структуризации и формализации исследуемой предметной области нанотехнологий.

Выделение понятий (концептов) онтологии и связей между ними позволило структурировать знания в предметной области нанотехнологий. Применение концептуальных карт позволило перейти от хаотического массива информации в области нанотехнологий к упорядоченному представлению знаний и визуализации связей между понятиями.

Дальнейшим развитием исследований в этой области является переход к фундаментальным исследованиям в сфере инфокоммуникационных технологий в нанотехнологии. Предложенный в работе [23] многомасштабный подход к построению инфокоммуникационных систем в нанотехнологии позволяет обеспечить представление, обработку и передачу информации применительно к решению задач нанотехнологии.

Литература

1. E. Drexler
J. Comput. Theor. Nanosci., 2006, 3(1), 1. DOI: <http://dx.doi.org/10.1166/jctn.2006.001>.
2. Г. Фоллмер
Эволюционная теория познания. – М., 1998, 252 с.
3. Р. Фейнман
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. В.А. Шахнов, Л.А. Зинченко
Информационные технологии и вычислительные системы, 2012, № 3, 55.
8. J. Han, M. Kamber
Data Mining: Concepts and Techniques. – Morgan Kaufmann Publishers, 2000, pp. 550.
9. С. М. Bishop
Pattern Recognition and Machine Learning. – Springer, 2006, pp. 740.
10. Бионические информационные системы, под ред. Л.А. Зинченко, В.М. Курейчика, В.Г. Редько. – М.: Физматлит, 2011, 286 с.
11. М.С. Dacosta, К.Т. 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. Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский
Базы знаний интеллектуальных систем. – С-Пб.: Питер, 2000, 384 с.
13. В.А. Шахнов Л.А. Зинченко
Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010, С, 100.
14. Л.А. Зинченко, В.А. Шахнов
Информационные технологии и вычислительные системы, 2009, № 4, 84.
15. V.A. Shakhnov, L.A. Zinchenko, I.A. Kosolapov
Proc. "IEEE ASDAM'14", 2014. DOI: 10.1109/ASDAM.2014.6998679.
16. В.А. Шахнов, Л.А. Зинченко
Нанотехнологии, 2014, № 2, 29.
17. V.A. Shakhnov, L.A. Zinchenko, E.V. Rezchikova
Int. J. Math. Comput. Simul., 2014, 8, 141.
18. V.A. Shakhnov, L.A. Zinchenko, E.V. Rezchikova
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. А.Е. Аверьянихин, В.А. Шахнов, Л.А. Зинченко
Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского, 2014, С52, 8.
22. В.А. Шахнов, А.Е. Аверьянихин, А.И. Власов, Л.В. Журавлева, Л.А. Зинченко
Информационные технологии и вычислительные системы, 2014, № 3, 89.
23. V.A. Shakhnov, L.A. Zinchenko, E.V. Rezchikova, I. Kosolapov
Proc. "5th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications, CogInfoCom 2014", 2014. DOI: 10.1109/CogInfoCom. 2014. 7020496.

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

Elena V. Rezhikova –
Bauman Moscow State Technical University
5, 2-nd Baumanskaya str.,
Moscow, 105005, Russia
e-mail: rezc-elena@yandex.ru

Andrei I. Vlasov –
Bauman Moscow State Technical University
5, 2-nd Baumanskaya str.,
Moscow, 105005, Russia
e-mail: vlasov@iu4.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

- E. Drexler**
J. Comput. Theor. Nanosci., 2006, **3**(1), 1. DOI: <http://dx.doi.org/10.1166/jctn.2006.001>.
- H. Vollmer**
Evolutionäre Erkenntnistheorie, S. Hirzel, 1975.
- R. Feynman**
Int. J. Theor. Phys., 1982, **21**, 467. DOI: 10.1007/BF02650179.
- D. Deutsch**
Proc. R. Soc. London A, 1985, **400**, 97. DOI: 10.1098/rspa.1985.0070
- Report to the President and Congress on the Third Assessment of the National Nanotechnology Initiative*, 2010.
- Nanoinformatics 2020 Roadmap*, 2011.
- V.A. Shakhnov, L.A. Zinchenko**
Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy [Information Technology and Computing Systems], 2012, N 3, 55 (in Russian).
- J. Han, M. Kamber**
Data Mining: Concepts and Techniques. – Morgan Kaufmann Publishers, 2000, 550 pp.
- C. M. Bishop**
Pattern Recognition and Machine Learning. – Springer, 2006, 740 pp.
- 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).
- 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.
- T.A. Gavrilova, V.F. Khorashevsky**
Bazy znaniy intellektualnikh sistem [Knowledge databases of intelligent systems], S-Pb, Piter, 2000, pp. 384 (in Russian).
- A. Shakhnov, L.A. Zinchenko**
Vestnik MGTU im. N.E. Baumana [BMSTU Herald], 2010, No. 5, 100 (in Russian).
- V.A. Shakhnov, L.A. Zinchenko**
Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy [Information Technology and Computing Systems], 2009, N 4, 84 (in Russian).
- V.A. Shakhnov, L.A. Zinchenko, I.A. Kosolapov**
Proc. "IEEE ASDAM'14", 2014. DOI: 10.1109/ASDAM.2014.6998679.
- V.A. Shakhnov, L.A. Zinchenko**
Nanoinzheneriya [Nanoengineering], 2014, N 2, 29 (in Russian).
- V.A. Shakhnov, L.A. Zinchenko, E.V. Rezhikova**
Int. J. Math. Comput. Simul., 2014, **8**, 141.
- 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.
- 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.
- K. Sengupta, A.A. Krisnadhi, P. Hitzler**
LNCs, 2011, **7031**, 617. DOI: 10.1007/978-3-642-25073-6_39
- 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 52, 8 (in Russian).
- 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).
- 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