



МИНОБРНАУКИ РФ  
Российский фонд  
фундаментальных исследований  
Национальный исследовательский  
Томский государственный университет  
НИИ прикладной математики и механики  
Томского государственного университета  
Физико-технический факультет  
Совет молодых учёных ТГУ



**VII Международная молодежная научная конференция  
«Актуальные проблемы современной механики  
сплошных сред и небесной механики – 2017»  
г. Томск, 27–29 ноября 2017 г.**

**VII International Scientific Conference  
«Current issues of  
continuum mechanics and celestial mechanics – 2017»,  
November, 27–29, 2017**

Томск-2018

УДК 539.3.004  
ББК 22.25; 22.251.22.62  
М43

**Международная** молодежная научная конференция «Актуальные проблемы М43 современной механики сплошных сред и небесной механики» 27–29 ноября 2017 г.: Материалы конференции / под ред. М.Ю. Орлова. – Томск. 2017. – 370 с.

ISBN 978-5-9906644-8-7

Представлены материалы конференции молодых ученых «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики», прошедшей 27–29 ноября 2017 г.

Для научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов.

**УДК 539.3.004**  
**ББК 22.25; 22.251.22.62**

*Конференция проведена при поддержке гранта РФФИ 17-31-10291*

*Публикуется в авторской редакции*

ISBN 978-5-9906644-8-7

© Томский государственный университет, 2017

## **Со-Председатели конференции:**

Милехин Юрий Михайлович, академик РАН  
Липанов Алексей Матвеевич, академик РАН  
Глазунов Анатолий Алексеевич, профессор, д.ф.-м.н.  
Шрагер Эрнст Рафаилович, профессор, д.ф.-м.н.

## **Международный комитет конференции:**

**Кружка Л.С.** (Военно-технологический университет им. Домбровского, Польша), **Фомин Н.А.** (Институт тепло-массообмена им. Лыкова, Белоруссия), **Кусаинов К.К.** (Карагандинский госуниверситет им. А.Е. Букетова, Казахстан), **Ахмед Брара** (директор RIB, Алжир), **Момчило Милюнович** (Белградский университет, Сербия), **Аль Карагулай Хуссам Али Халаф** (Ди Кар университет, Ирак), **Паскаль Форкью** (Университет Ж. Форье, Франция), **Мартина Дрдлова** (НИИ строительных материалов, Чехия) **Ашрат Икбал** (Университет Нью Дели, Индия), **Джонсон Аленгарам** (Малайский университет, Малазия), **Абрахам Кристиан** (Национальный университет Сингапура, Сингапур), **Юлий Бай** (Пекинский технологический университет, Китай), **Александр Фильков** (Университет Мельбурна, Австралия)

## **Программный комитет конференции:**

**Архипов В.А.** (проф., НИИ ПММ ТГУ), **Бордовицына Т.В.** (проф., НИИ ПММ ТГУ), **Биматов В.И.** (проф. ТГУ), **Васенин И.М.** (проф., ТГУ), **Васильев А.Н.** (проф., СПбПУ), **Глазырин В.П.** (зав. лаб. НИИ ПММ ТГУ), **Еремин И.В.** (к.ф.-м.н., НИИ ПММ ТГУ), **Ищенко А.Н.** (проф., ТГУ), **Крайнов А.Ю.** (проф., ТГУ), **Кульков С.Н.** (проф., ТГУ), **Масловский В.И.** (доцент, ТГУ), **Орлов М.Ю.** (к.ф.-м.н., НИИ ПММ ТГУ), **Разоренов С.В.** (проф., ТГУ), **Скрипняк В.А.** (проф., ТГУ), **Шваб А.В.** (проф., ТГУ), **Шрагер Г.Р.** (проф., ТГУ)

## **Организационный комитет конференции:**

**Орлов М.Ю.** (Председатель оргкомитета, к.ф.-м.н.), **Басалаев С.А.** (к.ф.-м.н., технический секретарь), **Сидоров А.Д.** (аспирант ТГУ, секретарь конференции), **Никитась О.С.** (студент ТГУ, секретарь конференции), **Галушина Т.Ю.** (к.ф.-м.н., ТГУ), **Коробенков М.В.** (к.ф.-м.н., ТГУ), **Козулин А.А.** (к.ф.-м.н., ТГУ), **Кулешов А.А.** (к.ф.-м.н., НИИ ПММ ТГУ), **Маслов Е.А.** (к.ф.-м.н., ТГУ), **Порязов В.А.** (к.ф.-м.н., ТГУ), **Савкина Н.В.** (к.ф.-м.н., ТГУ), **Ящук А.А.** (к.ф.-м.н., ТГУ), **Хрусталева А.П.** (аспирант, ТГУ), **Перфильева К.Г.** (НИИ ПММ ТГУ), **Дубкова Я.А.** (НИИ ПММ ТГУ)

## ОРГАНИЗАЦИИ-УЧАСТНИКИ АПСМССНМ-2017:

Балтийский федеральный университет имени И. Канта (Калининград),  
Башкирский государственный университет (Уфа),  
Бирский филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Башкирский государственный университет» (Бирск)  
Институт астрономии Российской академии наук (Москва)  
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск),  
Институт сильноточной электроники СО РАН (Томск),  
Институт углехимии и химического материаловедения Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН (Кемерово)  
Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН (Бийск),  
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск),  
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (Новосибирск),  
Кемеровский государственный университет (Кемерово),  
АО "Информационные спутниковые системы" им. академика М.Ф. Решетнева" (Красноярск),  
Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск),  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск),  
Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики (Томск),  
НИ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (Н. Новгород),  
Новосибирский государственный технический университет (Новосибирск),  
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского (Омск),  
Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема (Биробиджан),  
РФЯЦ ВНИИ экспериментальной Физики (Саров),  
Северский технологический институт – филиал Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Северск),  
Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева (Красноярск),  
Томский университет систем управления и радиоэлектроники (Томск),  
Тверской государственный университет (Тверь),  
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН (Кемерово),  
Южный научный центр Российской академии наук (Ростов-на-Дону),  
ООО ЭПАМ Систэмз (Тверь)  
Общество практической Пулевой Стрельбы.

Editor  
Maxim Yu. Orlov  
National Research Tomsk State University  
Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics  
36 Lenin prospect  
Tomsk, 634050  
Tomsk Region  
Russian Federation

E-mail: [orloff\\_m@mail.ru](mailto:orloff_m@mail.ru)

To learn more about the Conference Proceeding, please visit the webpage:  
**<http://cimcm.tsu.ru/index.php/ru/contact-information-ru-2>**

«Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics 2017»  
VII<sup>th</sup> International Youth Scientific Conference  
Tomsk, Russia, 27-29 November 2017



EDITOR

Maxim Yu.Orlov  
National Research Tomsk State University  
Research Institute of Applied Mathematics  
and Mechanics of Tomsk State University  
Tomsk, Russia

### *Sponsoring organizations*

The Ministry of Education and Science Russia  
Russian Fund of Basic Research  
National Research Tomsk State University

@Tomsk State University  
Printed in the Russian Federation

«Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics – 2017»:

**Co-Chairs:**

**Yuri Milechin**, Ph.D, academician of RAS  
**Aleksey Lipanov**, Ph.D., academician of RAS  
**Anatoly Glazunov**, Ph.D., professor, TSU  
**Ernst Shrager**, Ph.D., professor, TSU

**International Committee Members:**

**L. Kruzhka**, Ph.D., Military University of Technology (Poland), **N. Fomin**, Professor, Ph.D., A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NASB (Belorussia), **K. Kusainov**, Professor, Ph.D., The Karaganda State University of the name of academician E.A. Buketov (Kazakhstan), **A. Brara**, Ph.D., director of CNERB Research Center (Algeria), **M. Milinovich**, professor, Ph.D., University of Belgrad (Serbia), **Hussam Ali Khalaf**, PhD Marshes Research Center, University of Thi-Qar (Iraq), **M. Drdlova**, PhD, Research Institute for Building Materials (Czech Republic), **Pascal Forquin**, Prof. Dr., Université Joseph Fourier (France), **Yulie Bai**, Ph.D, Beijing University of Technology (China), **Abraham Christian**, Ph. D. National University of Singapore (Singapore), **U. Johnson Alengaram**, Prof. Dr., University of Malaya (Malasia), **Iqbal M.A.** Ph.D. Dr. Indian Institute of Technology Roorkee (India), **Al. Filkov**, Ph.D. The University of Melbourne (Australia)

**Program Committee Members:**

**V. Arhipov** (RSI AMM), **T. Bordovitsina** (RSI AMM), **V. Bimatov** (TSU), **V. Butov** (RSI AMM), **Ig. Vasenin** (TSU), **A. Vasilev** (SPbPolyTechU), **V. Glazyrin** (RSI AMM), **Iv. Eremin** (RSI AMM), **A. Ishchenko** (TSU), **A. Kraynov** (TSU), **S. Kul'kov** (TSU), **V. Maslovskiy** (TSU), **Max. Yu. Orlov** (TSU) **S. Razorenov** (TSU), **V. Skripnyak** (TSU), **A. Shvab** (TSU), **G. Shrager** (TSU)

**Organizing and Technical Committee Members:**

**Max. Orlov** (Ph.D., RSI AMM, Committee Chair), **S. Basalaev** (Ph.D, web-master), **Alex. Sidorov** and **O. Nikitas** (TSU, Conference Technical Secretary), **T. Galushina** (Ph.D., RSIAMM), **Max. Korobekov** (Ph.D., TSU), **A. Kozulin** (Ph.D., TSU), **Ar. Kuleshov** (Ph.D, TSU) **E. Maslov** (Ph.D., TPU), **V. Poryazov** (Ph.D., TSU), **N. Savkina** (Ph.D., TSU), **Al. Yaschuk** (Ph.D., TSU), **An. Chrustalev** (Postgraduate student, TSU), **Ya. Dubkova** (TSU), **K. Perfilieva** (TSU)

Address: Faculty of Physics and Engineering,  
National Research Tomsk State University,  
36, Lenin Ave., Tomsk, Russia, 634050

## **Organizations - participants of the CICMCM-2017:**

Bashkir State University (Ufa),  
Birsk branch of Federal state budgetary educational institution «Bashkir State University» (Birsk),  
Immanuel Kant Baltic Federal University (Kaliningrad),  
Institute of Astronomy of Russian Academy of Science (Moscow),  
Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (Tomsk),  
Institute of High-Current Electronics Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (Tomsk),  
Institute of Coal Chemistry and Material Science at the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry SB RAS (Kemerovo),  
Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Biysk),  
Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk),  
Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, (Novosibirsk),  
Kemerovo State University (Kemerovo),  
JSR "Academician M.F. Reshetnev "Information satellite systems" (Krasnoyarsk),  
National Research Tomsk State University (Tomsk),  
Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics (Tomsk),  
National Research Tomsk Polytechnic University (Tomsk),  
Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod (N. Novgorod),  
Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk),  
Dostoevsky Omsk State University (Omsk),  
Sholom-Aleichem Priamursky State University (Birobidjan),  
The Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics (Sarov),  
Seversk Technological Institute - branch of the federal state autonomous educational institution of higher education National Research Nuclear University «MEPHI» (Seversk),  
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology (Krasnoyarsk),  
Tomsk State University of control system and Radioelectronics (Tomsk),  
Tver State University (Tver),  
SB RAS Kemerovo Science Center (Kemerovo),  
Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences (Rostov-on-Don),  
EPAM Systems Ltd. (Tver)

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий сборник – это Материалы VII молодежной научной конференции «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики-2017», посвященной 55-летию физико-технического факультета. В работе нашего ежегодного мероприятия приняло рекордное количество участников (более 200) из различных научных организаций нашей страны. Осенью 2017 года Томский государственный университет объединил молодых ученых-механиков из Калининграда, Москвы, Санкт-Петербурга, Нижнего Новгорода, Твери, Омска, Новосибирска, Кемерово, Бийска, Бирска Красноярска, Биробиджана, Уфы и Ростова-на-Дону. Слушателями и гостями конференции были научные сотрудники из РФЯЦ-ВНИИ ЭФ (Саров) и РФЯЦ – ВНИИ ТФ (Снежинск). Многие являлись бывшими выпускниками физико-технического факультета.

Хочется отметить высокое качество докладов, которые были представлены на секционных заседаниях конференции. Подавляющее большинство научных исследований были поддержаны РФФИ и РФН. Авторы выполняли свои исследования, используя как коммерческие, так и собственные пакеты прикладных программ. Некоторые исследования выполнены с привлечением Центров Коллективного Пользования на дорогостоящем высокоточном оборудовании. Однако следует отметить, что возможности отечественных научных разработок не уступают зарубежным аналогам.

Избранные доклады прошлогодней конференции были опубликованы в международном научном издательстве IOP Publishing House (Великобритания). Конференция открывает границы для проведения научных исследований за рубежом в рамках различных мероприятий РФФИ. Постоянными членами Международного научного комитета конференции являются ведущие ученые из Индии, Франции, Польши, Китая, Белоруссии, Сербии и др. стран. Они открыты для сотрудничества и приглашают посетить зарубежные научные конференции по механике сплошных сред и небесной механики.

Программный и организационный комитет благодарит участников за интересные доклады. Оргкомитет также благодарит рецензентов, которые помогли оформить настоящий сборник своими полезными замечаниями. Поздравляем руководство физико-технического факультета и всех сотрудников с 55-летием физико-технического факультета и желаем всего наилучшего. До новых встреч!

Председатель Организационного комитета конференции  
*Орлов М.Ю.*

## PREFACE

The present book is the Proceedings of the VII Youth Scientific Conference "Current Issues of Continuum Mechanics and Celestial Mechanics-2017", dedicated to the 55<sup>th</sup> anniversary of the Faculty of Physics and Engineering of Tomsk State University. About 200 participants from various scientific organizations of our country took part in the meetings of our annual event. In autumn of 2017, Tomsk State University brought together young scientists from Kaliningrad, Moscow, St. Petersburg, Nizhny Novgorod, Tver, Omsk, Novosibirsk, Kemerovo, Biysk, Birsk, Krasnoyarsk, Birobidzhan, Ufa and Rostov-on-Don.

Also participants and guests of the conference were researchers from Institutes of Russian Federal Nuclear Centers. Many people were former graduates of the Faculty of Physics and Engineering.

I would like to note the high quality of the reports that were presented at the sectional meetings of the conference. The overwhelming majority of scientific research was supported by Russian scientific foundations. The authors carried out their studies using both commercial and proprietary software packages. Some studies were performed with the involvement of Collective Use Centers on expensive high-precision equipment. However, it should be noted that the possibilities of domestic scientific developments are not inferior to foreign analogues.

Selected reports of last year's conference were published in the international scientific publishing house IOP Publishing House (Great Britain). The conference opens the borders for carrying out scientific research abroad within the framework of various activities of the RFBR. The permanent members of the International Scientific Committee of the Conference are leading scientists from India, France, Poland, China, Belarus, Serbia and other countries. They are open for cooperation and invite to visit foreign scientific conferences on mechanics of continuous media and celestial mechanics.

The Program and Organizing Committee thanks the participants for interesting reports. The Organizing Committee also thanks the reviewers for their helpful comments. Congratulations to the leadership of Faculty of Physics and Engineering and staff of all 55<sup>th</sup> anniversary and wish them all the best. Until next time!

Chairman Conference Organizing Committee  
Ph.D., M.Yu. Orlov

# ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

---

---

## PLENARY SESSION

### 60 ЛЕТ КОСМИЧЕСКОЙ ЭРЫ И РАЗВИТИЕ НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ

**Т.В. Бордовицына**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия

E-mail: [tvbord@sibmail.com](mailto:tvbord@sibmail.com)

**Аннотация.** Обсуждаются итоги 60 лет исследования космоса с помощью космических аппаратов. Основное внимание уделяется особенностям развития небесной механики в этот период. За прошедшие 60 лет в этой области достигнут значительный прогресс. Для задач высокоточного прогнозирования движения небесных тел разработаны высокоэффективные аналитические и численные алгоритмы. Отмечается, что в XX веке небесная механика оставалась на позициях детерминизма, заложенных еще Лапласом. В то же время параллельно с ней интенсивно развивалась теория гамильтоновых динамических систем, которая глубоко продвинулась в понимании механизмов, лежащих в основе порядка и хаоса. Широкое применение методов численного моделирования дает возможность быстро получать большое количество материала о динамике системы. Интерпретация этого материала, как правило, требует привлечения теоретических знаний о динамике гамильтоновых систем. Поэтому главной тенденцией современного развития небесной механики является объединение методов численного моделирования с глубоким знанием теории гамильтоновых динамических систем. Это позволяет надежно интерпретировать получаемые результаты.

**Ключевые слова:** исследование космоса, небесная механика, тенденции современного развития

### 60 YEARS OF THE SPACE AGE AND THE DEVELOPMENT OF CELESTIAL MECHANICS

**Tatiana V. Bordovitsyna**

National Research Tomsk State University, Russia

E-mail: [tvbord@sibmail.com](mailto:tvbord@sibmail.com)

**Abstract.** The results of 60 years of space exploration using spacecraft are discussed. The main attention is paid to features of the development of celestial mechanics in this period. Over the past 60 years, significant progress has been made in this area. High-precision analytical and numerical algorithms have been developed for forecasting of motion of celestial bodies. It is noted that in the XX century the celestial mechanics remained on the positions of determinism laid by Laplace. At the same time the theory of Hamiltonian dynamical systems developed intensively. This theory gives great opportunities in

understanding the mechanisms underlying the order and chaos. The main trend of the modern development of celestial mechanics is the unification of methods of numerical simulation with a profound knowledge of the theory of Hamiltonian dynamical systems. This makes it possible to reliably interpret the results obtained.

**Key words:** space exploration, celestial mechanics, trend of the modern development

За 60 лет космонавтика прошла путь от простейшего спутника до Международной космической станции, от первых снимков обратной стороны Луны до комплексных исследований системы Плутона на краю Солнечной системы.

История в цифрах выглядит следующим образом. За период 1957–2016 годов 10 стран осуществили запуск 5244 ракет-носителей (РН), которые вывели в космос 7547 космических аппаратов, принадлежащих 96 странам. Суммарная стартовая масса РН составила 1 978 482 т. Для 2016 года соответствующие цифры: 83 РН общей массой 49 059 т, 216 КА, принадлежащих 20 странам.

Цели запусков КА, направления деятельности, связанные с их использованием, можно коротко сформулировать следующим образом.

1. Экономическая деятельность. Это наиболее обширная и результативная часть деятельности Человека в околоземном космическом пространстве. Она охватывает связь, метеорологию, дистанционное зондирование Земли и спутниковую навигацию. В настоящее время данные, получаемые от работы различных космических систем, используются повсеместно в жизни современного человека. Ярким примером такого использования являются спутниковые системы глобального позиционирования ГЛОНАСС и GPS.

2. Оборонная деятельность направлена на создание и использование систем предупреждения о ракетном нападении, радиотехническую разведку и инспекцию космических аппаратов других стран.

3. Научные исследования являются одним из наиболее впечатляющих направлений космической деятельности. С помощью космических аппаратов в той или иной мере исследованы все планеты Солнечной системы и Луна. Космические телескопы существенно расширили представления ученых о структуре нашей Галактики и характеристиках космического пространства. Наблюдение Земли из космоса открыло новые возможности в изучении геофизических и геодинамических процессов.

4. Пилотируемая программа прошла путь от краткосрочных полетов на одноместных космических кораблях до постоянно действующей международной космической станции. Главная цель программы пилотируемых полетов адаптация человека к жизни и работе в условиях космоса.

5. Параллельно со всеми указанными программами идет развитие космических технологий, направленное на изучение возможностей и условий работы техники в космосе.

За прошедшие 60 лет достигнут значительный прогресс в развитии небесной механики

Как известно, многие аналитические методы небесной механики были предложены в конце XIX – начале XX веков в работах Пуанкаре, Делоне, Цейпеля и Хилла. Современное изложение этих методов можно найти в монографиях [1, 2]. Практические задачи высокоточного прогнозирования движения небесных тел в эпоху космических полетов потребовали дальнейшего развития и алгоритмизации этих методов, что позволило привлечь к их использованию бурно прогрессирувавшие в XX веке электронные вычислительные машины (ЭВМ). Для решения задач динамики искусственных спутников Земли (ИСЗ) и космических аппаратов (КА) аналитическими методами были предложены так называемые промежуточные орбиты, учитывающие основные возмущения. Наиболее применяемыми из них являются эллипс, с вращающимися линиями аполлонов и узлов и задача двух неподвижных центров [3].

Появление мощных ЭВМ способствовало развитию и применению численных методов высоких порядков в задачах небесной механики. Можно отметить большие успехи томской школы небесных механиков в разработке численных алгоритмов и программ для решения широкого круга задач высокоточного прогнозирования движения и исследования долговременной орбитальной эволюции малых объектов Солнечной системы, как естественного, так и искусственного происхождения [4–6].

Значительные успехи были достигнуты в развитии методов решения нелинейных задач, возникающих при определении параметров движения по данным измерений [7–9] и построении вероятностных моделей движения небесных тел [10].

Следует, однако, сказать, что в XX веке небесная механика оставалась на позициях детерминизма, заложенных еще Лапласом. В то же время параллельно с ней интенсивно развивалась теория гамильтоновых динамических систем, которая глубоко продвинулась в понимании механизмов, лежащих в основе порядка и хаоса. Эти результаты были получены в значительной степени благодаря русской школе математиков. Как отмечает А. Морбидели, в предисловии к русскому изданию его книги «Современная небесная механика» [11], «к русской школе, внесшей, возможно, наибольший вклад в развитие теории динамических систем вообще и теории гамильтоновых систем в частности, принадлежат такие великие умы как, Колмогоров, Арнольд, Нехорошев, Чириков, Нейштадт и другие».

К концу XX века благодаря применению космических аппаратов и мощных наземных телескопов был накоплен огромный наблюдательный материал по исследованию структуры Солнечной системы. В результате были открыты такие явления как хаос в динамике планет и их спутников. Выявлены транспортные маршруты, по которым астероиды покидают главный пояс и становятся опасными для Земли, получены данные по

структуре спутниковых систем больших планет, определены причины внутреннего нагрева галилеевых спутников Юпитера и т.п. В основе всех открытых явлений лежат динамические процессы и это, с одной стороны, делает небесную механику фундаментальным разделом науки о Солнечной системе, а, с другой стороны, требует нового подхода к описанию явлений, основанного на более глубоком знании теории динамических систем. Привлечение этих знаний сегодня особенно важно, поскольку в исследовании Солнечной системы широко применяются методы численного моделирования, которые дают возможность быстро получать большое количество материала о динамике системы. Однако интерпретация этого материала, как правило, требует привлечения теоретических знаний о динамике гамильтоновых систем.

Интересно отметить, что в результате деятельности человека в космосе непреднамеренно была создана уникальная лаборатория по исследованию динамики механических систем в виде совокупности разнообразных объектов искусственного происхождения в околоземном космическом пространстве (ОКП). В течение 60 лет ОКП интенсивно пополняется отработавшими (КА), последними ступенями ракет-носителей, разгонными блоками и фрагментами, образовавшимися в результате распада объектов на орбите. В настоящее время в околоземном космическом пространстве (ОКП) существует около 20000 только зарегистрированных и регулярно наблюдаемых космических объектов (КО) размером больше 10 см. При этом только 7% объектов являются функционирующими КА, остальные относятся к пассивным объектам космического мусора, которые движутся по законам небесной механики и подчиняются тем динамическим закономерностям, которые характерны для соответствующей области ОКП. Это делает необходимым знание динамической структуры ОКП и прежде всего особенностей динамики отдельных интенсивно используемых областей. Особенностью динамики околоземных объектов (по сравнению с объектами околосолнечными) является высокая скорость протекания эволюционных процессов. Наличие большого количества возмущающих факторов, а соответственно и различных резонансов, делает динамическую структуру ОКП очень сложной и позволяет на объектах ОКП изучать разнообразные особенности эволюции сложных динамических систем, а также динамическую структуру самого околоземного орбитального пространства. Эти сведения имеют не только познавательное значение, но и могут быть использованы для разработки способов утилизации и паркинга отработавших объектов спутниковых систем.

В связи с предполагаемым в ближайшее десятилетие освоением Луны и окололунного пространства актуальным становится знание динамической структуры окололунного пространства для построения спутниковых систем связи и навигации долговременного использования. Интенсивное исследование Марса потребует знания не только динамической структуры

около марсианского пространства, но и знания распределения метеороидных потоков и астероидов, сближающихся с Землей в космическом пространстве между Землей и Марсом.

Современная небесная механика, объединяющая численное моделирование с теорией гамильтоновых систем становится в настоящее время мощным средством исследования динамики внесолнечных планетных систем [12], список которых постоянно пополняется.

### Литература

1. *Брумберг В.А.* Аналитические алгоритмы небесной механики. М.: Наука.1980. 208 с.
2. *Холшевников К.В.* Асимптотические методы небесной механики. Л.: Изд-во ЛГУ.1985. 208 с.
3. *Уральская В.С., Журавлев С.Г.* Движение искусственных спутников в гравитационном поле Земли // Итоги науки и техники. Серия: Исследование космического пространства. М.: ВИНТИ, 1980. Т. 15. С. 5-43
4. *Бордовицына Т.В.* Современные численные методы в задачах небесной механики. М.: Наука, 1984. 136 с.
5. *Быкова Л.Е., Галушина Т.Ю.* Алгоритмическое и программное обеспечение решения задач динамики астероидов, сближающихся с Землей, в среде параллельного программирования // Изв. вузов. Физика. 2009. Т. 52. № 10/2. С. 12–19.
6. *Aleksandrova A.G., Bordovitsyna T.V. and Chuvashov I.N.* Numerical Modeling in Problems of Near-Earth Object Dynamics// Russian Physics Journal, 2017. Vol. 60, N. 1, P. 80–89.
7. *Bordovitsyna T., Avdyushev V., Chernitsov A.* New Trends in Numerical Simulation of the Motion of Small Bodies of the Solar System // Celest. Mech. 2001. Vol. 80. I. 3. P. 227–247.
8. *Milani A., Gronchi G.* Theory of orbit determination. New York: Cambridge university press. 2010. 380 p.
9. *Авдюшев В.А.* Численное моделирование орбит небесных тел. Томск: Издательский дом Томского госуниверситета. 2015. 336 с.
10. *Syusina O.M., Chernitsov A.M., Tamarov V.A.* Construction of confidence regions in problem on probabilistic study into motion of minor bodies of the solar system // Solar System Research. 2012. M 46 (3), pp. 195-207.
11. *Морбиделли А.* Современная небесная механика. Аспекты динамики Солнечной системы. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2014. 432 с.
12. *Shevchenko I.I.* The Lidov–Kozai effect – applications in exoplanet research and dynamical astronomy. Springer. 2017. 198 p.

# ИЗ ПРАКТИКИ РАБОТЫ ФИЗКАБИНЕТА ТГУ. РЕЗОНАНСЫ И АВТОКОЛЕБАНИЯ

**Ю.П. Михайличенко**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: mup@phys.tsu.ru

**Аннотация.** Задача нашего сообщения показать продуктивность применения общей теории колебаний как раздела курса общей физики к решению прикладных задач на примерах резонансов различной физической природы. В курсах общей физики первое знакомство с резонансами проводится на примерах механических колебаний. Резонанс в механических системах демонстрируются на язычковом резонансном тахометре Фрама. А вот на трубе Рийке демонстрируются автоколебания. После рассмотрения примеров разрушительного воздействия автоколебаний на конструкции мостов проще перейти к изучению флаттера, который остается серьезной проблемой в современной аэродинамике.

**Keywords:** физкабинет, лекционные демонстрации, резонанс, автоколебания.

## PHYSICS LECTURE-DEMONSTRATIONS IN TOMSK STATE UNIVERSITY. RESONANCES AND SELF-EXCITED OSCILLATIONS

**Yuri P. Mikhailichenko**

National Research Tomsk State University, Russia  
E-mail: mup@phys.tsu.ru

**Abstract.** This article shows the usefulness of the theory of oscillations as part of general physics for explaining many applied problems. The first understanding of resonances is realized using mechanical oscillations in general physics such as a vibrating-reed frequency meter. Then auto-oscillations on the Rijke tube can be demonstrated in a very expressive way. After considering examples of the destructive effects of auto-oscillations on large bridges, it is easier to study flutter as a serious problem in modern aerodynamics.

**Keywords:** Physics demo room, lecture demonstrations, resonance, auto oscillations, Schumann resonances, Rijke tube.

Во вступительном слове на этой конференции академик РАН Алексей Матвеевич Липанов отметил заметное более высокое качество работы специалистов как следствие существующей глубокой фундаментальной подготовки по физике и математике на ФТФ ТГУ.

Задача нашего сообщения показать продуктивность применения общей теории колебаний, которая рассматривается в курсах общей физики, к решению прикладных задач на примерах резонансов разной физической природы.

В повседневной жизни уже стала привычной медицинская диагностика на аппаратах с применением ядерно-магнитного резонанса (или МРТ – магнитно резонансная томография). Резонанс в ядерной физике это элементарная частица, которая представляет собой возбуждённое состояние адрона. Большинство известных частиц являются резонансами. Резонансы аналогичны возбуждённым состояниям атома: когда электрон поглощает энергию и переходит на другой более высокий энергетический уровень. Подобные возбуждённые состояния, называемые изомерами, существуют и у атомных ядер. Из современных открытий отметим самоиндуцированную прозрачность, которая была предсказана в 1965 г. и впервые наблюдалась два года спустя при исследовании прохождения ультракоротких импульсов в рубиновом стержне при 40К. Когда мощность импульса превышает некоторое критическое значение, то потери энергии при распространении уменьшаются в  $10^5$  раз. Если напряжённость поля излучения достаточно велика, ансамбль резонансных атомов переходит в когерентное возбуждённое состояние под действием первой половины импульса (на фронте импульса), и когерентно релаксирует в основное состояние под действием второй половины импульса (на спаде импульса) и излучение не поглощается.

Конечно, мы помним основные вехи в истории открытия радио. Отметим, что в те же годы высказывались предположения о возможности установления стоячих электромагнитных волн между поверхностью Земли и ионосферой. Однако систематическое изучение этих резонансов началось после публикаций В.О. Шумана в 1952 году. Эти сверхнизкочастотные колебаний практически не затухают и имеют фиксированные частоты (7.83 – 14.1 – 20.3 – 26.4 – 32.4) Гц и их трудно исследовать, так как необходима специальная чувствительная аппаратура, когда даже движение деревьев или людей может повлиять на показания приборов. Наиболее распространенное объяснение дается с позиций «грозовой теории», в которой молнии являются огромными передатчиками и возбуждают электромагнитные колебания в широком диапазоне частот. И здесь невольно вызывает интерес близость частот Шумана к частотам биоритмов, которые регистрируются на электроэнцефалограммах мозга.

Прежде чем заниматься изучением таких сверхнизких частот, необходимо иметь полные знания теории и практики в области радиочастот. В электродинамике изучение начинается с колебательного контура. Особый интерес и эмоциональный настрой происходит во время демонстраций трансформатора Тесла на частоте 1 МГц. Нами демонстрируются такие свойства высокочастотных колебаний как коронный разряд, токи смещения, скин-эффект.

В курсах общей физики первое знакомство с резонансами проводится на примерах механических колебаний. Именно для механических колебаний проще вывести основные уравнения и рассмотреть содержательные графи-

ки резонансных кривых. Резонанс в механических системах демонстрируется на язычковом резонансном тахометре Фрама. Он представляет собой волчок, у которого вертикальная ось закреплена в обойме, в верхней части которой прикреплены металлические пластинки разной длины, как язычки гармоника. В волчке высверлены сбоку несколько отверстий, чтобы он бил в оси. С уменьшением числа оборотов волчка плавно меняется частота биений, на которую и откликаются, резонируют язычки той или иной длины. Выразительны проявления резонанса в акустике на примерах музыкальных инструментов, "поющих бокалов", в опытах с камертонами. А вот на трубе Рийке [1], которая состоит только из стеклянной трубы и металлической нагретой сетки, демонстрируются автоколебания. На слух некоторые фрагменты развития колебаний не воспринимаются, поэтому установление и затухание автоколебаний на этом историческом приборе становятся понятными и выразительными при детальном рассмотрении фонограмм компьютерными программами.

Цель нашего доклада состоит в том, чтобы наметить переходы от общей физики к специальным дисциплинам. Такие переходы будут осуществляться проще и успешнее при хорошем усвоении материала и более детальной проработке основных законов физики. Знакомый всем пример с разрушением моста при прохождении марширующих солдат мы дополним здесь рассмотрением такой катастрофы, когда причиной разрушения моста стал срывной флаттер. Флаттер был серьезной проблемой в развивающейся авиации. В нашей стране решающий вклад в решениях проблем флаттера внес М.В. Келдыш, что определило в значительной степени наши успехи в самолето- и ракетостроении.

### Литература

1. *Rijke P. L.* Notiz uber eine neue Art, die in einer am beiden Enden offenen Rohre enthaltene Luft in Schwingungen zu versetzen // *Pogg. Ann. Phys. und Chem.* 1859. Vol. 107. P. 339–343

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ИСКРОВОГО ЗАЖИГАНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В РЕАГИРУЮЩИХ ГАЗОВЫХ И ДВУХФАЗНЫХ СРЕДАХ

**К.М. Моисеева, А.Ю. Крайнов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет

E-mail: moiseeva\_km@t-sk.ru

**Аннотация.** Представлены результаты численного моделирования задач зажигания и распространения фронта горения в бедной метано-воздушной смеси и во взвеси

угольной пыли в воздухе и метано-воздушной смеси. Показано влияние состава смеси на скорость распространения фронта горения по взвеси угольной пыли и минимальную энергию искрового зажигания. Результаты расчета показали, что увеличение массовой концентрации угольной пыли приводит к увеличению скорости горения угле-метано-воздушной смеси. Увеличение объемного содержания метана приводит к уменьшению минимальной энергии искрового зажигания. Показано, что минимальная энергия искрового зажигания зависит от размера частиц угольной пыли. Чем больше содержание мелкодисперсной фракции в массе взвеси, тем меньше минимальная энергия искрового зажигания.

**Ключевые слова:** газовзвесь, угольная пыль, искровое зажигание, двухфазные потоки, газовая динамика

## NUMERICAL SOLUTION OF THE PROBLEMS OF SPARK IGNITION AND FLAME PROPAGATION IN REACTING GAS AND TWO-PHASE MEDIA

**K.M. Moiseeva and A.Yu. Krainov**

National research Tomsk State University  
E-mail: moiseeva\_km@t-sk.ru

**Abstract.** The results of numerical simulation of ignition problems and the propagation of the combustion front in lean methane-air mixture, and in the suspension of pulverized coal in air and methane-air mixtures. The influence of the composition of the mixture on the propagation velocity of the combustion front on a suspension of coal dust and the minimum energy of spark ignition is shown. The results of calculation showed that an increase in the mass concentration of coal dust leads to an increase in the combustion rate of the coal-methane-air mixture. An increase in the volume content of methane in the mixture leads to a decrease in the minimum energy of the spark ignition. It is shown that the minimum energy of a spark ignition depends on the particle size of the coal dust. Over the content of the finely dispersed fraction in the coal dust suspension leads to a reduction in the minimum energy of the spark ignition.

**Keywords:** gas suspension, coal dust, spark ignition, two-phase flows, gas dynamics.

В докладе представлены результаты численного моделирования задач зажигания и распространения фронта горения в бедной метано-воздушной смеси и во взвеси угольной пыли в воздухе и метано-воздушной смеси.

Задача инициирования процесса горения двухфазной среды за счет источника, расположенного в центре объема, должна решаться с учетом инерционного и теплового взаимодействия между фазами (газом и частицами). Поэтому для моделирования горения двухфазной реагирующей среды необходимо привлекать модель двухфазной двухскоростной реагирующей среды [1]. Для учета движения газа и частиц, обусловленного расширением газа при его разогреве используется система уравнений, описывающая балансы массы, импульса и энергии частиц и газа. Для учета химических реакций, проходящих в газе и на поверхности частиц, исполь-

зуются уравнения баланса массы окислителя и горючего в конденсированной и газовой фазах. Решение задач динамики двухфазных реагирующих сред проводится с помощью метода С.К. Годунова [2] для газа и алгоритма распада произвольного разрыва в среде, лишенной собственного давления, по методу А.Н. Крайко [3] для частиц.

Задача об искровом зажигании взвеси угольной пыли в воздухе или в реагирующем газе является одной из классических задач физики горения и взрыва. На практике выявлено, что минимальная энергия искрового зажигания взвеси угольной пыли зависит от состава смеси (дисперсности и массового содержания пыли в газе, содержания реагирующих компонентов в газе). В докладе представлены результаты численного исследования искрового зажигания взвеси угольной пыли в воздухе и в бедной метано-воздушной смеси. При постановке задачи предполагается, что по объему равномерно распределена взвесь угольной пыли с массовой концентрацией  $m_{\text{dust}}$  в воздухе или в метано-воздушной смеси с объемной концентрацией метана  $a_{\text{CH}_4}$ . Нитевидный мгновенный источник зажигания расположен в центре. Внешняя граница расчетной области полагается бесконечно удаленной от источника зажигания. Коэффициенты диффузии и теплопроводности газа зависят от температуры. В смеси протекают две параллельные реакции - экзотермическая химическая реакция в газе и гетерогенная реакция на поверхности частиц. Скорость реакции в газе в случае расчета искрового зажигания угле-метано-воздушной смеси описывается кинетикой второго порядка. Скорость гетерогенной химической реакции на частицах описывается с учетом диффузии окислителя к поверхности частицы. Константы скоростей химических реакций зависят от температуры по закону Аррениуса. Учитывается межфазное взаимодействие между частицами и газом. Потерями тепла на электроды пренебрегается.

Было выполнено численное исследование влияния состава взвеси угольной пыли на минимальную энергию искрового зажигания взвеси пыли в воздухе и метано-воздушной смеси. Результаты расчета сопоставлены с известными экспериментальными данными [4]. Из результатов численного исследования определено, что с увеличением размера частиц минимальная энергия искрового зажигания увеличивается. Показано, что минимальная энергия искрового зажигания мелкодисперсной аэровзвеси соответствует данным [4], для крупных частиц минимальная энергия искрового зажигания на порядок превышает данные [4]. Расчет зажигания бидисперсной и полидисперсной аэровзвеси угольной пыли показал, что основное влияние на минимальную энергию искрового зажигания оказывает содержание мелких частиц. Результаты расчета искрового зажигания монодисперсной взвеси угольной пыли в метано-воздушной смеси с объемным содержанием метана 1–3 % показали, что увеличение объемного содержания метана в смеси приводит к понижению минимальной энергии искрового зажигания угле-метано-воздушной смеси.

Дальнейшие работы были направлены на решение задачи распространения пламени метано-воздушной смеси в замкнутом объеме. Решение задачи распространения фронта горения в замкнутом сферическом объеме показало неоднородность распределения температуры продуктов реакции в объеме в конце горения. Максимальная температура газа достигается в центре объема, а минимальная – вблизи стенок (Махе эффект). Получены зависимости скорости распространения фронта горения от координаты, зависимости давления в сосуде от времени при различных значениях концентрации метана в МВС.

Добавка угольной пыли в бедную метано-воздушную смесь увеличивает скорость распространения фронта горения смеси. Было выполнено численное исследование задачи распространения пламени угле-метано-воздушной смеси в замкнутом сферическом объеме от теплового источника, расположенного в центре объема. Результаты расчета показали, что увеличение массовой концентрации угольной пыли приводит к увеличению давления в объеме и увеличению скорости сгорания в угле-метано-воздушной смеси. Показано, что чем меньше частицы, тем меньше величина массовой концентрации взвеси угольной пыли, для которой фронт горения распространяется по объему.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-33-60091 мол\_a\_дк.

#### Литература

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987.
2. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.
3. Крайко А.Н. О поверхностях разрыва в среде, лишенной 'собственного' давления// Прикладная математика и механика. 1979. Т. 43. № 3. С. 500-510.
4. Корольченко А.Я. Пожаровзрывобезопасность промышленной пыли. М.: Химия, 1986.

## ВОЗМОЖНОСТИ ТРУДОУСТРОЙСТВА ВЫПУСКНИКОВ ВУЗОВ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОДГОТОВКИ

Л.Н. Мухин

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
E-mail: cstv@mail.tsu.ru

**Аннотация.** Приведен анализ возможностей трудоустройства выпускников вузов физико-математических направлений подготовки. Приведены примеры предприятий-работодателей. Описаны возможности трудоустройства выпускников по смежным специальностям. Приведены некоторые направления деятельности молодых специалистов по смежным специальностям. Перечислены источники информации о вакансиях. Выде-  
20

лена роль факультетов и кафедр в профориентации своих будущих выпускников. Отмечена важность производственной практики, как источника практического опыта молодых специалистов. Отмечена необходимость профориентационной работы начиная со 2 курса обучения

**Ключевые слова:** трудоустройство, работодатели, рекрутинг, вакансии.

## OPPORTUNITIES OF EMPLOYMENT OF GRADUATES – PHYSICISTS AND MATHEMATICIANS

**L.N. Mukhin**

National research Tomsk state university

E-mail: cstv@mail.tsu.ru

**Abstract.** Some possibilities of employment of graduates of high schools of physical and mathematical specialties are given. Examples of enterprises-employers are given. Sources of information about vacancies are listed. Some directions of activity of young specialists in related specialties are given. The role of faculties and departments in vocational guidance of graduates is singled out. The role of industrial practice as a source of practical experience is noted. The need for vocational guidance has been noted since the 2nd year of study.

**Keywords:** employment, employers, recruiting, vacancies.

Для подавляющего большинства молодых людей высшее образование это не самоцель, а инструмент для успешной трудовой деятельности, построения собственной карьеры. Поэтому задумываться о будущем трудоустройстве следует, начиная с первых дней первого курса. Главным и первоочередным фактором будущего успешного получения желаемой должности является активность самого студента. А возможностей выбора дальнейшей трудовой деятельности в течение нескольких лет обучения будет предостаточно.

В первую очередь университет готовит ученых-исследователей. Серьезное занятие наукой предполагает защиту диссертации и продолжение деятельности на кафедре или в научно-исследовательском или академическом институте. Студентов и аспирантов ТГУ всегда готовы видеть у себя академические институты не только Томского филиала СО РАН, но и институты Новосибирского Академгородка, других городов России. Наш университет имеет многолетние связи со многими научными учреждениями Российской Федерации, в том числе благодаря сотням выпускников ТГУ, работающим в различных областях науки и техники.

Наукой можно заниматься и на промышленных предприятиях, где теснее связь с производством и больше возможностей увидеть результаты своей работы «в железе». В последнее десятилетие резко увеличилось количество предложений от крупных компаний о приеме на работу молодых специалистов инженерных и физико-математических специальностей.

Крупнейшие промышленные предприятия России, испытывая дефицит кадров, стараются «рекрутировать» будущих сотрудников еще со студенческой скамьи. В течение учебного года менеджеры по персоналу посещают вузы и проводят презентации. Любое крупное предприятие ведет политику не только рекрутинга, но и адаптации, поддержки и развития выпускников, стремясь в короткий срок превратить их в квалифицированных специалистов. В качестве примера можно привести предприятия госкорпорации РосАтом: Российские федеральные ядерные центры ВНИИТФ (г. Снежинск) и ВНИИЭФ (г. Саров), АО «Информационные спутниковые системы им. М.Ф. Решетнева» (г. Железногорск) и многие другие.

Хорошим заделом к будущему трудоустройству является производственная практика. Большую помощь в организации практики могут и должны оказывать преподаватели и сотрудники кафедры: очертить круг предприятий, помочь составить первое профессиональное резюме, написать сопроводительное письмо, характеристику. Место практики можно выбрать себе самостоятельно, разослав несколько десятков резюме и сопроводительных писем. Главное условие здесь, конечно, активность самого студента.

Многие студенты задают вопрос: «Что делать, если без опыта работы не берут на работу, а опыт во время учебы получить негде?». Производственная практика, проведенная на реальном предприятии, практическое знакомство с реальными научными или производственными задачами – это тот опыт, который в профессиональном резюме можно представить как опыт работы. Много примеров, когда этот прием полностью оправдывает себя.

Другая возможность трудоустройства выпускников физико-математических направлений подготовки – это вакансии «экономист-математик», «математик-аналитик». В таких специалистах нуждаются банки, крупные кредитные организации, брокерские конторы. Крупные промышленные и добывающие предприятия постоянно анализируют уровень и прогноз изменения цен на мировых рынках на свою и смежную продукцию. Вот некоторые из направлений деятельности таких специалистов, взятые из реальных вакансий:

- разработка и сопровождение математических моделей спроса, ценообразования, оценки рисков и т.п.;
- анализ и прогнозирование рынков нефтепродуктов России и СНГ;
- ведение информационной базы рыночной статистики и т.д.

Для работы в этой области необходимы дополнительные компетенции в области экономики, которые можно получить, прослушав отдельные курсы. Современная система образования дает такую возможность.

Очень хороший способ приобрести компетенции в области экономики – выучиться и получить сертификат программиста 1С:Предприятие. Да и сами вакансии программиста 1С встречаются очень часто, поэтому эта об-

ласть тоже может стать областью применения сил выпускника – математика.

Первым и главным источником информации о будущей деятельности для студента должны стать кафедра и факультет. Преподаватели и научные сотрудники имеют многолетние связи, деловые и научные контакты со многими научными и производственными учреждениями страны, в том числе и благодаря своим выпускникам прошлых лет. На каждой кафедре и на факультете в целом есть база предприятий, которые готовы принять на работу выпускников данной конкретной специальности, есть список предприятий – потенциальных организаторов производственных практик для студентов. Задача самого студента – выяснить условия прохождения практики на предприятии или условия приема на работу, получить консультацию у сотрудников предприятия. На сайте научно-производственных предприятий, как правило, присутствует раздел, посвященный карьере, вакансиям, условиям приема молодых специалистов и прохождения практики студентами. Там можно познакомиться с условиями, отправить свое резюме, получить консультацию.

Кроме собственных сайтов предприятий, в Интернете можно найти множество других источников информации о возможностях трудоустройства. В первую очередь это, конечно, специализированные сайты с прямыми вакансиями работодателей. В Томске основными сайтами для поиска работы являются: [vacancy-tomsk.ru](http://vacancy-tomsk.ru), [tomsk.zarplata.ru](http://tomsk.zarplata.ru), [trudvsem.ru](http://trudvsem.ru). Базу ссылок на страницы вакансий предприятий г. Томска можно найти на сайте ОПиТ ТГУ: [cstv.tsu.ru/vacancyu.pdf](http://cstv.tsu.ru/vacancyu.pdf). Интересную информацию о возможностях трудоустройства можно получить на профессиональных форумах, обсуждениях в блогах и т.д. Где, как не на профессиональных тусовках можно узнать, чем и где занимаются специалисты определенного профиля, куда и кому можно предложить свои услуги. В последние годы многие рекрутеры ведущих предприятий широко используют для привлечения молодых специалистов социальные сети.

Таким образом, перед студентами физико-математических направлений подготовки открывается множество возможностей найти и выбрать интересную работу после окончания вуза. Для этого надо определиться с выбором будущей занятости, поставить себе цель еще на 2-3 курсе и искать людей, работодателей, предприятия, которые помогут ее достичь.

# ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ УДАРНЫХ И ВЗРЫВНЫХ НАГРУЗКАХ. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

**М.Ю. Орлов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
E-mail: orloff\_m@mail.ru

**Аннотация.** Представлены результаты комплексных теоретико-экспериментальных исследований процессов динамического нагружения твердых тел. Разработан пользовательский многофункциональный комплекс для решения многоконтактных задач механики деформируемого твердого тела и показана перспективность решения некоторых задач. Представлены результаты оригинальных экспериментов по пробитию однородных и многослойных преград. Перечислены некоторые «активные» направления исследования лаборатории 21 Прочности НИИ ПММ ТГУ для привлечения студентов технических специальностей.

**Ключевые слова:** взрыв, удар, модель, расчет, эксперимент, материал, расчет, деформирование, разрушение, пробитие, скорость

## STUDY OF BEHAVIOR OF SOLIDS AT SHOCK AND EXPLOSIVE LOAD. DEVELOPMENT PROSPECTS

**M.Yu. Orlov**

National research Tomsk State University  
E-mail: orloff\_m@mail.ru

**Abstract.** The results of complex theoretical and experimental studies of the processes of dynamic loading of solids are presented. The possibilities of original computer programs for calculating the process of penetration of heterogeneous materials and structures have been demonstrated. The results of original experiments on the penetration of homogeneous and multilayered barriers are presented. New research tasks were announced.

**Keywords:** explosion, impact, model, calculation, experiment, material, calculation, deformation, destruction, penetration, velocity.

В настоящее время актуальным является изучение поведения материалов при динамических нагрузках. Это объясняется широкими практическими приложениями, в том числе созданием средств поражения и защит, необходимостью добыче полезных ископаемых, созданием защитных конструкций от метеоритов и частиц космического мусора, сваркой взрывом, и т.д. Научные исследования проводятся в ведущих научных центрах планеты, и наша страна не является исключением. Актуальны новые физико-математические модели и методы расчетов быстропротекающих процессов для исследования поведения твердых тел в труднодоступной для эксперимента области начальных условий. Автор считает, что возникла необходи-

мость создания единых баз данных о поведении некоторых природных материалов при взрывных нагрузках (например, речной лед).

В лаборатории Прочности (21) НИИ прикладной математики и механики ведутся поисковые научные исследования, объектами исследования в которых выступают пресноводный лед, природный известняк (осадочная органогенная горная порода), ряд технологических и конструкционных материалов (низкоуглеродистая и высокопрочная сталь, ВНЖ, алюминий, бериллий, медь и т.д.), а также функционально-градиентные материалы. Для исследования процессов, протекающих в твердых телах при высокоскоростном деформировании, специально разработана физико-математическая модель и модифицирован численный метод расчета, основанный на лагранжевом методе Джонсона Г.Р. Разработан пользовательский программный комплекс для решения динамических многоконтактных задач Механики деформируемого твердого тела (совместно с В.П. Глазыриным и Ю.Н. Орловым) [1].

Последней инновацией следует считать, организованную на базе 20 отдела НИИ прикладной математики и механики мобильную лабораторию «Взрывное разрушение природных материалов». Совместно с ООО «КузбасСпецВзрыв» и МЧС по ТО изучено поведение природных известняка и речного льда средней толщины. Вначале исследовательские возможности лаборатории ограничивались проведением качественных тестов. Например, установлена только форма взрывного кратера при подрыве различного типа взрывчатки (аммонит, гранулит, Эмуласт и взрывная смесь на основе этих компонент). В последние годы стало возможным проводить количественные тесты. Все измерения осуществляются сертифицированным измерительным инструментом прямым (непосредственным) методом. Например, исследовано поведения речного льда при подрыве ВВ в воде подо льдом. Установлена форма взрывного кратера, состояние кромки льда, диаметр и высота разлета осколков, а также морфология льда (размеры осколков и т.д.). По состоянию на начало 2018 года лаборатория имеет статус инициативного проекта [2].

В течение прошлого года сотрудники лаборатории «плотно» работали с ТРОО «Ассоциация практической стрельбы» [3]. Совместными усилиями исследовано поведение некоторых материалов при взаимодействии с ударниками с оживальной головной частью в диапазоне начальных скоростей до 500 м/с. Детально изучено состояние речного льда, оргстекла, стали (Ст. 3) при высокоскоростном ударе. Предметом исследования являлось состояние взаимодействующих тел после удара, а именно: укорочение ударника (если таковое имело место), диаметр и кромка отверстия в преградах (в случае сквозного пробития), наличие радиальных и кольцевых трещин с лицевой и тыльной стороны. Для численного моделирования интерес представляет информация о запреградной скорости ударника и ско-

рости некоторых лидирующих осколков (это фиксируется при помощи высокоскоростной цифровой съемки).

Приглашаются студенты технических специальностей для написания дипломных работ и прохождения преддипломной практики в лаборатории Прочности (21) с возможностью дальнейшего трудоустройства в РФЯЦ-ВНИИ ТФ (Снежинск). Не исключена возможность участия в Международных и Всероссийских научных конференциях.

### Литература

1. Высокоскоростной удар. Моделирование и эксперимент / под ред. А.В. Герасимова. Томск: Изд-во НТЛ, 2017. 568 с.
2. Официальный канал мобильной лаборатории «Взрывное разрушение природных материалов». [Электронный ресурс] <https://www.youtube.com/channel/UCZmjsHmSIBRr17kwUrWzP7g>
3. Официальный сайт ТРОО «Ассоциация практической стрельбы». [Электронный ресурс] <http://strelok.tomsk.ru/>

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИКИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ МОДЕЛЬНОГО ГПВРД ПРИ ОБТЕКАНИИ СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ

**Н.В. Савкина, В.В. Фарапонов, Е.А. Маслов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
E-mail: savkina@ftf.tsu.ru

**Аннотация.** Рассматривается исследование газодинамики потока в проточном тракте модели ГПВРД, проводится сравнение результатов физического и математического моделирования обтекания модели сверхзвуковым потоком. Исследование аэродинамических процессов при обтекании такого сложного, с геометрической точки зрения, тела считается целесообразным начать с изучения процесса обтекания моделей более простой геометрической формы. Алгоритм данной работы предусматривает решение аэродинамической задачи в плоской и осесимметричной постановке с телами различной формы и сложности. Экспериментальная часть работы была проведена в специализированной аэродинамической трубе. Оценивается достоверность полученных данных.

**Ключевые слова:** математическое моделирование; ГПВРД; газодинамика; визуализация; эксперимент

# EXPERIMENTAL-THEORETICAL INVESTIGATION OF THE GAS DYNAMICS OF THE FLOW PART OF THE MODEL HRABE IN SUPERSONIC FLOW

N. Savkina, V. Faraponov and E. Maslov

National research Tomsk State University  
E-mail: savkina@ftf.tsu.ru

**Abstract.** The paper examines the gas dynamics of the flow along the air flow duct of the HRABE model, comparison of the physical and mathematical results modeling of the flow around the model by a supersonic flow. The study of aerodynamic processes in the flow around such a complex, from a geometric point of view, body is considered expedient to begin with a study of the flow of models of a more simple geometric shape. The algorithm of this work provides for solving the aerodynamic problem in a plane and axisymmetric setting with bodies of various shapes and complexity. The experimental part of the work was carried out in a specialized wind tunnel. The reliability of the received data is estimated.

**Keywords:** mathematical modeling; HRABE; gas dynamics; visualization; experiment.

Современные исследовательские интересы требуют синергетического развития междисциплинарных отраслей науки. Не остается в стороне и интерес аэродинамического исследования, включающий в себя, например, нахождение эмпирических констант для верного описания физических процессов в таких прикладных областях как теплоэнергетика, авиа и судостроение.

Целью данной работы поставлено изучение и применение аэродинамического эксперимента в условиях натурного (физического) моделирования обтекания гиперзвуковым потоком прямогочного воздушно-реактивного двигателя (ГПВРД) с использованием импульсной аэродинамической установки. Однако в результате этих исследований получено лишь ограниченное количество значение параметров в определенных точках по потоку. Для получения полной картины изменения параметров было использовано численное моделирование задачи обтекания ГПВРД в плоской и пространственной постановках.

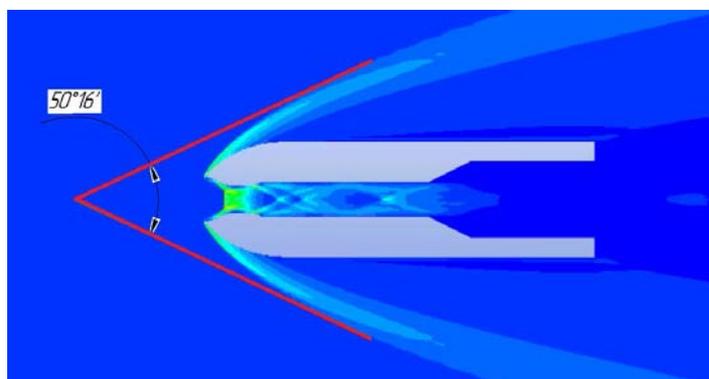


Рис. 1. Изополе распределение плотности в расчетной области

По результатам проведенного физического моделирования определено, что безразмерное число Маха потока, измеренное сразу за критическим сечением в проточном тракте ГПВРД осесимметричного исполнения, равняется  $M=1.87\pm 0.022$ . Проведены сравнительные оценки результатов физического и математического моделирования в виде графической зависимости распределения безразмерного числа Маха по проточной части ГПВРД (рис. 1). По данным математического и физического эксперимента показано, что полученное значение безразмерного числа Маха, для точки за критическим сечением осесимметричной модели ГПВРД, согласуется с относительной погрешностью  $DM=9\%$  (рис. 2). В результате визуализации процесса физического моделирования, в условиях гиперзвукового обтекания прямого двигателя, показано, что течение потока по проточному тракту модели двигателя происходит с набором косых скачков уплотнения.

Важнейшей целью моделирования гиперзвукового обтекания модели данного типа является получение численных значений параметров потока по сечениям внутренней проточной части, так как натурным экспериментом получение адекватных полей температур и скоростей не представляется возможным или является трудно выполнимым. Ввиду того, что картина течения проточного тракта ГПВРД и результаты (значение числа Маха за критическим сечением) численного и экспериментального исследования показали приемлемую точность, что дает возможность провести оценку параметров, которые не были получены в эксперименте.

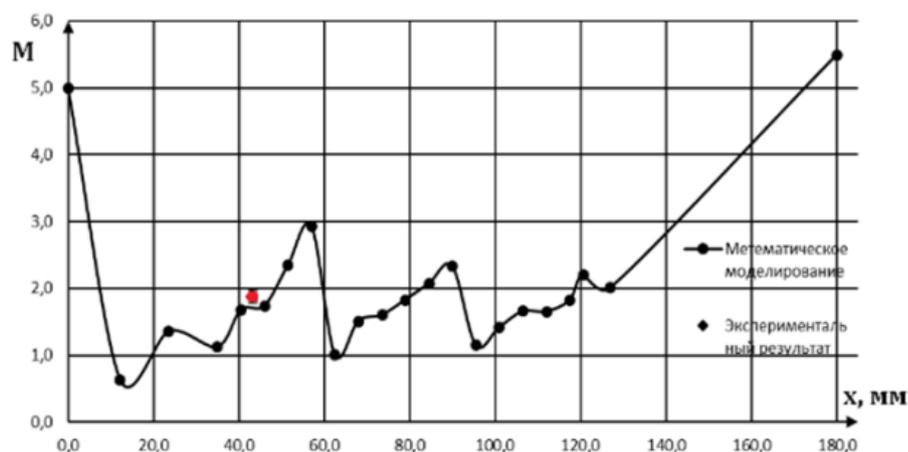


Рис. 2. Сравнение результата математического (●) и физического моделирования (◆) распределения числа Маха по проточному тракту ГПВРД

Одним из них является температура потока в проточном тракте ГПВРД. Распределение температуры на оси симметрии, расположенной за критическим сечением в проточном тракте осесимметричной модели ГПВРД было получено при помощи математического моделирования. Среднее значение, которого может достигать 1300 К.

## Литература

1. *Maslov E.A., Klochikhin V.V., Zharova I.K.* Experimental research of supersonic flow around simulating rocket-ramjet // MATEC Web of Conferences 23.01026 (2015).
2. *Maslov E.A., Faraponov V.V., Zolotorev N.N., Chupashev A.V., Matskevich V.V., Chizhov S.Yu.* // MATEC Web of Conferences 92. 01056 (2017).
3. *Козлов Е.А., Жарова И.К., Маслов Е.А., Фарапонов В.В., Савкина Н.В.* Структура течения при обтекании осесимметричных тел с локальным вдувом // Материалы XX Юбилейной Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным системам (ВМСППС'2017) 2017. С. 469-470.
4. *Снегирев А.Ю.* Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 143 с.
5. *Звегинцев В.И.* Газодинамические установки кратковременного действия. Ч. 1: Установки для научных исследований. Новосибирск: Параллель, 2014. 551 с.

Секция 1  
**ВЗРЫВНЫЕ, ДЕТОНАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ  
И СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА  
ПРИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

---

---

Session 1  
**EXPLOSION AND DETONATION PROCESSES  
AND PROPERTIES OF MATTER UNDER HIGH  
ENERGY IMPACTS)**

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ  
ГИПЕРСКОРОСТНОГО ПОТОКА ЧАСТИЦ ПРИ ВЗРЫВНОМ  
ОБЖАТИИ ТРУБКИ ИЗ КОРУНДА**

**М.В. Гаврилов, А.М. Арсанов**

Новосибирский государственный технический университет, Россия  
E-mail: snuuybreeze@list.ru

**Аннотация.** Численно исследованы особенности обжатия керамических (корундовых) трубок продуктами детонации взрывчатых веществ. Изучен процесс формирования кумулятивного потока керамических частиц. Анализ процесса демонстрирует особенности формирования дискретной кумулятивной струи, максимальная скорость лидирующей части которой близка к 23 км/с, скорость основной части около 14 км/с.

**Ключевые слова:** Взрывчатое вещество, детонация, кумуляция, керамические трубки

**NUMERICAL SIMULATION OF THE PROCESS OF FORMING THE  
HYPER-SPEED STREAM OF PARTICLES IN THE EXPLOSIVE  
COMBINATION OF A TUBE FROM CORUND**

**M. Gavrilov and A. Arsanov**

Novosibirsk State Technical University, Russian Federation  
E-mail: snuuybreeze@list.ru

**Abstract.** The features of compression of ceramic (corundum) tubes by detonation products of explosives are numerically investigated. The process of forming a cumulative flow of ceramic particles has been studied. The analysis of the process demonstrates the features of the formation of a discrete cumulative jet, the maximum speed of the leading part of which is close to 23 km / s, the speed of the main part is about 14 km / s.

**Keywords:** Explosive, detonation, cumulation, ceramic tubes.

Устройства для гиперзвукового ускорения ударников широко используются при исследовании и разработке противометеоритной защиты космических аппаратов. Как правило, принцип работы этих устройств основан на явлении кумуляции. По-видимому, первой публикацией, посвященной исследованию возможностей получения гиперзвуковых кумулятивных струй на основе явления кумуляции была работа [1], в которой использовались кумулятивные облицовки из бериллия. Одним из видов кумулятивных ускорителей является газокумулятивный ускоритель, описанный в работе [2]. В этом случае заряд взрывчатого вещества представляет собой трубку, внутри которой в процессе детонации формируется кумулятивная струя продуктов детонации, распространяющаяся внутри трубки со скоростью, существенно превышающей скорость детонации. Струя может ускорить тело (обычно шар) до скоростей нижнего космического диапазона 8...14 км/с.

Для повышения скорости кумулятивной струи возможно формирование кумулятивных струй из цилиндрических облицовок (трубок) [3, 4]. Поскольку для цилиндрической кумулятивной облицовки скорость точки соударения равна скорости детонации  $D$  в заряде  $ВВ$ , то необходимое условие для формирования струй из цилиндрических облицовок

Таким образом, для формирования струй из цилиндрических облицовок в качестве их материала могут быть использованы высокомодульные керамики, имеющие скорость звука, превышающую скорость детонации  $ВВ$ .

В данной работе методом численного моделирования исследованы особенности процесса формирования гиперскоростного потока частиц при взрывном обжати трубки из корунда. Для численного моделирования использовалось лицензионное программное обеспечение ANSYS AUTODYN x 64 v 17.2 (+ Beta Options) Double Precision [5].

На первом этапе, с целью правильного воспроизведения физических процессов, происходящих при взрывном обжати керамической трубки, проводилась верификация расчётных параметров. Эта операция была выполнена путём сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными, описанными в работах [6, 7]. На основании сравнительного анализа были выбраны параметры определяющих соотношений для описания поведения керамики при взрывном обжати, показавшие хорошее соответствие при расчёте скорости струи и скорости проникания струи в воду. Параметры ударной адиабаты для корунда были взяты из справочника под ред. Р.Ф. Трунина [8] для давлений до 300 ГПа.

Моделирование проводилось в двумерной осесимметричной постановке на неподвижной эйлеровой сетке. Нижняя граница расчётной области являлась осью симметрии. Пространственное разрешение составляло 20 ячеек сетки на 1 мм. Инициирование детонации осуществлялось с левого торца заряда  $ВВ$ . Геометрия сборки в начальном состоянии представлена на рис. 1. Давление в точке контакта на стационарной стадии составляет

~ 0.9–1.0 Мбар, максимальная скорость лидирующей части струи  
~ 23 км/с, скорость основной струи равна 14 км/с.

Работа поддержана грантом РФФИ (проект No. 14-08-00068).

## **ЗАВИСИМОСТЬ КРИТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ ИНИЦИИРОВАНИЯ ВЗРЫВЧАТОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ТАБЛЕТОК ПЕНТАЭРИТРИТТЕТРАНИТРАТА ОТ РАДИУСА ВКЛЮЧЕНИЙ НАНОЧАСТИЦ НИКЕЛЯ**

**Н.В. Газенаур<sup>1</sup>, М.В. Ананьева<sup>1</sup>, А.А. Звекон<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Кемеровский государственный университет, Россия

<sup>2</sup>Институт углехимии и химического материаловедения Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН, Россия

E-mail: kriger@kemsu.ru

**Аннотация.** В работе экспериментально исследованы кинетические закономерности и получены вероятностные кривые взрывчатого разложения прессованных таблеток PETN (пентаэритриттетранитрата), содержащих наночастицы никеля различного радиуса, при инициировании их импульсом неодимового лазера с длиной волны 1064 нм и длительностью на полувысоте – 14 нс. Экспериментальные значения критической плотности энергии инициирования, соответствующие 50% вероятности взрыва, составили 0.9, 0.7 и 1.4 Дж/см<sup>2</sup> при значениях радиусов наночастиц никеля 67, 78 и 138 нм. Начальный участок увеличения интенсивности свечения, сопровождающего взрывчатое разложение, начинается во время действия импульса и хорошо описывается функцией Гаусса с дисперсией  $5 \cdot 10^{-9}$  с, не зависящей от радиуса наночастиц. Экспериментальные результаты интерпретированы в рамках микроочаговой модели теплового взрыва с учетом зависимости коэффициента эффективности поглощения от радиуса наночастиц.

**Ключевые слова:** лазерное инициирование, взрывчатое разложение, энергетические материалы, пентаэритриттетранитрат, наночастицы никеля, математическое моделирование

## **THE DEPENDENCE OF THE CRITICAL DENSITY OF INITIATION ENERGY OF EXPLOSIVE DECOMPOSITION OF PENT AERYTHRITOL TETRANITRATE TABLETS ON THE RADIUS OF THE INCLUSIONS OF NANOPARTICLES OF NICKEL**

**N. Gazenaur<sup>1</sup>, M. Anan'eva<sup>1</sup>, A. Zvekov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Kemerovo State University, Russia

<sup>2</sup>Institute of Coal Chemistry and Material Science of Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry SB RAS, Russia

E-mail:kriger@kemsu.ru

**Abstract.** The kinetics of the PETN (pentaerythritol tetranitrate) containing nickel nanoparticles with different radii explosion initiated with neodymium laser pulses (wavelength

1064 nm, pulse duration FWHM 14 ns) were experimentally studied. The explosion probability curves as well as critical energy density values at the probability level 50% were determined. The values of critical energy density were obtained to be 0.9, 0.7 and 1.4 J/cm<sup>2</sup> for the average radii of nanoparticles of Nickel 67, 78, and 138 nm nanoparticles' correspondingly. The initial part of the glow kinetics accompanying the explosive decomposition begins during the pulse and is described by a Gaussian function with dispersion  $5 \cdot 10^{-9}$  s., which is independent on the radius of the nanoparticles. The experimental results can be interpreted in the context of the hot-spot model of thermal explosion that takes into account absorption efficiency of nanoparticles.

**Keywords:** laser initiation, explosive decomposition, energetic materials, pentaerythritoltetranitrate, nickel nanoparticles, Math modeling

Использование оптических детонаторов является одним из наиболее перспективных способов повышения безопасности взрывных работ в горной промышленности. Для наивысшего эффекта необходимо использовать селективно-чувствительные к лазерному воздействию материалы, имеющие относительно высокие пороги инициирования другими видами воздействия. Для разработки таких энергетических материалов синтезируются как принципиально новые взрывчатые вещества, так и модифицируются уже существующие и давно используемые на практике. В работах лаборатории Б.П. Адуева экспериментально определены значения порогов инициирования взрывчатого разложения пентаэритриттетранитрата (PETN) с добавками наночастиц алюминия. Показано, что полученные материалы проявляют чувствительность к лазерному воздействию на уровне 0.5 Дж/см<sup>2</sup>, что на два порядка меньше по сравнению с чистыми прессованными таблетками PETN, имеющими критическую плотность энергии инициирования не менее 100 Дж/см<sup>2</sup>. Помимо этого, исследовано влияние природы металлов и длины волны излучения на величину порога лазерного инициирования.

Для объяснения закономерностей лазерного инициирования бризантных взрывчатых веществ, содержащих наночастицы металлов, была модернизирована микроочаговая модель сформулированная изначально для интерпретации закономерностей инициирования азидов тяжелых металлов. Одним из наиболее важных следствий модели является экстремальная зависимость критической плотности энергии инициирования от радиуса вводимых наночастиц металла.

В качестве экспериментальных образцов использовались прессованные таблетки PETN с добавками наночастиц никеля с концентрацией 0.1% по массе. Для приготовления экспериментальных образцов использовались порошки никеля, полученные в результате проведения синтеза в трех отличающихся условиях. Наночастицы имели форму близкую к сферической, радиусы наночастиц (R) в максимуме распределения составляли 67, 78 и 138 нм.

Для определения критической плотности энергии инициирования взрыва проводились испытания при фиксированных значениях плотности энер-

гии лазерного импульса, и определялась вероятность взрыва. Затем строилась зависимость вероятности взрыва от плотности энергии импульса, аппроксимировалась функциональным выражением. Критической плотности энергии соответствовала 50% вероятность взрыва.

Из полученных данных следует, что критическая плотность энергии инициирования минимальна для прессованных таблеток PETN с наночастицами никеля радиуса 78 нм. Для наночастиц большего (138 нм) и меньшего (67 нм) радиуса значения критической плотности энергии больше в 2 и 1.3 раза соответственно, чем для наночастиц с радиусом 78 нм. Исследовалась кинетика процесса по свечению, фиксируемому из зоны облучения таблетки PETN.

Измерены кинетические зависимости свечения, сопровождающего взрывчатое разложение, которое наблюдается при облучении прессованных таблеток PETN-никель с плотностью энергии большей критической. Взрыв сопровождается громким звуком и полным выносом энергетического материала, запрессованного в медную пластину. На начальном участке увеличение интенсивности свечения, которое фиксируется ФЭУ зонного и панорамного обзора, описывается функцией Гаусса с дисперсией 5·нс.

Кинетика свечения, фиксируемого из зоны воздействия, становится биэкстремальной, причем первый максимум практически совпадает с максимумом интенсивности воздействия, а второй представляет собой длинное плато протяженностью до 700 нс и спадом в течение 200 нс. Максимум свечения, фиксируемого со всей ячейки, наблюдается раньше максимума интенсивности импульса. Особенностью кинетических закономерностей взрывчатого разложения прессованных таблеток тэн-никель является отсутствие индукционного периода (как промежутка времени между окончанием импульса и началом интенсивного процесса разложения). Свечение начинается сразу (аналогично радиолюминесценции). Отсутствие индукционного периода может стать отличительной характеристикой теплового и цепного взрыва, где после окончания импульса наблюдается выраженный индукционный период.

Таким образом, можно сделать вывод, что измеренные значения критической плотности энергии лазерного инициирования зависят от среднего радиуса наночастиц никеля, вводимых в состав взрывчатого вещества. Зависимость достаточно выраженная: изменение радиуса менее чем в два раза приводит к возрастанию критической плотности энергии на 30-100%, что значительно превышает возможную ошибку определения критической плотности энергии.

Зависимость критической плотности энергии от радиуса наночастиц имеет минимум, формирование которого связано, в основном, с изменением оптических свойств наночастиц при возрастании их радиуса. Теоретические расчеты правильно воспроизводят тенденцию и область проявления эффекта. Поэтому наблюдаемую корреляцию можно рассматривать как

сильный аргумент в пользу применимости микроочаговой модели теплового взрыва к описанию закономерностей лазерного инициирования прессованных таблеток.

В то же время можно выделить два фактора, которые свидетельствуют о необходимости дальнейшего развития модели: различие абсолютных экспериментальных и теоретических значений критической плотности энергии и недостаточная выраженность влияния радиуса наночастиц, прогнозируемая теорией, по сравнению с экспериментом.

Отличие абсолютных значений критической плотности энергии может быть связано с недостаточно подробными представлениями о механизме реакции разложения, используемыми в модели. При повышении температуры влияние потенциального барьера заторможенного вращения уменьшается, и энтропия активации начинает также уменьшаться. В силу данных соображений можно ожидать уменьшения предэкспоненциального множителя при увеличении температуры для реакций радикального отщепления, к которым относится первичная стадия разложения тэна. Другим аспектом, приводящим к уменьшению эффективной константы скорости, является многостадийность механизма реакции взрывчатого разложения. При росте температуры может происходить смена лимитирующей стадии процесса и изменение эффективных аррениусовских параметров реакции.

Физической причиной увеличения критической плотности энергии инициирования прессованных таблеток может являться частичное разрушение образца под действием лазерного импульса. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (№ 18-03-00421\_А) и Министерства образования и науки РФ (НИР № 3.5363.2017/8.9).

## **ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИНИЦИИРОВАНИЯ ВЗРЫВНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ АЗИДА СЕРЕБРА И ПРЕССОВАННЫХ ТАБЛЕТОК ТЕТРАНИТРАТ ПЕНТАЭРИТРИТА- НАНОЧАСТИЦЫ МЕТАЛЛОВ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

**А.А. Звекон, А.В. Каленский, Д.Р. Нурмухаметов**

Институт углекислоты и химического материаловедения Федерального  
исследовательского центра угля и углекислоты СО РАН, Россия  
E-mail: zvekova@gmail.com

**Аннотация.** Одним из способов повышения безопасности взрывных работ в добывающей промышленности и ряде специальных приложений является переход к использованию оптических детонаторов. Цель работы заключалась в теоретическом и экспериментальном исследовании закономерностей инициирования импульсным лазерным излучением цепного и теплового в микроочаговом варианте взрывов кристаллов азидов серебра и прессованных таблеток тетранитрата пентаэритрита (PETN) сенсibiliziro-

ванных наночастицами металлов. Выполнено уточнение модели твердофазной цепной реакции с оценкой констант скоростей стадий дезактивации возбужденных продуктов разложения. Результаты расчетов по модели согласуются с экспериментальной кинетикой взрывного свечения кристаллов азида серебра. Микроочаговая модель лазерного инициирования теплового взрыва дополнена процессами плавления и учетом индивидуальных оптических свойств наночастиц и прессованного композита пентаэритрит-тетранитрат-наночастицы металлов. Показано, что наблюдающееся экспериментально отсутствие измеряемого индукционного периода взрыва при инициировании лазерным излучением коррелирует с результатами расчета по модели. Предложена и апробирована методика оптимизации состава капсуля оптического детонатора, заключающаяся в предварительной оценке оптимального радиуса наночастиц металлов, обеспечивающего в рамках предложенной модели наименьшую критическую плотность энергии.

**Ключевые слова:** пентаэритрит тетранитрат, азид серебра, наночастицы металлов, микроочаговая модель теплового взрыва, твердофазные цепные реакции

## THE FEATURES OF SILVER AZIDE CRYSTALS AND PENTAERYTHRITOL TETRANITRATE – METAL NANOPARTICLES PRESSED PELLETS' EXPLOSION INITIATION WITH LASER PULSE IRRADIATION

A. Zvekov, A. Kalenskii and D. Nurmuhametov

Institute of Coal Chemistry and Material Science at the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry SB RAS, Russian Federation  
E-mail: zvekova@gmail.com

**Abstract.** Utilization of optic detonators is considered now as a prospective way to the safety increasing in industry and some special applications. The aim of the present work was to study theoretically and experimentally the features of the chain and micro-hot spot thermal explosion initiation with laser pulses on the examples of silver azide crystals and pentaerythritol tetranitrate – metal nanoparticles' composites. In order to clarify the model of chain branching, the deactivation of excited reaction products was studied and the corresponding rate constants were estimated. The calculation results in terms of the refined model agree with the experimental kinetics of the silver azide explosion glow. The micro hot-spot model of thermal explosion initiation with laser pulse irradiation was expanded with processes of materials' melting and optic properties of the individual nanoparticles as well as the whole pentaerythritol tetranitrate – metal nanoparticles' composite. The absence of the experimental explosion time delay correlates with the calculation results in terms of the hot-spot model. An approach of the explosive for optic detonator optimization was suggested that is concerned on the optimal nanoparticles' radius determination providing minimum critical energy density in terms of the model.

**Keywords:** pentaerythritol tetranitrate, silver azide, metal nanoparticles, micro hot-spot model, solid state chain reactions

Исследование процессов взрывного разложения энергетических материалов продолжается более чем сто лет, отлажена технология производства инициирующих и бризантных взрывчатых веществ. Поскольку проблема качественного повышения безопасности хранения, транспортировки и

использования взрывчатых веществ не решена, продолжаются работы по созданию и исследованию новых и модернизации существующих взрывчатых веществ. Одним из способов повышения безопасности взрывных работ в добывающей промышленности и ряде специальных приложений является переход к использованию оптических детонаторов. Поэтому создание энергетических материалов селективно чувствительных к лазерному излучению с целью получения капсульных составов для оптических детонаторов продолжается уже около двух десятилетий.

Для инициирования взрывного разложения необходимо наличие механизмов сильной положительной обратной связи: увеличение температуры или лавинообразное увеличение неравновесной концентрации реагентов, которые приводили бы к экспоненциальному росту скорости реакции. Во втором случае энергия, выделяющаяся в элементарном акте реакции, частично расходуется на образование активных частиц, что может приводить к развитию реакции по цепному механизму. Большинство теоретических работ в данной области концентрируются на одном из аспектов общего сложного процесса (перенос излучения в образце, поглощение излучения, образование очагов реакции и кинетика ее развития, разлет продуктов взрыва и др.), что позволяет интерпретировать лишь часть экспериментальных данных.

Цель работы: теоретическое и экспериментальное исследование закономерностей инициирования импульсным лазерным излучением цепного и теплового в микроочаговом варианте взрывов кристаллов азида серебра и прессованных таблеток тетранитрата пентаэритрита (PETN) сенсibilизированных наночастицами металлов, уточнение механизмов процессов и оптимизация составов капсулей оптических детонаторов.

Для уточнения стадии разветвления твердофазной цепной реакции рассмотрены процессы дезактивации электронно- и колебательно-возбужденных молекул азота – продуктов твердофазной цепной реакции – в матрице азида серебра и оценены константы скоростей соответствующих стадий. Показано, что при концентрациях электронных возбуждений характерных в условиях лазерного инициирования преобладает генерация электронно-дырочных пар при дезактивации продуктов разложения. Результаты расчетов в рамках бимолекулярной модели твердофазной цепной реакции с уточненным механизмом разветвления цепи согласуются с наблюдаемой кинетикой взрывного свечения кристаллов азида серебра иницированных импульсным лазерным излучением.

Выполнен анализ «базового» варианта микроочаговой модели лазерного инициирования теплового взрыва. Показано, что температура очага взрывного разложения, при достижении которой происходит переход реакции в самоускоряющийся режим в рамках базовой микроочаговой модели иницирования, слабо зависит от теплоемкости металлической наночастицы. В рамках модели получено аналитическое выражение для зависимости

критической плотности энергии от длительности импульса, радиуса и теплоемкости наночастиц.

Проведена модернизация микроочаговой модели лазерного инициирования теплового взрыва, в которую были включены процессы плавления взрывчатого вещества и металлической наночастицы. Показано, что процессы плавления приводят к уменьшению максимальной температуры нагрева и уменьшению радиуса наиболее прогретой наночастицы, толщина проплавленного слоя матрицы увеличивается при росте плотности энергии импульса и уменьшении его длительности, стремясь к постоянному значению в пределе малых длительностей импульса. Показано, что плавление приводит к увеличению критического значения плотности энергии инициирования взрывного разложения. В случае наночастиц большого радиуса формирование очага реакции происходит до полного расплавления наночастицы, что приводит к увеличению индукционного периода реакции.

Проведены расчеты спектральных зависимостей факторов эффективности экстинкции и поглощения света наночастицами серебра, золота, алюминия, никеля и меди в матрице PETN. В случае благородных металлов наблюдаются узкие плазмонные полосы для наночастиц с радиусами менее 50 нм, тогда как для наночастиц никеля и алюминия типичны широкие полосы на спектральных зависимостях факторов эффективности ослабления и поглощения. Показано, что зависимость критической плотности энергии лазерного инициирования от длины волны лазерного излучения и природы металла определяется, в основном, оптическими свойствами индивидуальных наночастиц.

В рамках микроочаговой модели теплового взрыва рассчитаны зависимости критической плотности энергии инициирования взрывного разложения азида свинца и радиуса наиболее прогретой наночастицы от длительности импульса излучения первой гармоники неодимового лазера. Показано, что в случае непрерывного распределения наночастиц по радиусам учет зависимости фактора эффективности поглощения лазерного излучения от радиуса наночастицы приводит к стремлению критической плотности энергии к постоянной величине в случае стремящейся к нулю длительности импульса.

Разработана методика и создан комплекс прикладных программ для численного решения уравнения переноса излучения с Френелевскими граничными условиями. Показано, что эффект многократного рассеяния приводит к изменению освещенности в образце, профиля поглощения излучения и энергии, поглощаемой наночастицами. Проведена верификация модели переноса излучения при измерении оптических свойств композитов PETN – наночастицы алюминия. Сформулирован способ определения оптических свойств наночастиц в прозрачной матрице на основе решения обратной задачи переноса излучения в образце.

С высоким временным разрешением исследованы кинетические закономерности взрывного разложения прессованных таблеток PETN с добавками наночастиц алюминия и кобальта при лазерном импульсном возбуждении. Показано, что свечение, сопровождающее взрывное разложение, начинается во время действия импульса. Сформулирован экспериментальный критерий, позволяющий различать механизмы цепного и теплового в микроочаговом варианте инициирования взрыва импульсным лазерным излучением: отсутствие индукционного периода и выраженное проявление допороговых эффектов является следствием развития теплового взрыва, а наличие индукционного периода и отсутствие допороговых эффектов – цепного взрыва.

Предложена и апробирована на примере композитов PETN-наночастицы никеля методика оптимизации состава капсуля оптического детонатора на основе импульсного источника, заключающаяся в предварительной оценке оптимального радиуса наночастиц металлов, обеспечивающего в рамках предложенной модели наименьшую критическую плотность энергии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-33-00510 мол\_а) и госзадания ФАНО России (тема V.49.1.5).

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЗАТУХАНИЯ ДЕТОНАЦИИ В ЗАРЯДАХ МАЛОГО ДИАМЕТРА**

**О.А. Зимоглядова**

Новосибирский государственный технический университет, Россия  
E-mail: zimogldv@rambler.ru

**Аннотация.** Современные представления о стационарной детонации взрывчатых веществ (ВВ) основываются на гидродинамической модели Михельсона – Чепмена – Жуге (МЧГ) и её развитии – модели Зельдовича – Неймана – Дёринга (ЗНД). Принципиальными в данных моделях являются гипотезы о стационарности процессов и о плоском фронте детонационной волны. В лабораторных условиях при экспериментальном исследовании особенностей протекания детонационных явлений зачастую используются заряды ВВ относительно малых размеров, в которых эти гипотезы могут нарушаться. Для моделирования используется пакет ANSYS AUTODYN 17.0. Предполагается, что инициирование детонации осуществляется ударом алюминиевой пластинки со скоростью 2 км/с, что обеспечивает формирование в начальный момент плоского детонационного фронта и режима пересжатой детонации. В работе моделируется: 1) динамика выхода детонационного процесса на стационарный режим, характеризующийся постоянной скоростью детонации и неизменной кривизной детонационного фронта; 2) заряды малых взрывчатых веществ при котором происходит затухание детонационной волны.

**Ключевые слова:** Взрывчатые вещества, моделирование, детонация, кривизна фронта, затухание.

# NUMERICAL SIMULATION OF PHYSICAL PROCESS OF DETONATION SENSATION IN CHARGES OF SMALL DIAMETER

**O. Zimoglyadova**

Novosibirsk State Technical University, Russian Federation

E-mail: zimogldv@rambler.ru

**Abstract.** Modern ideas about the stationary detonation of explosives are based on the hydrodynamic Michelson-Chapman-Jouguet model (MCH) and its development-the Zel'dovich-Neumann-During model (ZDN). The principal models in these models are the hypotheses of stationarity of processes and the flat front of the detonation wave. In laboratory conditions, in the experimental study of the peculiarities of the course of detonation phenomena, explosive charges of relatively small sizes are frequently used, in which these hypotheses can be violated. ANSYS AUTODYN 17.0 is used for modeling. It is assumed that the initiation of detonation is carried out by impact of an aluminum plate at a speed of 2 km / s, which ensures the formation at the initial moment of a flat detonation front and an overtaken detonation regime. The work models: 1) the dynamics of the detonation process output to the stationary mode, characterized by a constant detonation velocity and constant curvature of the detonation front; 2) charges of small explosives at which the detonation wave decays.

**Keywords:** Explosives, modeling, detonation, front curvature, attenuation.

В работе численно моделируется процесс детонации цилиндрических зарядов взрывчатого вещества ТГ 50/50 малого диаметра с различной длиной. Предполагается, что инициирование зарядов осуществляется метанием алюминиевой пластинки со скоростью 2 км/с, аналогично возбуждению детонации генератором плоской волны. Следовательно обеспечивается участок режима пересжатой детонации и формирование плоского детонационного фронта в начальный момент времени. Для исследования применен программный пакет ANSYS AUTODYN 17.2. Моделируется процесс выхода детонационной волны на стационарный режим, формирование устойчивой формы фронта детонации, определяется критический диаметр зарядов, при котором происходит затухание детонационного процесса.

Современные представления о стационарной детонации взрывчатых веществ (ВВ) основываются на гидродинамической модели Михельсона – Чепмена – Жуге (МЧГ) и её развитии – модели Зельдовича – Неймана – Дёринга (ЗНД) [1]. Принципиальными в данных моделях являются гипотезы о стационарности процессов и о плоском фронте детонационной волны.

Интерес к моделированию зарядов малого диаметра вызван тем, что в лабораторных условиях при экспериментальном исследовании особенностей протекания детонационных явлений зачастую используются заряды взрывчатых веществ (ВВ) относительно малых размеров, в которых эти гипотезы могут нарушаться [2]. С помощью численного моделирования, находя оптимальные решения, например в подборе параметров, геометрических свойств, материалов, появляется возможность сокращения натуральных экспериментов, что в свою очередь способствует уменьшению затрат.

С практической точки зрения, при использовании зарядов малого диаметра, становится возможным решение ряда задач: 1) решение вопросов безопасности за счет уменьшения объема ВВ в изделиях военного, промышленного, горнодобывающего назначения; 2) с помощью численного моделирования возможен подбор геометрических характеристик для постановки лабораторных экспериментов на базе оборудования, расположенного в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера, которое в свою очередь имеет в конструкции хрупкое бериллиевое стекло, неспособное выдержать большие нагрузки.

Известен ряд экспериментов [3, с. 148–149] по исследованию затухания детонации для цилиндрических зарядов относительно малого диаметра из смеси тротила и гексогена в половинном соотношении (ТГ 50/50). Были зафиксированы формы фронта с использованием двух методов: 1) скоростной фотосъемки выхода фронта детонации на торец 2) при помощи контактных датчиков. В первом приближении можно считать фронт детонации частью сферы, тогда величину кривизны фронта удобно характеризовать её радиусом, вычисляемым по экспериментальным данным.

С целью интерпретации результатов экспериментов широко используют численное моделирование, которое дает понимание процессов на более глубоком уровне. В качестве взрывчатого вещества использовался CompBUrtie, параметры модели которой были модифицированы близко к экспериментальному ВВ (ТГ 50/50).

Задачей исследования было получить: адекватную модель, результаты которой будут полностью соответствовать экспериментальным данным, по следующим критериям: 1) выход скорости детонации на стационарный режим; 2) эволюция кривизны фронта, 3) диаметры зарядов, при которых происходит срыв детонации.

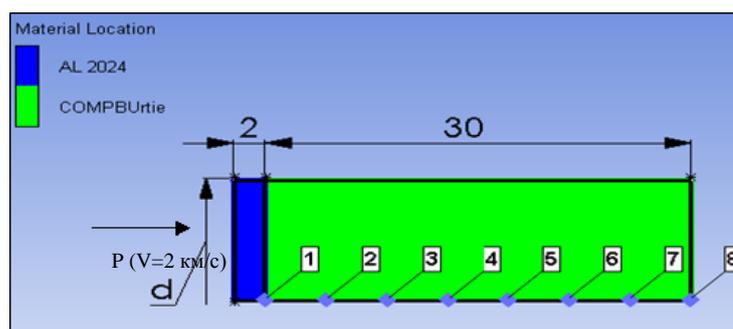


Рис. 1. Геометрическая постановка задачи

На рис. 1 изображена геометрическая постановка задачи. Моделирование выполнялось для цилиндрических зарядов с диаметрами 20 мм, 15 мм, 13 мм; длиной 50 мм. Для расчетов применялся численный метод SPH, для описания поведения ВВ использовались: модель сопротивления материала фон Мизеса и уравнение состояния Ли-Тарвера. Инициирование детонации

осуществляется ударом алюминиевой пластинки со скоростью 2 км/с. На оси зарядов ВВ были расположены датчики (1–8), в которых фиксировалось изменение параметров в зависимости от времени.

На основании проведенной работы сделаны следующие выводы:

- дистанция выхода на стационарный режим согласована с экспериментальными данными;
- форма фронта приближается к стационарному значению, в сравнении с экспериментальными результатами видно, что разница значений радиусов кривизны фронта составляет не более 10 %;
- критический диаметр оказывается существенно больше экспериментального значения, следовательно, модель необходимо корректировать. Так как, при моделировании зарядов до 12.5 мм все результаты отождествлены с экспериментальными.

### Литература

1. *Орленко Л.П.* Физика взрыва. 3-е изд., испр. и доп.: в 2 т. М.: Физматлит, 2004. 1488 с.
2. *Тен К.А., Евдоков О.В., Жогин И.Л. и др.* Распределение плотности во фронте детонации цилиндрических зарядов малого диаметра. Физика горения и взрыва, 2007, т 43, N 2. С. 91–99.
3. *Прууэл Э.Р., Мержиевский Л.А., Лукьянчиков Л.А.* Об измерении кривизны фронта детонации для учета при оценке параметров разлетающихся продуктов // XXII Международная конференция «Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество» п. Эльбрус (Кабардино-Балкарская Республика, Россия), 2007. С. 148–149.
4. *Зимоглядова О.А.* Моделирование детонации зарядов ВВ малого диаметра // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики. Международная молодежная научная конференция, Томск, 16–18 нояб., 2016 г. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2016. С. 17.

## ПРИМЕНЕНИЯ БОМБЫ ПОСТОЯННОГО ОБЪЕМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАКОНА СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ

**В.В. Домбраускас**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: vityaly.1821@mail.ru

**Аннотация.** В докладе рассмотрено применение бомбы постоянного объёма для определения закона скорости горения. На основе применения законов сохранения для внутреннего объема манометрической бомбы предложено выражение, определяющее скорость горения в зависимости от величины и скорости изменения давления. Отработана методика измерения скорости горения твёрдых топлив в манометрической бомбе проводилась на образце с известным законом скорости горения (порох Н). Полученная методика использовалась для определения закона скорости горения модельного СТТ, содержащем порошок алюминия ASD-4. Полученные результаты сравниваются со значениями, полученными при измерении скорости горения в бомбе постоянного давле-

ния и показывается их удовлетворительное согласие между собой. Таким образом, предлагаемый метод определения закона скорости горения при сжигании образца в бомбе постоянного объема может быть рекомендован для быстрого определения закона скорости горения в достаточно широком диапазоне давлений.

**Ключевые слова:** манометрическая бомба, скорость горения, порох, баллистическое топливо, давления.

## THE USE OF A CONSTANT VOLUME BOMB TO DETERMINE THE LAW OF THE RATE OF COMBUSTION

V. Dombrauskas

National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: vitaly.1821@mail.ru

**Abstract.** The paper considers the use of a constant volume bomb to determine the law of the burning rate. Based on the application of conservation laws for the internal volume of a manometric bomb, an expression is proposed that determines the burning rate as a function of the magnitude and rate of change in pressure. The method for measuring the burning rate of solid fuels in a manometric bomb was tested on a sample with a known rate of combustion (gunpowder H). The technique was used to determine the law of the burning rate of a model CTT containing ASD-4 aluminum powder. The results obtained are compared with the values obtained when measuring the burning rate in a constant pressure bomb and show their satisfactory agreement with each other. Thus, the proposed method for determining the law of the burning rate when burning a sample in a constant volume bomb can be recommended for the rapid determination of the law of the burning rate in a sufficiently wide range of pressures.

**Keywords:** Monomeric bomb, burning rate, powder, ballistic fuel, pressures.

Цель доклада: Определить закон скорости горения ТРТ по испытаниям в бомбе постоянного объёма. Для достижения цели были поставлены следующие задачи: 1. Отработка методики измерения скорости горения твёрдых топлив в манометрической бомбе. 2. Проведение испытаний на образце с известным законом скорости горения (порох Н) и на модельном СТТ. В качестве метода определения закона скорости горения образцов СТТ был выбран метод сжигания в бомбе постоянного объема необходимая при проектировании двигателя. Закон скорости горения ТРТ обычно определяется либо в опытах по сжиганию малых образцов топлива в бомбе постоянного давления, либо в модельных двигателях при нескольких относительно постоянных значениях давления. В настоящей работе для определения закона скорости горения предлагается использовать экспериментальную методику измерения давления при постоянном объеме в манометрической бомбе. Отработка методики проводилась на баллиститном топливе типа пороха Н.

Применение манометрической бомбы дает возможность достаточно быстро и надежно определить закон скорости горения в широком диапазоне давлений. Внутренний объем бомбы был выбран равным  $V = 40 \text{ см}^3$ , чтобы

при заданных размерах образца СТТ обеспечить скорость нарастания давления не менее 10 МПа/с и максимальное давление не выше 30 МПа. Измерение давления в бомбе постоянного объема осуществлялось тензOMETрическим датчиком давления ЛХ-412/400 с использованием цифрового усилителя АТ-1-8 и регистрацией выходного сигнала на компьютер. Суммарная погрешность измерения давления не превышала 1%. Воспламенение образца осуществлялось навеской черного пороха ДРП-1 весом 0.1×0.2 г. При весе исследуемого образца более 1 г влиянием продуктов горения воспламенителя на состав газов в бомбе постоянного объема можно пренебречь. Давление в бомбе постоянного объема не превышает 30 МПа, а температура продуктов горения сохраняется близкой к температуре горения образца СТТ, поэтому теплофизические параметры газа можно считать постоянными и равными теплофизическим параметрам продуктов горения образца. Используя законы сохранения для внутреннего объема манометрической бомбы, можно показать, что зависимость скорости горения образца от давления определяется выражением:

Данная формула позволяет определить скорость горения в зависимости от термодинамических параметров топлива и величины и скорости изменения давления в манометрической бомбе. Величины, входящие в уравнение, либо измеряются перед опытом:  $V$ ,  $ST$ ,  $cT$ , либо определяются из термодинамического расчета:  $k$ ,  $HT$  либо измеряются в процессе опыта:  $p$ ,  $dp/dt$ . Величину теплового потока в стенки бомбы  $dQ/dt$ , и, следовательно, величину коэффициента теплоотдачи можно определить экспериментально при сжигании в бомбе топлива с известной зависимостью скорости горения от давления. В качестве такого топлива был выбран порошок Н. Сравнение расчетной и экспериментально измеренной скорости горения позволило определить величину  $dQ/dt$  и, следовательно, величину коэффициента теплоотдачи.

Полученная величина коэффициента теплоотдачи была использована при определении скорости горения для модельного СТТ, содержащего порошок алюминия марки ASD-4. Сравнение экспериментально определенного закона скорости горения с известными результатами, полученными при сжигании образцов в бомбе постоянного давления, показало удовлетворительное совпадение. Таким образом, предлагаемый метод определения закона скорости горения при сжигании образца в бомбе постоянного объема может быть рекомендован для быстрого определения закона скорости горения в достаточно широком диапазоне давлений.

# ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ПРОТОНАМИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОРАЗМЕРНОГО МНОГОСЛОЙНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ Zr/Nb

Д.Г. Кроткевич

Национальный исследовательский Томский Политехнический университет, Россия  
E-mail: dimka.kro@gmail.com

**Аннотация.** Образцы наноразмерного многослойного Zr/Nb покрытия, полученные путем магнетронного распыления, были подвергнуты облучению пучком протонов с током 2 мкА на линейном ускорителе ЭСГ-2,5. Анализ распределения протонов и дефектов по глубине был проведен в программном пакете SRIM. Методом рентгеноструктурного анализа определены размер кристаллитов и микронапряжения после облучения. Оценка изменения дефектной структуры покрытий также была проведена по результатам измерения электросопротивления. Была установлена корреляционная зависимость данных электросопротивления и рентгеноструктурного анализа свидетельствующая о формировании дефектной структуры в покрытиях после облучения. Механические характеристики, такие как твердость и модуль Юнга были рассчитаны из данных по наноиндентированию. Показаны высокие механические характеристики сформированных покрытий (твердость 4.9 ГПа и модуль Юнга 128.9 ГПа) и их эволюция при облучении протонами.

**Ключевые слова:** облучение протонами, многослойные покрытия, радиационные дефекты.

## INFLUENCE OF PROTON IRRADIATION ON STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF NANOSCALE MULTILAYER METALLIC ZR/NB COATINGS

D. Krotkevich

National Research Tomsk Polytechnic University, Russian Federation  
E-mail: dimka.kro@gmail.com

**Abstract:** Nanoscale multilayer Zr/Nb coatings, received by magnetron sputtering, were irradiated by proton beam with electrostatic Van De Graaff ion accelerator, ion current was 2 mA. The penetration depth and distribution of defects was determined with SRIM simulation code. X-ray analyses before and after irradiation were performed to observe changes in crystalline sizes and microstrain values. Changes in electrical resistance of the coating revealed a presence of defect structure. There was observed correlation dependence between changes in electrical resistance and results of X-ray diffraction analyses. Mechanical properties, like hardness and Young's modulus, were determined from nanoindentation tests. High mechanical properties (hardness 4.9 GPa and Young's modulus 128.9 GPa) and their evolution due to irradiation are shown.

**Keywords:** proton irradiation, multilayer coatings, radiation defects.

На сегодняшний день Zr–Nb сплавы широко используются в качестве конструкционных материалов оболочек тепловыделяющих элементов во-

до-водяных энергетических реакторах, ввиду его высокой устойчивости к радиационным повреждениям, низкого сечения захвата тепловых нейтронов, коррозионной стойкости и высоким механическим характеристикам. Высокая несмешиваемость (разделение фаз) ввиду некогерентности границы раздела фаз циркония (ГПУ) и ниобия (ОЦК), высокие механические свойства и устойчивость к радиационным повреждениям открывают перспективы использования многослойных покрытий Zr/Nb в качестве конструкционного материала для ядерной энергетики. Ввиду многослойной структуры, нанокompозитные покрытия Zr/Nb обладают значительно лучшими механическими свойствами, в сравнении со сплавами системы Zr–Nb.

Многослойные композитные покрытия осаждались методом магнетронного распыления Zr (чистота 99.99%) и Nb (чистота 99.99%) мишеней на подложку монокристаллического Si (100). Общая толщина полученных покрытий составила 1350 нм, толщина индивидуальных слоев: 57 нм для Zr и 39 нм для Nb. Облучение образцов пучком протонов проводилось на линейном ускорителе ЭСГ–2,5. Энергия пучка составила 900 кэВ для всех образцов, ионный ток пучка составил 2 мкА, время облучения варьировалось от 1 до 3 часов. Для снижения энергии протонов использовалась алюминиевая фольга толщиной 11 мкм. Измерение электрического сопротивления проводилось четырехзондовым методом. Рентгеноструктурный анализ (РСА) был проведен на установке Shimadzu XRD-700S с CuK  $\alpha$ -излучением, непосредственно перед облучением и после. Из результатов рентгеноструктурного анализа, используя соотношение Дебая–Шеррера, были посчитаны размеры кристаллитов, микронапряжение и плотность дислокаций. Также был выполнен *in-situ* анализ структуры покрытий в процессе нагрева до 650 °С. Оценка твердости и модуля Юнга исходных и облученных покрытий проводилось методом наноиндентирования с использованием индентора Берковича. Для того чтобы исключить влияние подложки, глубина индентирования для каждого образца не превышала 10% процентов от толщины покрытия. Нагрузка при индентировании менялась от 1 до 8 мН, время нагружения составило 15 сек. При помощи программного пакета SRIM–2013 было получено распределение протонов по толщине покрытия и послойное распределение вакансий.

По результатам измерения электрического сопротивления было выявлено, что наибольшее уменьшение сопротивления 24% имеет место при облучении в течение 1 часа. Более длительное облучение приводит к обратному увеличению сопротивления, и, при облучении в течение 3 часов падение сопротивления составляет 11% от сопротивления исходного покрытия. Рентгеноструктурный анализ показал, что облучение протонным пучком приводит к смещению рефлексов плоскостей (002) Zr и (110) Nb в сторону больших углов. Противоположное изменение наблюдается при нагреве покрытий, где рефлекс смещался в сторону меньших углов, что

обусловлено увеличением параметров решетки фаз покрытия. Таким образом, смещение рефлексов в область больших углов  $2\theta$  и можно объяснить образованием радиационных дефектов при облучении протонами. При этом наблюдается корреляция между изменениями электросопротивления и параметрами решетки покрытия. Результаты РСА показали увеличение размера кристаллитов на 80–100% для образцов подвергшихся облучению в течение 1 и 2 часов, однако, с увеличением времени облучения до трех часов размер кристаллитов изменяется незначительно в сравнении с необлученным покрытием. Сформированные наноразмерные многослойные покрытия имеют высокие механические характеристики: твердость 4.9 ГПа и модуль Юнга 128.9 ГПа. После облучения протонами наблюдается увеличение твердости и модуля Юнга покрытий: на 37 и 21% (1 ч), 49 и 25% (2 ч), 24 и 17% (3 ч) соответственно. На основе данных моделирования глубина пробега протонов в покрытиях составила в среднем 900 нм.

В результате облучения пучком протонов наноразмерных многослойных покрытий Zr/Nb образуются точечные радиационные дефекты (пары Френкеля), о чем свидетельствует уменьшение электрического сопротивления. Рентгеноструктурный анализ свидетельствует о появлении сжимающих/растягивающих напряжений в покрытиях после облучения, что может также свидетельствовать о формировании дефектной структуры.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫХОДА ЛЕТУЧИХ ПРОДУКТОВ РЕАКЦИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА УГЛИ МЕТОДОМ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ**

**Я.В. Крафт, Р.Ю. Ковалев, Д.Р. Нурмухаметов, Б.П. Адуев,  
З.Р. Исмагилов**

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Россия  
E-mail: ktaft.kem@gmail.com

**Аннотация.** В работе использовался метод масс-спектрометрии для исследования конечных продуктов воздействия импульсного лазерного излучения (1064 нм, 120 мкс) на угли. В качестве образцов использовались угли трех марок – бурый, длиннопламенный газовый, коксовый, с дисперсностью до 100 мкм и изготовленные из них прессованные таблетки. Полученные результаты показали, что в результате воздействия лазерного излучения осуществляется существенный нагрев образцов, происходит зажигание с образованием продукта горения. В продуктах реакции (как в атмосфере воздуха, азота, так и аргона) существенно преобладают пики с  $m/z = 2, 18, 44$ , что соответствует основным пикам молекул  $H_2, H_2O, CO_2$ .

**Ключевые слова:** Лазерное зажигание угля, масс-спектрометрия, выход летучих продуктов, спектрально-кинетические характеристики

# VOLATILE MATTER YIELD OF THE REACTION OF LASER RADIATION IMPACT ON THE COAL BY MASS-SPECTROMETRY METHOD RESEARCH

Y. Kraft, R. Kovalev, D. Nurmuhametov, B. Aduiev, Z. Ismagilov

Institute of Coal Chemistry and Material Science SB RAS FRC CCC,  
Russian Federation  
E-mail: ktaft.kem@gmail.com

**Abstract.** The method of mass spectrometry was used to study the final products of the pulsed laser radiation action (1064 nm, 120 ms) on coals. As samples, coals of three grades were used – brown, long-flame gas, coke, with a dispersion of up to 100 mm and compressed pellets made of them. The obtained results showed that as a result of the laser radiation action, substantial heating of the samples takes place, ignition occurs with the formation of a combustion product. The peaks with  $m/z = 2, 18, 44$ , which correspond to the main peaks of  $H_2$ ,  $H_2O$ , and  $CO_2$  molecules, predominate in reaction products (both in air, nitrogen, and argon).

**Keywords:** Laser ignition of coal, mass spectrometry, volatile products yield, spectral-kinetic characteristics

Помимо сжигания в качестве энергетического ресурса, уголь также используется и в виде сырья в процессах химической конверсии, например, гидрирование угля, газификация и т.д. Пиролиз является важным этапом в этих процессах термического превращения. Содержащиеся в угле углеводороды при пиролизе не сгорают, а выделяются из него в виде газа или жидких фракций. Большое количество работ по исследованию термического разложения угля производятся с помощью реакторов пиролиза. В литературе также отмечается, что лазерное излучение может являться одним из перспективных инструментов для целей термического разложения угля.

В настоящее время проводятся исследования по лазерному зажиганию углей Кузнецкого бассейна [1]. Осуществляется обобщение экспериментальных данных по составу продуктов горения углей.

Следует также отметить и возможность использования угля в качестве светопоглощающего материала. В работе [2] применялся мелкодисперсный порошок угля для реализации лазерного инициирования энергетического материала (тетранитрата пентаэритрита).

В настоящей работе использовался метод масс-спектрометрии для исследования продуктов воздействия лазерного излучения на угли Кузнецкого бассейна.

В качестве источника лазерного излучения использовался импульсный лазер на иттрий алюминиевом гранате активированный неодимом. Использовалось излучение первой гармоники – 1064 нм. Лазерное излучение формировалось в режиме свободной генерации со средней длительностью импульса 120 мкс. В качестве прибора регистрирующего выделяющиеся газообразные продукты реакции воздействия лазерного излучения на образцы использовался газоанализатор SRS QMS-300A.

В качестве объектов исследования были выбраны угли Кузнецкого бассейна: бурый, длиннопламенный газовый и коксовый. Размерная фракция угольных частиц составляла диапазон  $< 0.1$  мм. Образцы, из частиц угля, изготавливались в форме прессованных до плотности  $1 \text{ г/см}^3$  таблеток (диаметром 14 мм, толщиной 4 мм, массой 1 г).

Эксперименты проводились в атмосфере воздуха, азота и аргона. Измерялся масс-спектр в диапазоне от 1 до 300 а.е.м. при энергии электронного пучка, равной 70 эВ.

Было обнаружено, что в продуктах реакции (как в атмосфере воздуха, азота, так и аргона) существенно преобладают пики с  $m/z = 2, 18, 44$ , что соответствует основным пикам молекул  $\text{H}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{CO}_2$ . В зависимости от сорта угля относительная интенсивность пиков отличается. Наибольшее газовыделение при воздействии лазерного излучения на образцы зафиксировано в случае образца бурого угля.

Помимо исследования выхода летучих продуктов реакции воздействия лазерного излучения на угли было проведено измерение спектрально-кинетических характеристик лазерного зажигания бурого угля по методике, описанной в [3].

Было выявлено три временных стадии процесса воздействия лазерного излучения на образец в зависимости от плотности энергии: I. Разогрев поверхности угля (во время лазерного импульса), II. Воспламенение летучих веществ ( $\geq 1$  мс), III. Горение коксового остатка (25 ч 150 мс). Во время действия лазерного импульса (120 мкс) возникает свечение поверхности образца, спектр которого, в максимуме интенсивности свечения, можно интерпретировать, как свечение абсолютно черного тела с температурой 3000 К.

Следует отметить, что при импульсном лазерном воздействии поверхность угля нагревается до температуры, значительно превышающей температуру, до которой нагревается поверхность угля, при непрерывном лазерном воздействии (в [4] температура нагрева поверхности составила 1300–1400 К). Во временном интервале 1–10 мс можно наблюдать свечение, спектр которого можно интерпретировать как свечение возбужденных молекул  $\text{CO}, \text{H}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Отмечается совпадение полученных результатов, а именно летучих продуктов, зарегистрированных методом масс-спектрометрии, и летучих продуктов, обнаруженных электронно-оптическим методом. Во временном интервале 20–150 мс спектр наблюдаемого свечения соответствует горению коксового остатка с температурой пламени 1700–1800 К.

### Литература

1. Адуев Б.П. и др. // Химическая физика. 2016. Т. 35. № 12. С. 32-34.;
2. Адуев Б.П. и др. // Международная конференция «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны»: тез. докл. 2017. С. 2.

3. *Nurmuhametov D.R. [et al.] // 9th International seminar on flame structure: Book of Abstracts. 2017. P. 72.*

4. *Korotkikh A.G. [et al.] // 9th International seminar on flame structure: Book of Abstracts. 2017. P. 60.*

## ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПРОЗРАЧНОЙ МАТРИЦЫ С ВКЛЮЧЕНИЕМ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА

**А.П. Никитин**

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Россия

E-mail: palich-xumuk@yandex.ru

**Аннотация:** В работе рассчитаны индивидуальные оптические свойства наночастиц серебра и их композитов с прозрачными матрицами на длине волны 1064 нм и различных температурах. Показано, что коэффициент эффективности поглощения наночастиц обладает выраженной температурной зависимостью, близкой к линейной, а значения коэффициента эффективности и фактора анизотропии индикатрисы рассеяния слабо зависят от температуры. Показано, что при увеличении температуры происходит уменьшение коэффициентов отражения и пропускания слоя и возрастание эффективного показателя поглощения. Исследованные закономерности могут быть использованы для получения температурных зависимостей оптических свойств металлов.

**Ключевые слова:** наночастицы, серебро, уравнение переноса излучения, температура.

## THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE OPTICAL PROPERTIES OF COMPOSITES BASED ON A TRANSPARENT MATRIX WITH INCLUSIONS OF SILVER NANOPARTICLES

**A. Nikitin**

Institute of Coal Chemistry and Material Science SB RAS FRC CCC, Russian Federation

E-mail: palich-xumuk@yandex.ru

**Abstract.** The optical properties of silver nanoparticles and their composites based on a transparent matrix at a wavelength of 1064 nm and different temperatures are calculated. It is shown that the absorption efficiency of nanoparticles has pronounced temperature dependence close to linear, the scattering efficiency and anisotropy of the scattering phase function depend weakly on temperature. It is shown that with increasing temperature there is a reduction of the reflectance and transmittance of the layer and increasing of the effective absorption coefficient. The regularities can be used to obtain the temperature dependence of the optical properties of metals

**Keywords:** nanoparticles, silver, radiative transport equation, temperature

Наночастицы серебра широко используются в устройствах оптики (в том числе – нелинейной), медицине. Поэтому хорошо отработанны методики синтеза наночастиц практически сферической формы с необходимыми-

ми размерными параметрами. Наночастицы серебра также интенсивно участвуют в процессах тушения люминесценции ряда аминокислот. Экспериментально и теоретически исследованы оптические свойства структур из наночастиц серебра. При сближении наночастиц на расстояния 20–30 нм происходит сдвиг полосы поглощения за счет дипольного взаимодействия, а передача механического возмущения вдоль изогнутых цепочек наночастиц сопровождается изменением их поляризации. Возможно усиление лазерной генерации в растворах люминофоров в присутствии наночастиц серебра, что в дальнейшем может быть использовано в лазерах «без резонаторов».

При эксплуатации оптических устройств возможно повышение температуры, которое будет сопровождаться изменением оптических свойств наночастиц и образца в целом. Для оценки области функционирования прикладных устройств требуются экспериментальные и теоретические исследования оптических свойств наночастиц и их композитов при варьировании температуры. Цель настоящей работы: расчет оптических свойств наночастиц серебра и композитов прозрачная матрица – наночастицы серебра на актуальной длине волны 1064 нм (основная гармоника неодимового лазера) при варьировании температуры.

В работах нашей лаборатории предложена методика моделирования оптических свойств образцов типа прозрачная матрица – наночастицы металлов. В настоящей работе дополним методику расчета оптических свойств светорассеивающих систем возможностью расчета пространственного распределения коэффициента усиления освещенности при различных температурах среды.

Для расчета оптических свойств наночастиц серебра в прозрачной матрице использовалась теория Ми. Для наночастиц с использованием данных по зависимости комплексного показателя преломления серебра от температуры рассчитывались коэффициенты эффективности рассеяния  $Q_{sca}$ , поглощения  $Q_{abs}$  и индикатриса рассеяния. При температурах 300, 500, 700 и 1000 К комплексный показатель преломления ( $m_i$ ) серебра составляет  $0.16 \cdot 7.6i$ ,  $0.31 \cdot 7.5i$ ,  $0.45 \cdot 7.4i$  и  $0.67 \cdot 7.3i$  соответственно. То есть увеличение температуры ( $i$ ) от 300 до 500 К приводит к почти двукратному росту действительной части показателя преломления. Расчеты проведены при плотности среды  $\rho = 1.77 \text{ г/см}^3$  и показателе преломления 1.54, что соответствует PETN – одному из наиболее востребованных вторичных взрывчатых веществ, перспективной основе капсуля оптического детонатора.

В качестве количественной характеристики эффекта многократного рассеяния в процессе поглощения энергии излучения светорассеивающей средой рассмотрим коэффициент усиления освещенности, равный отношению плотности мощности излучения на выбранном расстоянии ( $x$ ) от поверхности к плотности мощности, падающей на образец.

В исследованной области радиусов наибольшее рассчитанное уменьшение  $Q_{sca}$  при увеличении температуры от 300 до 1000 К составляет 3.8% и наблюдается при  $r=127.4$  нм. Варьирование температуры слабо влияет на абсциссу максимума на зависимости  $Q_{abs}(r)$ , так при температуре 500 К наибольший коэффициент эффективности поглощения имеют наночастицы с радиусом 99.6 нм, а при  $t=1000$  К абсцисса максимума составляет 98.8 нм.

С использованием значений коэффициентов эффективности поглощения и рассеяния, а также индикатрис рассеяния, рассчитанных при различных температурах, были рассчитаны оптические свойства композитов прозрачная матрица – наночастицы серебра. При увеличении радиуса наночастицы происходит рост альbedo однократного рассеяния и увеличение коэффициента отражения

Из результатов выполненных расчетов следует, что температура вещества оказывает выраженное влияние как на оптические свойства индивидуальных наночастиц, так и их композитов с прозрачными матрицами. В основном наблюдается увеличение коэффициента эффективности поглощения света при росте температуры.

Рассматриваемое изменение коэффициента эффективности экстинкции света наночастицами серебра и альbedo при варьировании температуры приводит к изменению оптических свойств композитов, содержащих наночастицы. Общая тенденция заключается в уменьшении коэффициентов отражения и пропускания, что типично наблюдается при уменьшении альbedo однократного рассеяния. Данный эффект достаточно выражен: рассчитанное абсолютное уменьшение  $T$  и  $R$  составляет 5–20% при радиусах наночастиц 50 нм и более в исследованном температурном диапазоне. Таким образом, эффект может быть зафиксирован современными спектрометрами с интегрирующей сферой, типичная инструментальная погрешность измерения которых составляет 0.1%.

Другим приложением может являться определение температур плавления наночастиц. Действительная и мнимая части показателя преломления скачкообразно изменяются в точках фазовых переходов. В результате будет происходить соответствующее изменение как оптических свойств индивидуальных наночастиц, так и их композитов. Достоинством подхода к определению температуры плавления, основанного на измерение оптических свойств, может быть возможность повышения точности за счет снижения скорости нагрева. При использовании стандартных дериватографических методик возможности данного приема ограничены, так как вызывают уменьшение амплитуды сигнала и трудности его выделения на фоне шумов.

Изменение температуры наночастиц может быть достигнуто с помощью их нагревания импульсным лазерным излучением. Из решения теплофизической части задачи следует, что наибольшие максимальные температуры

нагрева реализуются для наночастиц, радиус которых пропорционален квадратному корню из длительности импульса, например, при длительности импульса на полувывсоте 20 нс радиус наиболее нагретых наночастиц алюминия составляет 70·80 нм. Из результатов, представленных в настоящей работе, также следует видимое возрастание коэффициентов эффективности поглощения наночастиц серебра близких размеров. Положительная обратная связь нагрева наночастицы и коэффициента эффективности поглощения способна привести к наличию нелинейных оптических свойств. Особенность будет заключаться в том, что для их проявления не требуется подбор материала и радиуса наночастицы так, чтобы реализовывался плазмонный резонанс на длине волны возбуждения. Кроме того, эффект будет связан со свойствами индивидуальных частиц, поэтому будет проявляться и при достаточно больших расстояниях между наночастицами в композите. Подобный нелинейный эффект может приводить к значительному изменению распределения поглощенной энергии при переходе от стационарных источников оптического излучения к импульсным.

## **РОЛЬ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОНОВ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА В РАЗЛОЖЕНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

**Д.Р. Нурмухаметов, А.А. Звекон, А.С. Зверев, А.Н. Еременко,  
Д.М. Руссаков**

Институт углеродной и химического материаловедения ФИЦ УУХ СО РАН, Россия  
E-mail: ndr999@gmail.com

**Аннотация.** Впервые наблюдался поверхностный плазмонный резонанс наночастиц золота в поликристаллическом энергетическом материале тетранитрат пентаэритрита (тэна). Методом оптической спектрометрии зарегистрированы спектры экстинкции материала. Определены показатели поглощения и рассеяния материала оптико-акустическим методом и методом фотометрического шара при импульсном лазерном воздействии. Сделан вывод, что наночастицы золота являются перспективным материалом в качестве включений во взрывчатые вещества для создания оптического детонатора.

**Ключевые слова:** наночастицы золота, поверхностный плазмонный резонанс, энергетические материалы, тэн, лазер, спектроскопия, оптико-акустика, фотометрический шар.

# THE ROLE OF SURFACE PLASMONS OF GOLD NANOPARTICLES IN THE DECOMPOSITION OF ENERGY MATERIALS UNDER LASER ACTION

**D. Nurmukhametov, A. Zvekov, A. Zverev, A. Eremenko and D. Russakov**

Institute of Coal Chemistry and Chemical Materials FRC CCC SB RAS, Russian Federation  
E-mail: ndr999@gmail.com

**Abstract.** The surface plasmon resonance of gold nanoparticles in a polycrystalline energy-related material – pentaerythritol tetranitrate (PETN) – has been observed for the first time. The extinction spectra of this material are recorded, and its absorption characteristics are determined by the photoacoustic method using pulsed laser irradiation. Using the data obtained, it is concluded that gold nanoparticles are promising inclusions in explosive materials when designing an optical detonator

**Keywords:** gold nanoparticles, surface plasmon resonance, energy-related materials, PETN, laser, optical spectroscopy, photoacoustic method.

В настоящей работе предложено использовать в качестве включений наночастицы золота. Особенностью применения наночастиц золота определенного размера, в качестве добавок в ВВ является то, что они имеют максимум полосы поверхностного плазмонного резонанса в спектральной области вблизи излучения второй гармоники неодимового лазера (532 нм). Поэтому проблема – изучение поглощательной способности смесевых составов на основе бризантных ВВ и включений наночастиц золота на длине волны 532 нм является актуальной. Таким образом, применение наночастиц золота в качестве добавок в ВВ может использоваться для селективного инициирования взрыва – только при конкретных параметрах оптического излучения (длина волны, плотность энергии).

Целью данной работы является выяснение принципиальной возможности создания образца энергетического материала, способного селективно поглощать излучение определенной длины волны. Для достижения данной цели поставлены следующие задачи: 1. разработать методику введения наночастиц золота в ВВ, на примере тэна; 2. провести оптическое исследование полученного объекта методами оптической спектрометрии, оптико-акустики и фотометрического шара.

Коллоидные растворы наночастиц золота получены методом Френца [1], основанный на цитратном восстановлении золотохлорводородистой кислоты  $H[AuCl_4]$ . Спектры экстинкции, полученных коллоидных растворов, регистрировали на спектрофотометре Shimadzu UV-3600 в диапазоне длин волн 300–1600 нм при толщине измеряемого слоя исследуемых образцов 1 мм. Методом просвечивающей электронной микроскопии были получены микрофотографии наночастиц золота и построены гистограммы распределения частиц по размерам.

По специальной процедуре были изготовлены смесевые составы тэна с включениями наночастиц золота. В итоге получались образцы в виде таблеток диаметром 3 мм, толщиной 1 мм и плотностью  $1.73 \pm 0.03 \text{ г/см}^3$ .

Были измерены спектры экстинкции порученных таблеток. Из спектров видно, что в образцах присутствует характерная для наночастиц золота плазмонная полоса. При этом лазерное излучение второй гармоники неодимового лазера достаточно хорошо попадает в область плазмонной полосы. Что позволяет предположить селективное поглощение лазерной энергии образцами.

Измерение оптико-акустических (ОА) характеристик (показателя экстинкции  $k$  и амплитуды ОА-сигнала  $U$ ) исследуемых объектов импульсным ОА методом проводилось на установке, собранной по схеме с прямой регистрацией ОА сигнала [2]. Для их возбуждения использовалось излучение импульсного YAG:Nd<sup>3+</sup>, работающего в режиме модуляции добротности. Длительность импульса составляла величину 14 нс. Использовались первая (1064 нм) и вторая (532 нм) гармоники лазера. Плотность энергии в импульсе составляла величину  $30 \text{ мДж/см}^2$ . Энергия лазерного излучения определялась с помощью пироэлектрического измерителя энергии PE50BF-C. Образец находился в акустическом контакте через дюралюминиевую задержку с пьезопреобразователем, изготовленным из керамики ЦТС-19 (диаметром 8 мм, толщиной 4 мм, с напыленными серебряными электрическими контактами). Воздействие излучения производилось на открытую поверхность образцов. Сигнал с пьезопреобразователя регистрировался цифровым осциллографом LeCroy WJ332A. Синхронизация элементов установки осуществлялась внутренним генератором блока управления лазера.

При помощи ОА метода получены значения показателей экстинкции образцов на первой ( $\lambda=1064 \text{ нм}$ ) и второй ( $\lambda=532 \text{ нм}$ ) гармониках неодимового лазера.

По характерам полученных сигналов можно сделать вывод. При импульсном воздействии лазерной энергии на образцы поглощение второй гармоники наиболее эффективно, чем первой. При использовании первой гармоники, излучение, практически не поглощаясь, проходит через образец и воздействует на пьезодатчик.

Исследовался акустический отклик на лазерное воздействие образцов с содержанием включений Au 0.03, 0.075, 0.1, 0.2 масс. %. Прессованные образцы тэна, не содержащие включений, не дают акустического отклика. Таким образом, в пределах чувствительности регистрирующей аппаратуры, поглощение света и преобразование его энергии в тепловую не обнаружено, т.е. среда является слабопоглощающей. Напротив, образцы содержащие включения, дают хорошо регистрируемые сигналы.

По данным экспериментов наблюдается линейная зависимость между  $k$  и концентрацией включений, что позволяет судить о том, что наночастицы

в образцах ,преимущественно, поглощают, а не рассеивают лазерное излучение [2].

Результаты исследования оптических характеристик образцов методом фотометрического шара показали корреляцию данных, полученных при использовании других методов (оптическая спектроскопия, оптико-акустика).

Из результатов эксперимента можно сделать следующие выводы. Для прессованных образцов без включений наночастиц значение коэффициента отражения близко к значению френелевского отражения для монокристалла. Действительно, при показателе преломления среды  $n = 1.56$  для тэ-на, френелевское отражение от передней и тыльной поверхностей составляет величину  $R = 0.09$ . Таким образом, матрица является слабопоглощающей и слаборассеивающей средой.

При переходе к образцам, содержащих включения наночастиц золота, доля отраженной и рассеянной энергии увеличивается до  $\sim 15\%$ . Причем эта величина практически не меняется ни при вариации концентрации включений, ни при вариации толщины образца при заданной концентрации включений. Можно предположить, что увеличение коэффициента отражения связано с технологией изготовления образцов с включениями и обусловлено, в основном, отражением от передней поверхности образца. Однако полностью исключить эффект рассеяния излучения наночастицами на данном этапе исследований не представляется возможным.

В заключении отметим, что в работе реализована принципиальная возможность получения высокоэнергетического материала с необходимыми оптическими свойствами (положение максимума полосы оптического поглощения) для применения в устройствах специальной техники.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-33-00510 мол\_а) и госзадания ФАНО России (тема V.49.1.5).

### Литература

1. *Frens G.*, Nature. Phys. Sci., 241 (1973), 20-22.
2. *Карабутов А.А., Пеливанов И.М., Подымова Н.Б., Скипетров С.Е.* Квантовая электроника, 29 (1999), 215.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВНЕДРЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНОГО УДАРНИКА В ТОЛСТЫЙ ЛЕД

**Ю.Н. Орлова**

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия  
E-mail: orlovaun@mail.ru

**Аннотация.** В работе представлены результаты процесса внедрения крупногабаритного ударника в толстый лед при низких начальных скоростях. Модель поведения среды описана классической сложной моделью механики сплошных сред. Ударник с

плоской головной частью – крупногабаритный контейнер наполнен инертным наполнителем, который имитировал ВВ. Расчеты проведены в 2D осесимметричной упруго-пластической постановке. Детально изучен процесс внедрения и получена наиболее полная информация, в том числе время внедрения ударника, диаметр и глубина кратера, относительная скорость донной и носовой части ударника, величина зазора между наполнителем и донной частью ударника. Результаты представляют практический интерес для МЧС РФ по ТО.

**Ключевые слова:** Внедрение, крупногабаритный ударник, лед, кратер, разрушение.

## NUMERICAL MODELING OF PERFORATING OF LARGE-SIZED IMPACTOR INTO THICK ICE

**Yu.N. Orlova**

National Research Tomsk Polytecnic University, Russian Federation  
E-mail: orlovaun@mail.ru

**Abstract.** Post penetration analysis of thick ice by a large-sized impactor was carried out. All stages of the penetration process were reproduced by means of numerical simulation. Thick ice (up to 200 cm) was simulated by single-phase, strong, elastic-plastic, taking into account the porosity of the material. The numerical method is modified to solve the dynamic multi-contact tasks of the mechanics of a deformed solid. Perforating time, the diameter of the crater in the ice, impactor deformation, the gap in the bottom of the impactor, and so on were revealed. Recommendations for the Ministry of Emergency Situations of Russia have been received.

**Keywords:** post penetrating analysis, impactor, ice, crater, deformation, failure.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью получения новых знаний о деформировании и разрушении льда при ударно-волновом нагружении. Этот древнейший природный материал обладает уникальными свойствами и структурой. Несмотря на глобальное потепление в мире, наша страна ещё долгие времена будет оставаться северной державой. Экономическое развитие России невозможно без эффективного развития Арктики и северных территорий России. Поэтому полученные в проекте теоретические и экспериментальные результаты найдут применение в решении практических задач освоения Севера, а дальнейшее углубление наших знаний в области физики и механики льда в плане уточнения методов решения и моделей поведения льда будут актуальны достаточно долго. Со всеми «свежими» работами по «ледовой» тематике можно ознакомиться в [1].

В НИИ прикладной математики и механики ТГУ под руководством профессора В.П. Глазырина постоянно ведутся поисковые научные исследования объектом, которых является поликристаллический лед. На базе классической сложной модели механики сплошных сред разработана физико-математическая модель поведения льда при ударных и взрывных нагрузках. В рамках модели лед описывается однофазной упругопластической средой без фазовых переходов с усредненными физико-

механическими характеристиками из общедоступных литературных источников. Допускается появление новых свободных поверхностей, в том числе взаимодействующие тела на отдельные фрагменты. Действие продуктов детонации описывается политропой Ландау – Станюковича в рамках модели мгновенной детонации. Модифицирован численный метод для решения задач взрывного нагружения толстого льда (200 см) путем улучшения алгоритма расчета контактных и свободных поверхностей. Улучшенный алгоритм позволяет более точно описывать контактную поверхность между льдом и продуктами детонации [2].

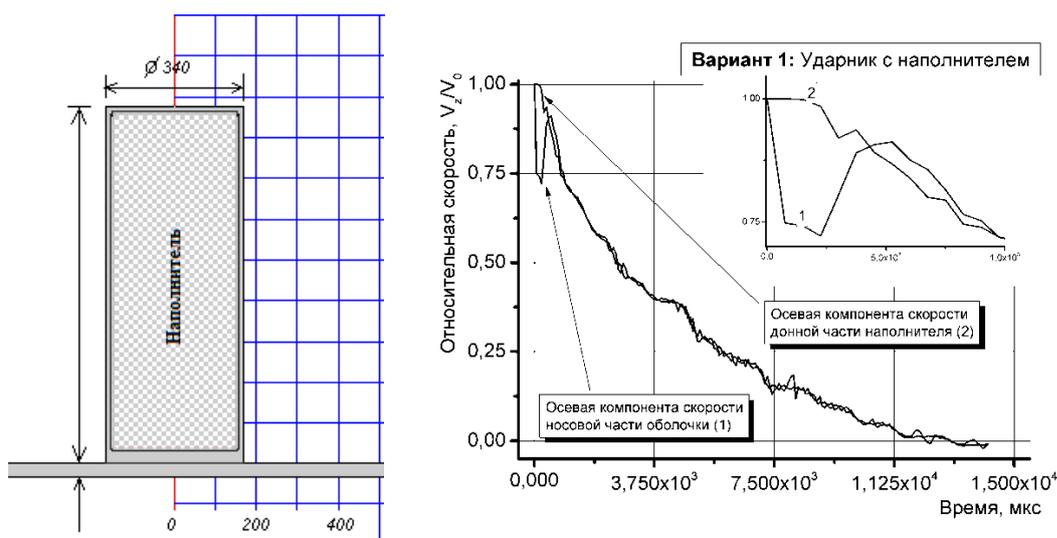


Рис. Результаты вычислительного эксперимента:  
исходная конфигурация ударника и временная зависимость его скорости при 150 м/с

Последней инновацией следует считать организованную мобильную лабораторию «Взрывное разрушение природных материалов», основной целью которой является экспресс-анализ поведения природных материалов при взрывных нагрузках. Были изучены природный известняк и лед (заснеженный ледяной покров, бесснежный лед, лед сэндвич структуры, а также лед по типу игольчатого) при подрыве штатного отечественного ВВ (Эмуласт АС-ФП-90). Основными результатами являются установленные формы и размеры взрывных кратеров и майн, диаметр и высота разлета осколков, морфология разрушения, и т.п. Помимо образовательного аспекта, результаты могут быть рассмотрены как практические рекомендации для подрыва льда.

Был смоделирован и изучен процесс внедрения крупногабаритного ударника в толстую ледяную преграду при низких начальных скоростях от 150 до 300 м/с. Процесс кратерообразования детально рассмотрен, в том числе установлено время внедрения, глубина внедрения, форма кратера, зазор в донной части ударника между оболочкой и наполнителем (см. рисунок).

Полученные результаты позволили воспроизвести основные особенности процесса внедрения и оценить возможность самодетонации наполнителя в зависимости при указанных условиях.

### Литература

1. Официальный сайт международного научного сообщества [Электронный ресурс]. <http://www.isopec.org/>
2. Orlov M.Y., Bogomolov G.N., Orlova Y.N. The behavior limestone under explosive loading Journal of Physics: Conference Series. 2016. Т. 774. № 1. С. 012052.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И РАСЧЕТ ОКИСЛЕНИЯ НАНОЧАСТИЦЫ АЛЮМИНИЯ НА ВОЗДУХЕ

**В.А. Порязов, А.Ю. Крайнов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия

E-mail: [akrainov@ftf.tsu.ru](mailto:akrainov@ftf.tsu.ru)

**Аннотация.** В работе представлена математическая модель окисления наноразмерной частицы алюминия в процессе хранения на воздухе при нормальных условиях. Проведен расчет изменения массы алюминия и толщины оксидной пленки в процессе хранения. Полученные результаты согласуются с данными, представленными в научной литературе.

**Ключевые слова:** наночастицы алюминия, окисление, хранение, математическая модель.

## MATHEMATICAL MODEL AND NUMERICAL INVESTIGATION ON ALUMINUM NANOPARTICLES OXIDATION IN THE AIR

**V.A. Poryazov and A.Yu. Krainov**

National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: [akrainov@ftf.tsu.ru](mailto:akrainov@ftf.tsu.ru)

**Abstract:** The paper presents a mathematical model of aluminum nanoparticle oxidation during storage under normal conditions in the air. We have been carried out the calculation of aluminum mass change and thickness of the oxide layer during the storage. The obtained results are well agreed with the data presented in the scientific papers.

**Keywords:** nanosized aluminum particles, oxidation, storage, mathematical model.

Нанопорошки металлов имеют повышенную химическую активность по сравнению с порошками микронных размеров. Формирование оксидной пленки при их медленном окислении воздухом является достаточно универсальным способом пассивирования и стабилизации нанопорошков алюминия. Известно, что тип пассивирующего покрытия и срок хранения порошка алюминия влияет на его активность в процессах горения [1]. Со-

гласно литературным данным, основное влияние на процессы воспламенения и горения частиц металлов оказывает толщина оксидной пленки, которая является диффузионным барьером для взаимодействия металла с окислителем [1].

Представляет практический интерес разработать математическую модель окисления нанодисперсной частицы металла в процессе их хранения при нормальных условиях с целью прогнозирования толщины образовавшегося в процессе хранения оксидного слоя на ее поверхности.

В обзоре [2] отмечается, что в силу малости диаметра частиц характерное время диффузии для наноразмерных частиц сравнимо с характерным временем химической реакции. В связи с этим, при моделировании процесса окисления наноразмерных частиц алюминия, необходимо учитывать диффузию окислителя через слой оксида алюминия и зависимость скорости химической реакции от температуры и концентрации реагентов.

При построении математической модели окисления наночастицы алюминия на воздухе предполагается, что частица имеет сферическую форму, на ее поверхности имеется тонкий слой оксида. Частица находится в изотермических условиях, концентрация кислорода в воздухе не меняется. Через шаровой слой оксида алюминия происходит диффузия кислорода. На границе между оксидом и алюминием под слоем оксида происходит реакция окисления алюминия до конечного продукта,  $Al_2O_3$ . Предполагается, что скорость химической реакции лимитируется скоростью подвода кислорода. Предполагается, что шаровой слой оксида алюминия не разрушается под действием возникающих напряжений от нарастающего слоя оксида алюминия.

При сформулированных предположениях математическая модель окисления наночастицы алюминия в воздухе будет состоять из уравнений диффузии кислорода с учетом его расходования в химической реакции на границе слоя оксида с алюминием.

$$\frac{\partial \rho_o}{\partial t} + u \frac{\partial \rho_o}{\partial r} = D \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial \rho_o}{\partial r} \right), \quad (1)$$

где  $t$  – время,  $r$  – радиальная координата,  $c_o$  – парциальная плотность окислителя,  $D$  – коэффициент диффузии,  $u$  – скорость перемещения окисной пленки.

Начальные условия:

$$\rho_o(r, 0) = \rho_{o,0}, \quad (2)$$

Граничные условия: На внешней поверхности окисной пленки поток массы окислителя определяется соотношением:

$$D \frac{\partial \rho_o(r_0(t), t)}{\partial r} = -\beta (\rho_o(r_0(t), t) - \rho_{o,\infty}), \quad (3)$$

где  $\beta$  – коэффициент массообмена,  $\beta = D/r_0(t)$ ,  $D = k_1 T^{k_2}$  – коэффициент диффузии кислорода в воздухе,  $k_1 = 1.13 \cdot 10^{-9}$ ,  $k_2 = 1.724$  [2],  $r_0(t)$  – внешний радиус слоя окислителя,  $T$  – температура.

На внутренней поверхности окисной пленки весь кислород поглощается в химической реакции с алюминием:

$$\rho_o(r_1(t), t) = 0, \quad (4)$$

Скорость движения внутренней границы слоя окислителя  $u_1(t) = \frac{dr_1}{dt}$  определяется потоком массы кислорода на этой границе:

$$\frac{\partial \rho_o(r_1(t), t)}{\partial r} \frac{2\mu_{Al}}{3\mu_o} = u_1(t) \rho_{Al}, \quad (5)$$

где  $\mu_{Al}$ ,  $\mu_o$  – молекулярная масса алюминия и кислорода,  $\rho_{Al}$  – плотность алюминия.

Скорость движения внешней границы слоя окислителя  $u_0(t) = \frac{dr_0}{dt}$  определяется из соотношения:

$$u_0(t) = u_1(t) \frac{r_0^2}{r_1^2}. \quad (6)$$

Скорость движения внутри окисной пленки определяется выражением  $u(r, t) = u_1(r_0, t) \frac{r_0^2}{r^2}$ .

Решение уравнения (1) с условиями (2)–(4) проводится методом прогонки. Расчеты проводились при следующих значениях физических величин:  $\rho_{Al} = 2700 \text{ кг/м}^3$ ,  $D = 2.98 \cdot 10^{-22} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\mu_{Al} = 0.027 \text{ кг/моль}$ ,  $\mu_o = 0.016 \text{ кг/моль}$ . Начальное содержание алюминия в частице составляет 89 %. Количество кислорода в воздухе принималось равным 20 %. Расчеты проводились для  $d_0 = 160 \text{ нм}$  (частицы наноалюминия ALEX) и  $d_0 = 80 \text{ нм}$ , при температуре  $T = 300 \text{ К}$ . В расчетах определялось изменение относительной массы алюминия во времени (изменение во времени отношения массы алюминия в частице к начальной массе частицы,  $m/m_0$ ).

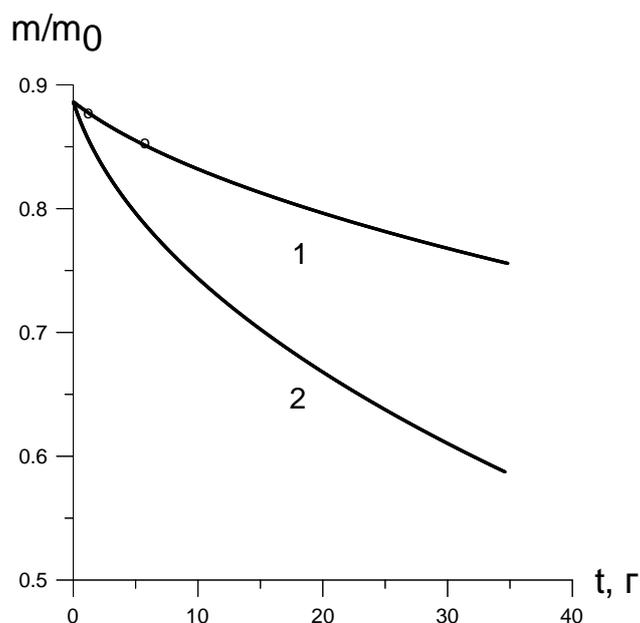


Рис. 1. Изменение во времени отношения массы алюминия в частице к начальной массе частицы радиусом  $d_0=160$  нм (1) и  $d_0=80$  нм (2)

На рис. 1 представлена зависимость содержания массовой доли алюминия в наночастиц диаметром 160 нм и 80 нм от времени при их окислении в воздухе при температуре 300 К. Точками на рисунке обозначены экспериментальные данные из [1]. Согласно данным [1], при окислении на воздухе наночастиц алюминия ALEX через 6 месяцев в частице содержится чистого алюминия 88 %, через 6 лет – 85 %. Расчетами была подобрана величина коэффициента диффузии кислорода через окисную пленку,  $D$ , такая, чтобы расчетные величины процентного содержания алюминия в частице на моменты времени 0.5 года и 6 лет совпали с экспериментальными данными. Затем был проведен расчет окисления наночастиц алюминия диаметром 160 нм и 80 нм за время 35 лет. Из рисунка видно, что частицы размером 160 нм за 35 лет окисляются на 25 %, частицы размером 80 нм окисляются на 41 %.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-20011).

### Литература

1. Громов А.А и [др.] Физика и химия горения нанопорошков металлов в азотсодержащих газовых средах / А.А. Громов и [др.]. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. 334 с.
2. Сандарам Д., Янг В., Зарко В.Е. Горение наночастиц алюминия (обзор) // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51, № 2. С. 37-63.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ НА СВОЙСТВА КАЛЬЦИЙФОСФАТНЫХ СЕРЕБРОСОДЕРЖАЩИХ БИОПОКРЫТИЙ

**А.В. Угодчикова**

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия  
E-mail: Ugodch99@gmail.com

**Аннотация.** В данной работе проводились исследования зависимости свойств кальцийфосфатных серебрясодержащих биопокровов на титане и сплаве Ti-40%мас.Nb от изменения параметров процесса микродугового оксидирования (МДО). Варьирование напряжения процесса МДО в интервале от 350 до 500 В, и длительности импульсов от 100 до 500 мкс, позволяет получать кальцийфосфатные серебрясодержащие покрытия с толщиной до 40 мкм, шероховатостью до 3.3 мкм, содержанием серебра в биопокрове до 0.82 ат.% и развитой морфологией поверхности. При этом плотность тока процесса, достигает значения 0.24 А/см<sup>2</sup>.

**Ключевые слова:** Микродуговое оксидирование, напряжение, длительность импульсов, кальцийфосфатное покрытие.

## RESEARCH OF THE EFFECT OF THE PARAMETERS OF THE MICRO ARC OXIDATION PROCESS ON THE PROPERTIES OF CALCIUM PHOSPHATE SILVER-CONTAINING BIOCOATINGS

**A. Ugodchikova**

National Research Tomsk Polytechnic University, Russian Federation  
E-mail: Ugodch99@gmail.com

**Abstract.** The dependence of calcium phosphate silver-containing biocoatings properties on the parameters of the microarc oxidation (MAO) process were researched. Coatings were obtained on titanium and Ti – mas.40% Nb alloy. A variation the voltage of the MAO process in the range from 350 to 500 V, and the pulse duration from 100 to 500 ms, allows obtaining calcium phosphate silver-containing coatings with a thickness of up to 40 mm, a roughness up to 3.3 mm, silver content in the biocoating up to 0.82 at%. The current density of the process reaches a value of 0.24 A/cm<sup>2</sup>.

**Keywords:** Microarc oxidation, voltage, pulse duration, calcium phosphate coatings

Разработка новых медицинских материалов, предназначенных для контакта со средой живого организма, является важной и сложной задачей. Титан и его сплавы в достаточной степени удовлетворяют комплексу основных требований (биохимическая и биомеханическая совместимость, конструкционная прочность), предъявляемых к биосовместимым материалам. Для повышения биологической активности металлических имплантам.

тов в живой среде организма необходимо наносить на их поверхность кальцийфосфатные (КФ) покрытия [1].

Одним из перспективных методов нанесения биопокрытий является метод микродугового оксидирования (МДО), с помощью которого можно получать кальцийфосфатные покрытия с развитой морфологией поверхности и пористой структурой, с толщиной до сотен микрометров, на имплантатах сложной геометрической формы [2].

Введение в покрытие серебра, находящегося в материале в виде свободных частиц, или ионов, обеспечивает бактерицидное и противовоспалительное действие имплантируемых материалов [3].

Целью данной работы является получение методом МДО серебросодержащих кальцийфосфатных (КФ) покрытий, исследование влияния параметров процесса МДО на свойства покрытий.

Материалы и методы исследования. Для проведения экспериментов были подготовлены образцы – металлические пластинки (10×10×1 мм) из титана (ВТ1-0) и сплава Ti–40мас.%Nb (Ti–40Nb). В состав электролита, для получения Ag-содержащих КФ покрытий методом МДО, входили следующие компоненты:  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{v-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , NaOH, и  $\text{AgNO}_3$ . Нанесение покрытий осуществлялось на установке «MicroArc 3.0 System» (ИФПМ СО РАН). Покрытия наносили в анодном потенциостатическом режиме, основные параметры процесса МДО варьировали: напряжение 350–450 В, длительность импульсов 100–500 мкс, время нанесения покрытия 5–10 мин.

Формирование покрытия в микродуговом разряде связано с протеканием высокотемпературных физико-химических процессов в зоне микродуговых разрядов под воздействием внешнего импульсного источника высокого напряжения, также за счет окисления основного материала подложки и переноса из электролита в покрытие ультрадисперсной фазы. Исследования показывают, что на свойства покрытий особое влияние оказывают параметры процесса МДО: напряжение, длительность процесса, частота импульсов, соотношение длительностей импульсов тока и пауз, изменение их во времени.

От напряжения процесса и длительности импульсов зависит важный параметр процесса МДО – плотность тока. Исследования показали, что при повышении напряжения процесса МДО от 350 до 450 и длительности импульсов от 100 до 500 мкс начальная плотность тока также увеличивается до  $0.24 \text{ A/cm}^2$ . С течением времени на металлической подложке формируется диэлектрическое КФ-покрытие и плотность тока снижается.

Толщина (D) и шероховатость (Ra) Ag-содержащих КФ покрытий увеличивается почти линейно до 40 мкм и 3.3 мкм на Ti–40%Nb, 18 мкм и 1.9 мкм для титана, соответственно при повышении напряжения процесса МДО (рис. 1 а, б).

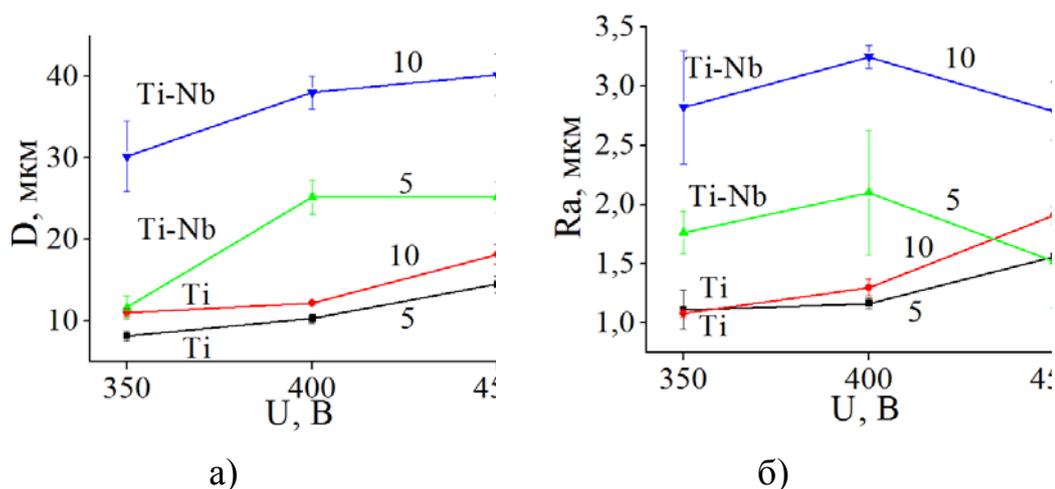


Рис. 1. Графики зависимости толщины (а) и шероховатости (б) покрытий от напряжения процесса МДО при длительности нанесения 5 и 10 минут

При увеличении длительности импульсов от 100 мкс до 500 мкс на титановой подложке наблюдается незначительное изменение свойств покрытий, значения толщины и шероховатости достигают, соответственно 19.17 и 1.55 мкм.

Изменения параметров процесса МДО имеют большое влияние на фазовый и элементный состав КФ-покрытий. Установлено, что фазовый состав представлен кристаллическими фазами титана, оксидов титана (рутил и анатаз). Кроме того, в покрытиях присутствуют рентгеноаморфные кальцийфосфатные соединения.

Варьирование длительности импульсов не оказывает существенного влияния на изменение их фазового состава. Исследование рентгенограмм показало лишь незначительное увеличение интенсивности пиков идентифицированных фаз.

Анализ элементного состава кальцийфосфатных покрытий показал, что при увеличении параметра длительности импульсов до 500 мкс содержание серебра в покрытиях достигает 0.2 ат.%, отношение Ca/P варьируется в диапазоне 0.76–0.89.

При увеличении напряжения процесса МДО от 350 до 450 В содержание серебра в покрытиях заметно растёт от 0.19 до 0.82 ат.%. Количество серебра в покрытиях на титане почти в три раза превышает содержание серебра в покрытиях на сплаве Ti–40%Nb. В литературных источниках имеются сведения, что даже малые концентрации серебра в диапазоне 1.0–3.5 ат.% могут обеспечивать значительный антибактериальный эффект имплантируемых материалов [4]. Отношение Ca/P для Ag-содержащих кальцийфосфатных покрытий на титане и сплаве Ti–40%Nb также увеличивается до 1.37 и 1.47 соответственно, при повышении напряжения процесса МДО до 450 В.

Исследование показало, что варьирование напряжения и длительности процесса МДО оказывает более существенное влияние на свойства кальцийфосфатных серебрясодержащих покрытий. С ростом напряжения процесса МДО происходит увеличение интенсивности образования микроплазменных разрядов на поверхности изделия, что приводит к увеличению скорости формирования покрытия, росту его толщины до 40 мкм и шероховатости до 3.3 мкм. Повышение напряжения процесса МДО от 350 до 450 В способствует увеличению содержания серебра в покрытиях от 0.19 до 0.82 ат.% и соотношения Ca/P, изменению фазового состава биопокрытий.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований СО РАН на 2016–2019 гг., III 23.2.5, и РФФИ, проект №15-03-07659.

### Литература

1. *Legostaeva E.V., Sharkeev Yu.P., Epple M., Prymak O.* Structure and properties of microarc calcium phosphate coatings on the surface of titanium and zirconium alloys, *Russian Physics Journal*. 2014. Vol. 56(10). P. 1130–1136.
2. *Sedelnikova M.B., Komarova E.G., Sharkeev Yu.P., Tolkacheva T.V., Khlusov I.A., Sheikin V.V.* Bioactive calcium phosphate coatings on metallic implants // *AIP Conference Proceedings*. Physics of Cancer: Interdisciplinary Problems and Clinical Applications. 2017. 1882, 020062-1–020062-11.
3. *Stanirc V., Janackovic D., Dimitrijevic S.* Synthesis of antimicrobial monophasic silver-doped hydroxyapatite nanopowders for bone tissue engineering, *Applied Surface Science* 257 (2011) 4510–4518.
4. *Kotharu V., Nagumothu R., Ch. Bose Arumugam, M. Veerappan, ubramanian Sankaran, Mubarak Ali Davoodbasha, Thajuddin Nooruddin.* Fabrication of corrosion resistant, bioactive and antibacterial silver substituted hydroxyapatite/titania composite coating on Cp Ti. *Ceramics International* (2012) 731–740.

**СЕКЦИЯ 2  
ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ,  
ПРОГРАММЫ И ТОЧНЫЕ  
РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД**

---

---

**Session 2  
NUMERICAL METHODS, ALGORITHMS, CODES,  
AND ACCURATE SOLUTIONS OF THE CONTINUUM  
MECHANICS**

**ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА  
РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ  
НАГРУЗКЕ**

**Д.С. Бабич, П.В. Максимов, Д.Д. Моисеенко**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: dmitriy18197@gmail.com

**Аннотация.** Разработан дискретно-континуальный метод на базе клеточных автоматов для симуляции зарождения и дальнейшего роста зерен. На базе разработанного метода был проведен численный эксперимент по моделированию процесса рекристаллизации под воздействием термической нагрузки чистого титана в вершине трещины. 3D клеточный автомат симулирует поведение V-образной области образца, имитирующей окрестность вершины трещины. Численные эксперименты нацелены на вычисление теплового расширения в материале, явным образом учитывая концентрацию термических напряжений и возникновения микровращений. Последнее, в свою очередь, приводит к возникновению новых дефектов и увеличению местной энтропии.

**Ключевые слова:** рекристаллизация, термический удар, численные методы.

**DYNAMIC RECRYSTALLIZATION AT CRACK SURFACES  
AT ELEVATED TEMPERATURES-HYBRID CELLULAR  
AUTOMATA SIMULATION**

**D. Babich, P. Maksimov and D. Moiseenko**

National research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: dmitriy18197@gmail.com

**Abstract.** In the study a Hybrid discrete-continuum Cellular Automata approach (HCA) to simulate new phase generation and grain growth is proposed. On the basis of the HCA the numerical experiments on thermal-activated recrystallization of pure titanium in the vicinity of crack edges were conducted. In doing so the 3D cellular automaton simulates the behavior

of the V-notched specimen region that imitates the crack tip vicinity. Numerical experiments are aimed at calculating heat expansion in the material under study through taking into account thermal stresses accumulation and microrotation initiation. The latter gives rise to generation of new defects and increasing the local entropy.

**Keywords:** Recrystallization, Thermal Shock, Computing Methods.

В последние несколько десятилетий бурное развитие авиационной и космической техники, возрастающие требования к оборудованию в сталелитейной промышленности и пр., ставят новые задачи по созданию материалов и конструкций работающих в экстремальных условиях эксплуатации. В первую очередь – это материалы, применяющиеся при изготовлении сопел реактивных двигателей, фурм и кристаллизаторов разлива сталей, и др. Большие перепады и градиенты температур, мощные термоудары при запуске двигателя или заливке расплава, а также с учетом циклической повторяемости этих процессов, могут приводить к катастрофической деградации используемых материалов. Деградация структуры материала имеет весьма сложную природу и связана с различными взаимозависимыми и параллельно развивающимися процессами, что сопровождается перестройкой внутренней структуры материала подложки, растрескиванием и отслаиванием защитного покрытия, формированием хрупкого термически выращенного оксидного слоя, и т.д. Известно, что экспериментальные исследования материалов и последующие натурные испытания готовых конструкций весьма трудоемки и дорогостоящи. В связи с этим теоретическое прогнозирование на базе компьютерного эксперимента является весьма актуальным. Высокие требования, предъявляемые к новым материалам, диктуют необходимость создания и развития новых современных методов компьютерного моделирования поведения сред со структурой в экстремальных условиях нагружения.

В работе разрабатывается алгоритм рекристаллизации зеренной структуры с учетом возможности двойникового роста кристаллитов новой фазы. Так же алгоритм включает в себя механизмы для моделирования трансформации структуры, переноса тепловой энергии, теплового расширения и зарождения дефектов. В рамках гибридного дискретно-континуального метода пространство, занимаемое моделируемым образцом, представляется в виде клеточного автомата, т.е. совокупности упорядоченных активных элементов, каждый из которых имитирует неподвижную область пространства, содержащего в себе материал, и характеризуется следующими численными параметрами: теплоёмкость, теплопроводность, плотность, и др. Другие дополнительные параметры материала, используемые при моделировании, будут описаны в ходе изложения алгоритма. Отметим, что сам активный элемент клеточного автомата является неподвижным, при этом в нем развиваются потоки массы и энергии, так что активный элемент меняет свои свойства со временем.

На базе разработанного метода был проведен численный эксперимент по моделированию процесса рекристаллизации под действием термической нагрузки. 3D модель базируемая на клеточных автоматах, представлялась в виде области содержащей в себе образец с V-образным вырезом, имитирующим трещину. Явным образом учитывалось тепловое расширение образца, концентрация напряжений и возникновение микровращений вдоль межзеренных границ. Возникновение данных микровращений, в свою очередь, ведет к возникновению новых дефектов в структуре образца и увеличению местной энтропии.

Показано изменение структуры образца на поверхности трещины. Образуются новые зерна и в дальнейшем продолжают расти, образуя столбчатые структуры. Так же, было показано, что в наиболее нагретых областях происходит не только зарождение новой кристаллической структуры, но также и доля прироста упругой энергии кручения весьма значительна. В таких условиях велика вероятность зарождения двойниковых структур за счет деформации по механизму кручения.

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В КРУГЛОЙ ТРУБЕ С КОНСТРУКТИВНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ**

**А.В. Басалаев**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: alexander\_basalaev@mail.ru

**Аннотация.** Целью данной работы является исследование кинематики течения вязкой жидкости в круглой трубе с конструктивным элементом (клапаном) при помощи алгоритма SIMPLE. В ходе работы сформулирована математическая постановка задачи на основе уравнений Навье–Стокса и неразрывности; разработан численный алгоритм решения и написана программа для ЭВМ. Течение характеризуется наличием циркуляционных зон в окрестности конструктивного элемента, форма и размер которых определяется параметрами задачи. Проведены параметрические исследования влияния числа Рейнольдса и геометрии клапана на кинематические характеристики, построены критериальные зависимости.

**Ключевые слова:** течение, вязкая жидкость, круглая труба, клапан, математическое моделирование.

## **NUMERICAL MODELING OF VISCOUS FLUID FLOW IN A ROUND PIPE WITH A STRUCTURAL ELEMENT**

**A. Basalaev**

National research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: alexander\_basalaev@mail.ru

**Abstract.** The purpose of this paper is to study the kinematics of viscous fluid flow in a round pipe with a structural element (a flap) using the SIMPLE algorithm. In the course of the

work, a mathematical formulation of the problem is formulated on the basis of the Navier-Stokes equation and continuity; developed a numerical algorithm for solving and written a program for a computer. The flow is characterized by the presence of circulation zones in the locality of the structural element, the form and size of which is determined by the parameters of the problem. Parametric studies of the influence of the Reynolds number and the geometry of the flap on kinematic characteristics have been carried out, and criterion dependences have been constructed.

**Keywords:** flow, a viscous fluid, the round pipe, a flap, mathematical modeling.

## ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ВЫГОРАНИИ ЧАСТИЦ УГЛЕРОДА В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ

**Н.В. Гольдина**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: alche0809@mail.ru

**Аннотация.** На основе подхода взаимопроникающих континуумов численно решена задача о выгорании частиц углерода в воздухе в замкнутом объеме в одномерном приближении. Для описания течения смеси рассматривалась расширенная система уравнений Эйлера с учётом того, что в одной фазе происходит термохимическая реакция горения. Для получения численного решения использована разностная схема типа Годунова первого порядка точности. Потoki для газа определялись решением задачи Римана по методу Ван Ли́ра. Потoki для частиц найдены из решения задачи о распаде разрыва в среде, лишенной собственного давления. Исследовано распространение фронта горения частиц углерода в замкнутом объеме. Показано влияние размеров частиц на распространение фронта горения.

**Ключевые слова:** фронт горения, газодисперсная среда, частицы углерода, численное моделирование.

## NUMERICAL SOLUTION OF COMBUSTION OF CARBON PARTICLES IN ATMOSPHERE

**N. Gol'dina**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: alche0809@mail.ru

**Abstract:** Using the approach of interpenetrating continua, the problem of combustion of carbon particles in atmosphere in closed volume is numerically solved in one-dimensional approximation. The extended Euler equations taking into account thermochemical combustion reaction is considered to describe the suspension flow. The Godunov type difference scheme of first order approximation is used to get the numerical solution. The flux values for gas are found by solving Riemann problem according to Van-Leer method. The flux values for the particles are defined by Kraiko's method. A propagation of combustion front over carbon particles suspended in the closed volume of air is examined. The influence of particle size on the combustion front propagating is performed.

**Keywords:** combustion front, gas suspension, carbon particles, numerical solution.

Двухфазные среды, представляющие собой частный случай многофазной системы, встречаются часто как в природе, так и в технике. Примерами двухфазной системы могут являться жидкость с пузырьками газа, газ с капельками жидкости, газ с твердыми частицами и другие. Решения задач о распространении фронта горения твердой фазы многокомпонентной газовой смеси могут быть использованы для оценки чрезвычайных ситуаций на производствах, связанных с добычей угля и других полезных ископаемых, а также на складах муки и зерна, где существует проблема запыленности помещения. Поэтому моделирование и анализ подобных задач является актуальным. Экспериментальное исследование распространения ударных волн в двухфазных смесях является дорогостоящим, по сравнению с численным расчетом этих течений. Развитие вычислительной техники позволило снизить затраты на исследования и получать необходимые результаты с приемлемой точностью.

Расширенная система уравнений Эйлера с применением подхода взаимопроницающих континуумов [1] и с учетом того, что в одной фазе происходит термохимическая реакция горения позволяет описать течения газодисперсной смеси. Решение этой системы возможно с применением численных методов, подобных схеме Годунова, в которой решается задача Римана для параметров газа, а также с использованием способов нахождения потоков твердой фазы, представленных в работах А.Н. Крайко [3].

Целями данной работы является исследование выгорания частиц угля в воздушной среде в замкнутом объеме на основе численного моделирования задачи Римана для многокомпонентной газодисперсной среды.

Для получения численного решения использована разностная схема типа Годунова первого порядка точности. Для нахождения потоков газа на гранях разностной ячейки реализован метод Ван Лира, а для потоков частиц реализовано решение задачи о распаде разрыва в среде, лишенной собственного давления [3].

Реализована модель горения частиц газодисперсной многокомпонентной среды в рамках подхода взаимопроницающих континуумов. Проведено параметрическое исследование сгорания угольных частиц в воздушной среде. Показано влияние размеров частиц на развитие процесса горения в замкнутом объеме. Определено, что при радиусе частиц  $10^{-4}$  м выгорание происходит только вблизи левой стенки и фронт горения не продвигается вправо по объему в силу инерционности крупных частиц, тогда как при радиусе частиц  $10^{-5}$  м такой особенности не наблюдается.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 9.9625.2017/8.9.

## Литература

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. М.: Наука. 1987. 464 с.

2. *Toro E.F.* Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics. London New York: Springer–Verlag Berlin Heidelberg, 2009. 724 p.

3. *Крайко А.Н.* О поверхностях разрыва в среде, лишенной собственного давления // Прикладная математика и механика. 1979. Т. 43, № 3. С. 500–510.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПЛОСКИХ АЛЮМИНИЕВЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПРЕССОВАНИЕМ РИФЛЕНИЕМ**

**Е.В. Далингер, Л.Р. Ахметшин, В.А. Красновейкин, Е.Н. Москвичев**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: Lena324938@mail.ru

**Аннотация.** Основной целью работы являлось создание оснастки для модификации структуры образцов листового проката из легких сплавов на основе алюминия. Модификация крупнокристаллической структуры конструкционных легких сплавов до ультрамелкозернистого состояния необходима для улучшения их физико-механических свойств. Для подготовки оснастки в работе использованы методы математического моделирования. Проведена оценка напряженно-деформированного состояния плоских образцов в оригинальной оснастке, подобраны оптимальные размеры частей пресс-форм, определены степени накопления пластической деформации при оптимальных режимах прессования. Величина накопленной деформации в плоском образце за один цикл прессования равна 1.14. Большие степени деформации являются причиной измельчения внутренней структуры материала, что ведет к неизбежному изменению их физико-механических свойств. Увеличение циклов прессования ведет к пропорциональному увеличению степени накопленной деформации.

**Ключевые слова:** численное моделирование, большие пластические деформации, прессование рифлением.

## **NUMERICAL SIMULATION OF DEFORMATION OF FLAT ALUMINUM SPECIMENS UNDER TREATMENT BY CONSTRAINED GROOVE PRESSING**

**E. Dalinger, L. Achmetchin, V. Krasnoveikin and E. Mockvichev**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: Lena324938@mail.ru

**Abstract.** The results of theoretical estimation of capabilities of the material structure modification of 1560 aluminum alloy sheets under processing by severe plastic deformation are presented in this paper. Severe plastic deformation of flat billets is effected by the constrained groove pressing method in original dies. The numerical simulation results of the sheet billets treatment process by severe plastic deformation were used for dies designing. The stress-strain state of flat aluminum alloy billets and the steel dies at high processing temperature, support reaction force during pressing and the degrees of plastic strain accumulation at the optimum mode of pressing were estimated. As main numerical result is the value of ac-

cumulated plastic strain in the flat specimen per one pressing cycle is about 1.14. Large degrees of strain are the reasons of grain structure and material texture changes, that leads to inevitable change of its physical-mechanical properties. Increasing the number of pressing cycles leads to proportional increase of the degree of accumulated plastic strain.

**Keywords:** numerical simulation, severe plastic deformation, constrained groove pressing, mechanical properties.

Для улучшения физико-механических свойств конструкционных алюминиевых сплавов, существует множество способов обработки интенсивной пластической деформацией. Для реализации интенсивной пластической деформации в объемных образцах используют широко развитые методы обработки, такие как равноканальное угловое прессование, кручение под давлением, абс-прессование, для образцов из листового проката эти методы неприемлемы из-за их формы. Альтернативой этим методам обработки могут стать новые методы, в частности, прессование рифлением. Суть метода заключается в том, что плоские заготовки, вырезанные из листового проката, подвергаются прессованию между двух рифленых частей пресс-формы. За счет сдвига в локальных областях пластины реализуются большие степени пластических деформаций.

Для полного понимания тонкостей технологии актуален вопрос создания физико-математических моделей адекватно описывающих процесс обработки этого класса материалов для выявления тенденций напряженно-деформированного состояния в образце при обработке. Существующие теоретические оценки разных авторов имеют достаточно противоречивые результаты, что может быть причиной применения различных подходов в идеализации свойств и граничных условий при моделировании. Дополнительно, адекватная физико-математическая модель позволит оценить величины усилий при прессовании, что поможет избежать ошибок при проектировании пресс-форм и оптимизации режимов обработки.

Основной целью работы явилось выявление особенностей обработки плоских заготовок при использовании оснастки для прессования рифлением при модификации структуры листового проката из отечественного алюминиевого сплава 1560.

Для достижения поставленной цели в работе проведено численное моделирование процесса обработки плоских алюминиевых образцов методом прессования рифлением с использованием оснастки с трапециевидными зубцами. Математическая модель для решения поставленной задачи представлена системой дифференциальных уравнений механики сплошной среды с использованием упругопластической модели поведения исследуемого материала. Для решения системы уравнений применяли метод конечных элементов в Лагранжевом подходе для плоско-деформированного состояния.

На основе результатов численного моделирования проведена оценка напряженно-деформированного состояния плоских образцов в оригинальной

оснастке при температуре 497 К, определены степени накопления пластической деформации при оптимальных режимах прессования. Результаты численного решения коррелируют с аналитическими оценками в пределах допустимой погрешности. Максимальная величина накопленной пластической деформации по всей длине заготовки за один цикл обработки равна 1.14, что соизмеримо с одним циклом обработки объемных образцов при равнокавальном угловом прессовании. Большие степени деформации являются причиной измельчения внутренней структуры материала, что приводит к изменению его физико-механических свойств. Увеличение числа циклов прессования ведет к пропорциональному увеличению степени накопленной деформации. Оценена величина реактивного усилия равного 10.5 кН при прессовании заготовки площадью сечения 100 мм<sup>2</sup> и толщиной 1.5 мм. При подготовке оснастки ее размеры необходимо выбирать исходя из ширины и длины плоской заготовки и возможностей оборудования для прессования. Усилие необходимое для обработки увеличивается пропорционально площади заготовки, соответственно.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ И ПРОЦЕССА ФРАКЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРУ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ КЛАССИФИКАТОРЕ**

**Н.С. Евсеев, А.В. Шваб**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: evseevns@gmail.com

**Аннотация.** В настоящее время практически не существует промышленной отрасли, в которой бы не применялись мелкодисперсные порошкообразные материалы. Мелкодисперсные порошки нашли широкое применение в химической и атомной промышленности, стремительно развивающейся аддитивной технологии, приборостроении и других областях техники. Одновременно с развитием технологий, возрастают и требования, предъявляемые к качеству порошков. Одним из основных требований является получение порошков заданного гранулометрического состава и, одновременно, высокой эффективностью разделения на заданные фракции по размеру. Как показывает мировая практика, пневматические центробежные методы позволяют решить данную проблему наиболее эффективно. В работе проводится математическое моделирование гидродинамики, и процессов фракционного разделения мелкодисперсных частиц по размерам в воздушно-центробежном классификаторе. Моделирование закрученного турбулентного течения в ВЦК основывается на численном решении системы уравнений Рейнольдса, которая замыкается моделью турбулентности Уилкокса. Решение системы осуществляется в переменных «скорость – давление» на разнесённой разностной сетке методом физического расщепления полей скорости и давления. Диффузионные и конвективные члены уравнений переноса определяются известной экспоненциальной схемой. Расчёт процессов классификации твёрдой примеси основан на массовом расчёте одиночных частиц с учётом влияния на них турбулентных пульсаций несущей среды.

Достоверность полученных результатов подтверждается тестовыми расчётами, сравнением результатов с известными экспериментальными данными. В результате расчётов получены поля скоростей, температуры несущего газового потока, представлены траектории движения частиц с учетом турбулентных пульсаций газа, построены кривые, характеризующие эффективность процесса классификации частиц.

**Ключевые слова:** закрученные течения, турбулентность, вихревая камера, воздушно-центробежный классификатор, численное моделирование, фракционное разделение мелкодисперсных порошков.

## MODELING OF AERODYNAMICS AND PROCESS OF FRACTIONAL SEPARATION OF FINELY DISPERSED PARTICLES IN A CENTRIFUGAL CLASSIFIER

**N. Evseev and A. Shvab**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: evseevns@gmail.com

**Abstract.** At present, there is practically no industrial sector in which fine powdery materials are not used. Fine powders are widely used in the chemical and nuclear industries, the rapidly developing additive technology, instrumentation and other technical fields. Simultaneously with the development of technology, the requirements for the quality of powders are also increasing. One of the main requirements is the production of powders of a given granulometric composition and, at the same time, a high efficiency of separation into specified fractions in size. As the world practice shows, pneumatic centrifugal methods make it possible to solve this problem most effectively. In work carried out mathematical modeling of hydrodynamics, and processes of fractional separation of fine particle size in a centrifugal air classifier. Modeling swirling turbulent flow in centrifugal classifier based on a numerical solution of the Reynolds equation system, which closes the turbulence model Wilcox. The solution of the system is carried out in the variables "velocity-pressure" on the separated difference grid by the method of physical splitting of the velocity and pressure fields. Diffusion and convective terms of the transport equations are determined by the known exponential scheme. Calculation processes impurity solid classification is based on calculating the mass of individual particles in view of the influence on them of turbulent fluctuations of the carrier medium. The reliability of the results is confirmed by test calculations, by comparing the results with known experimental data. The result obtained by calculations of the velocity field, the temperature of the carrier gas flow, the particle trajectories are presented with the turbulent gas pulsations, the curves which characterizing the efficiency of the particle classification process.

**Keywords:** swirling flows, turbulence, vortex chamber, air centrifugal classifier, numerical simulation, fractional separation of fine powders.

Стремительное развитие порошковой металлургии, аддитивной технологии (в частности, SLS-технология), химической технологии, электроники и многих других отраслей промышленности тесно связано с необходимостью получения однородных порошков заданного гранулометрического состава. Одна из ключевых проблем порошковой технологии заключается

в возможности получения мелкодисперсных порошков с высокой эффективностью разделения на заданные фракции по размеру. Наиболее перспективными и эффективными методами переработки порошковых материалов являются пневматические центробежные методы. Мировой опыт применения воздушно-центробежных классификаторов (ВЦК), вихревых камер, сепараторов доказал эффективность данных методов. Как известно, математическое моделирование – перспективный метод получения информации о моделируемом физическом процессе, или явлении.

В настоящей работе проводится численное исследование аэродинамики, процессов сепарации и классификации в сепарационной камере воздушно-центробежного классификатора.

Численное моделирование закрученного турбулентного течения в сепарационной камере ВЦК основывается на численном решении системы уравнений Рейнольдса, для замыкания которой применяется известная двухпараметрическая « $k-\omega$ » модель турбулентности Уилкокса. В данной работе решение этой системы уравнений осуществляется в естественных переменных «скорость – давление» на разнесённой разностной сетке при помощи метода физического расщепления полей скорости и давления с использованием метода контрольного объёма. Диффузионные и конвективные члены уравнений переноса расписывались в конечных разностях при помощи известной экспоненциальной схемы. Расчёт процессов классификации частиц порошкового материала базируется на массовом расчёте одиночных частиц с учётом влияния турбулентных пульсаций несущей среды на твёрдые частицы.

Для получения единственного решения системы уравнений Рейнольдса, позволяющей описать закрученное течение в сепарационном элементе ВЦК необходимо задать условия на границах.

В качестве граничных условий на входе в сепарационную область задается постоянная радиальная составляющая вектора скорости, а также угловая скорость вращения газа. Граничные условия для удельной скорости диссипации  $\omega$  и кинетической энергии пульсационного движения  $k$  во входном сечении вихревой камеры определялись из экспериментальных данных для закрученных потоков.

На твёрдых границах аппарата для радиальной и аксиальной компонент вектора скорости ставились условия прилипания. Тангенциальная компонента вектора скорости задавалась при помощи условия квазитвёрдого вращения газа. Исходя из вышесказанного, значение кинетической энергии турбулентных пульсаций на твердых границах принималось равным нулю. Значение удельной скорости диссипации  $\omega$  на твёрдых стенках ВЦК сводится к балансу между диссипацией и молекулярной диффузией. На оси симметрии задавались условия симметрии.

В выходном сечении расчетной области для всех искомым переменных использовались условия установления Неймана.

В итоге получены три основных независимых критерия, определяющих гидродинамику несущего потока газа: критерий Рейнольдса  $Re$  и два критерия вращения, а именно: критерий вращения твёрдых стенок и критерий вращения несущего газового потока во входном сечении аппарата (безразмерные критерии, обратные критерию Россби).

Анализ научной литературы и экспериментальных данных показал, что изменение температурного режима может приводить к изменению физических свойств частиц некоторых спец. порошков. Поэтому, в некоторых случаях, необходимо знать уровень перепада температур на частицах таких порошков. Учитывая вышесказанное, в настоящей работе также представлен расчет теплообмена в области сепарации при турбулентном режиме течения. В работе рассматриваются относительно небольшие перепады температур несущей среды, поэтому коэффициент теплопроводности  $\lambda$  считается постоянным. Также, в силу того, что в настоящей работе рассматривается движение мелкодисперсных частиц, справедливо допущение, что температура на поверхности твёрдой частицы и температура внутри частицы одинакова.

Работоспособность представленной модели и достоверность полученных результатов подтверждается применением апробированных вычислительных методов, проведением тестовых расчётов, а также сравнением полученных результатов с известными экспериментальными данными других исследователей.

На основе численных расчётов двухфазного закрученного турбулентного течения в сепарационном элементе ВЦК получены поля скоростей и температуры несущего газового потока, произведён расчет температуры мелкодисперсных частиц, показано влияние турбулентных пульсаций несущей среды на траектории движения твёрдых мелкодисперсных частиц, построены кривые разделения Тромпа, характеризующие эффективность процесса классификации частиц по размерам. Рассмотрено влияние как режимных, так и геометрических параметров области сепарации на граничный размер и остроту процесса классификации.

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ С КОНСТРУКТИВНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ**

**В.А. Закиров**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: zakirvlad94@mail.ru

**Аннотация.** В работе приводятся результаты численного моделирования установившегося неизотермического течения ньютоновской жидкости в плоском канале с

конструктивным элементом (дроссельной заслонкой) с учетом диссипации вязкой энергии. Рассматриваемое течение описывается уравнениями сохранения количества движения, массы и энергии. На стенке выполняется условие прилипания, температура считается заданной. Скорость жидкости во входном сечении соответствует установившемуся течению с единичным расходом, а температура равно температуре стенки. В выходном сечении выполняются мягкие граничные условия. Задача решается в безразмерных переменных с использованием численного алгоритма SIMPLE. Расчеты показывают, что в области движения можно выделить зону двумерного течения в окрестности конструктивного элемента и зону одномерного течения в оставшихся частях канала. Проведены параметрические исследования влияния критериев подобия на кинематические и теплофизические характеристики потока.

**Ключевые слова:** течение, вязкая жидкость, теплопроводность, плоский канал, конструктивный элемент, математическое моделирование.

## NUMERICAL SIMULATION OF A NONISOTHERMAL FLOW OF A VISCOUS FLUID IN A PLATE CHANNEL WITH A STRUCTURAL ELEMENT

V. Zakirov

National research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: zakirvlad94@mail.ru

**Abstract.** The paper presents the results of numerical simulation of the steady nonisothermal flow of Newtonian fluid in a plane channel with the structural element (orifice plate) taking into account the energy dissipation due to fluid viscous properties. The flow under consideration is described by the equations of momentum, mass, and energy conservation. On the solid wall, the no-slip condition is assigned for the velocity vector, and the temperature is set to be constant. In the inlet section, the velocity profile corresponds to a steady flow with a fixed flow rate, and the temperature is equal to that on the wall. In the outlet section, the soft boundary conditions are used. The non-dimensional problem is solved using the SIMPLE numerical algorithm. Calculations show that the flow can be divided into two zones: a two-dimensional flow zone occurred in the vicinity of the structural element and a one-dimensional flow zone formed in the rest part of the flow. The parametric studies of the effect of similarity criteria on the flow kinematic and thermophysical characteristics are carried out.

**Keywords:** flow, viscous fluid, thermal conductivity, plate channel, structural element, mathematical modeling.

# ПРОГРАММА РАСЧЕТА ДВУМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА НА РАСЧЕТНЫХ СЕТКАХ С ЗАРАНЕЕ НЕИЗВЕСТНОЙ ТОПОЛОГИЕЙ

**К.В. Костюшин**

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики  
Томского государственного университета; Российская Федерация,  
[kostushink@niipmm.tsu.ru](mailto:kostushink@niipmm.tsu.ru)

**Аннотация.** В работе представлена методика расчета уравнений газовой динамики в газодинамических трактах ракетных двигателей, основанная на использовании схемы Годунова. Для реализации алгоритма расчета предложена система хранения данных не зависящая от топологии расчетной сетки, что позволяет использовать расчетные сетки с произвольным числом граней расчетной ячейки. Описаны алгоритмы построения блочно-структурированных и неструктурированных расчетных сеток. Алгоритм расчета реализован в виде программного комплекса.

**Ключевые слова:** CFD, сопло Лаваля, ракетный двигатель.

## A PROGRAM FOR CALCULATING TWO-DIMENSIONAL GAS FLOW AT THE MESHES WITH ARBITRARY NUMBER OF CELL FACES

**K. Kostyushin**

Scientific Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics by  
Tomsk State University; Russia  
[kostushink@niipmm.tsu.ru](mailto:kostushink@niipmm.tsu.ru)

**Abstract.** In the present study calculation methodology of gas dynamics equations in rocket engine is presented. The algorithm is based on Godunov's scheme. For realization of calculation algorithm, the system of data storage is offered, the system does not depend on mesh topology, and it allows to use the computational meshes with arbitrary number of cell faces. The algorithm of building a block-structured grid is given. Calculation algorithm is implemented in the software package "FlashFlow".

**Keywords:** CFD, Laval nozzle, rocket engine.

В настоящее время прорабатываются различные типы компоновок двигательных установок ракетной техники. Одной из таких схем является прямоточный воздушно-реактивный двигатель (ПВРД). В связи со сложностью конструкции и многообразием физико-химических процессов, протекающих в ПВРД, для получения локальных и интегральных характеристик, необходимо проведение комплексных численных расчетов течения рабочих тел в воздухозаборнике, камере сгорания, сопловом блоке и истекающей струе. При проведении таких расчетов важную роль играет топология и размер расчетной сетки. В областях простой формы можно обойтись использованием одноблочной структурированной сетки. Однако для решения уравнений газовой динамики для областей сложной формы, характерных для ПВРД необходимо использовать либо неструктурирован-

ные сетки, или блочно-структурированные сетки. При использовании блочно-структурированных сеток приходится разбивать расчетную область на простые подобласти. В каждой подобласти строится структурированная сетка, затем проводится стыковка расчетных сеток между подобластями. Общим недостатком сеток, используемых при расчетах в областях сложной формы, является зависимость алгоритма решателя от топологии расчетной сетки. В этом случае при малейшем изменении шаблона расчетной сетки (изменение количества граней ячейки, формы и положения подобластей) необходимо вносить изменения в алгоритм решателя. Для решения таких задач разработан программный комплекс «FlashFlow», позволяющий проводить расчеты на сетках с произвольным количеством граней расчетной ячейки.

Программный комплекс имеет модульную структуру и состоит из следующих частей:

- модуль построения геометрии газодинамических трактов;
- модуль профилирования сверхзвуковой части сопловых блоков ракетных двигателей;
- модуль построения и стыковки расчетных сеток;
- модуль задания граничных условий;
- модуль задания начальных условий;
- модуль проведения расчетов;
- модуль визуализации;
- модуль расчета энерготяговых и эксплуатационных характеристик.

Модуль построения геометрии газодинамических трактов позволяет пользователю ввести или импортировать опорные точки, строить и интерполировать различными способами границы, а также объединять границы в расчетные области.

Модуль профилирования сопловых блоков ракетных двигателей, проводит профилирование сверхзвуковой части сопловых блоков ракетного двигателя на заданные высотные характеристики. Профилирование проводится методом неопределенного контрольного контура.

Модуль построения расчетных сеток позволяет строить структурированные и неструктурированные расчетные сетки в областях, а также проводить их стыковку. Структурированные сетки строятся путем равномерного распределения узлов на границах расчетных областях, сглаживаются с использованием алгоритма, основанного на решении уравнений Лапласа. Неструктурированные сетки строятся с использованием алгоритмов SweepLine либо Dwyer. Также реализованы алгоритмы контроля качества сеток, в том числе ограничения на минимальные и максимальные углы и площади ячеек.

Модуль задания граничных условий позволяет задавать граничные условия на внешних границах расчетных областей. Реализованы следующие типы граничных условий: твердая стенка, ось симметрии, сверхзвуковой

вход, дозвуковой вход, сверхзвуковой выход, давление, газоприток с поверхности горения.

Модуль задания начальных условий позволяет задавать начальное распределение параметров газа в расчетных областях.

Модуль проведения расчетов основан на решении уравнений газовой динамики в двумерной постановке методами Годунова и Годунова-Колгана, с использованием алгоритмов, адаптированных к произвольному количеству границ в ячейках.

Верификация работы программного комплекса проведена путем сравнения с известными решениями.

## **ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ОТ ТОЛЩИНЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ**

**М.В. Кукурика, К.М. Зингерман**

Тверской государственный университет, Россия  
E-mail: maria.kukurika@gmail.com

**Аннотация.** Проведено исследование усложненного варианта волны Стоунли и определена зависимость скорости распространения данной поверхностной волны в зависимости от толщины поверхностного слоя. В частности, показано, что чем тоньше слой материала, тем выше скорость волны.

**Ключевые слова:** поверхностные волны, распространение, скорость.

## **DEPENDENCE OF THE SPEED OF THE SURFACE ACOUSTIC WAVE DISTRIBUTION FROM THICKNESS OF THE SURFACE LAYER**

**M. Kukurika and K. Zingerman**

Tver State University, Russian Federation  
E-mail: maria.kukurika@gmail.com

**Abstract.** A study of a complicated version of the Stoneley wave was carried out and the dependence of the propagation velocity of a given surface wave as a function of the thickness of the surface layer was determined. In particular, it is shown that the thinner the material layer, the higher the speed of the wave.

**Keywords:** surface waves, propagation, velocity.

В настоящее время поверхностные акустические волны являются важным объектом исследования в сейсмологии и сейсморазведке, так как это основной тип волн, который наблюдается при землетрясениях и взрывах. Распространяясь по поверхности, они затухают медленнее, чем объемные

волны. В технике поверхностные волны используются для диагностики и контроля качества поверхности и приповерхностного слоя образцов.

Поверхностные акустические волны – это упругие волны, которые распространяются вдоль свободной поверхности твердого тела или вдоль границы твердого тела с другими средами, и затухающие при удалении от этих самых границ. Энергия поверхностных волн сосредоточена в узком слое вблизи поверхности, поэтому они в меньшей степени подвергаются затуханию в направлении своего движения, чем волны в неограниченной среде, а также могут распространяться на большие расстояния [1].

Для определения зависимости скорости распространения волны от толщины поверхностного слоя в работе исследовался усложненный вариант волны Стоунли [2]. Этот тип волн распространяется вдоль границы двух жестко склеенных твердых сред, модули упругости и плотности которых различаются незначительно. В отличие от классической волны Стоунли, которая распространяется вдоль границы двух упругих полупространств, исследовалась волна, распространяющаяся вдоль границы упругого полупространства и слоя конечной толщины. Для расчета характеристик волны были разработаны математическая модель, описывающая распространение монохроматической волны в рамках линейной теории упругости, алгоритм и программа в среде Maple, позволяющие составить и решить дисперсионное уравнение. Исследование зависимости скорости волны от толщины слоя проведено на основе вычислительных экспериментов.

Для проведения модельных расчетов были выбраны следующие материалы: материал полупространства – полиэтилен с модулем сдвига 0.117 Гпа, плотностью  $950 \text{ кг/м}^3$ ; материал слоя – медь с модулем сдвига 45.5 Гпа, плотностью  $8900 \text{ кг/м}^3$ .

В таблице ниже приведены результаты вычислительных экспериментов.

Толщина слоя, м	Скорость волны, м/с
1.5	65.12599324
1.3	80.18745801
1	97.67708499
0.8	106.5980334
0.5	134.4984092
0.3	150.1662378

Таким образом, видно, что чем тоньше поверхностный слой, в котором распространяется поверхностная волна, тем выше ее скорость.

Работа частично выполнялась в рамках базовой части госзадания Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 9.7446.2017/8.9).

## Литература

1. *Gubaidullin AA, Boldyreva O.Yu.* Propagation of surface acoustic waves along the free boundary of a saturated porous medium. // *Applied Mechanics and Technical Physics*, 2009. T. 50, No. 5. P. 46–55.

2. *Zingerman K.M.* Estimation of the error of the approximate formula for the Stoneley wave velocity // *Logging. Scientific and technical bulletin*. 2007. Issue. 16. P. 85–89.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВНЕДРЕНИЯ УДАРНИКА С ОЖИВАЛЬНОЙ ГОЛОВНОЙ ЧАСТЬЮ В СТАЛЬНУЮ ПРЕГРАДУ С ГРАДИЕНТНОЙ ПОДЛОЖКОЙ

**М.Ю. Орлов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: orloff\_m@mail.ru

**Аннотация:** Исследована ударная стойкость стальной преграды с градиентной подложкой при пробитии ударником до 700 м/с. Градиентная подложка определенного рецептурного состава занимала 1/3 толщины преграды и располагались ближе к тыльной поверхности. Процесс соударения моделировался в упругопластической осесимметричной постановке при помощи модифицированного лагранжевого метода. Результаты расчетов получены текущими конфигурация, а также в табличном и графическом видах. Выявлен диапазон скоростей удара, где наличие подложки повышало ударную стойкость преграды.

**Ключевые слова:** функционально-градиентный материал, ударник, преграда, разрушение, ударная стойкость.

## NUMERICAL SIMULATION OF PERFORATING STEEL PLATE WITH GRADED SUBSTRATE BY PROJECTILE

**M.Yu. Orlov**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: orloff\_m@mail.ru

**Abstract:** The impact resistance of a steel barrier with a graded substrate was investigated when the projectile penetrated up to 700 m/s. A graded substrate with a linear shear strength change took up 1/3 of the thickness of the barrier. Penetration was modeled in an elastoplastic formulation by a modified lagrangian method. The calculation results obtained in the form of current configurations, graphs and tables. A range of velocities was detected, where the presence of a substrate increased the impact resistance of the barrier.

**Keywords:** functionally graded material, projectile, target, destruction, impact resistance.

Постоянное совершенствование средств кинетического воздействия на защищаемые конструкции заставляет разработчиков новых противоударных защит искать принципиально новые пути по повышению их ударной

стойкости. Известно, что прочностные свойства традиционных конструкционных материалов ограничены, а использование слоистых, слоисто-скрепленных преград не всегда возможно [1]. С развитием технологий порошковой металлургии стало возможным создавать материалы с градиентным распределением прочностных свойств. Сегодня такие материалы называются функционально-градиентными (ФГМ) и согласно [3] практически не изучены в условиях ударных нагрузок. Поэтому научный интерес представляют исследования поведения ФГМ в динамических условиях.

Настоящая работа является логическим продолжением [3], где была повышена ударная стойкость стальной преграды за счет наличия градиентной подложки при соударении с однородной пластиной (до 300 м/с). Объектом исследования выбрана стальная преграда с градиентной подложкой толщины 1/3 образца. В данном случае сдвиговая прочность увеличивалась в интервале от 45 до 55 кДж/кг. Интервал изменения сдвиговой прочности соответствует реальным стальным сплавам, причем нижняя граница соответствовала критическому значению для нелегированной стали. Ударник – сердечник немецкой пули 6,1Smk. Диапазон начальных скоростей варьировался от 300 до 700 м/с.

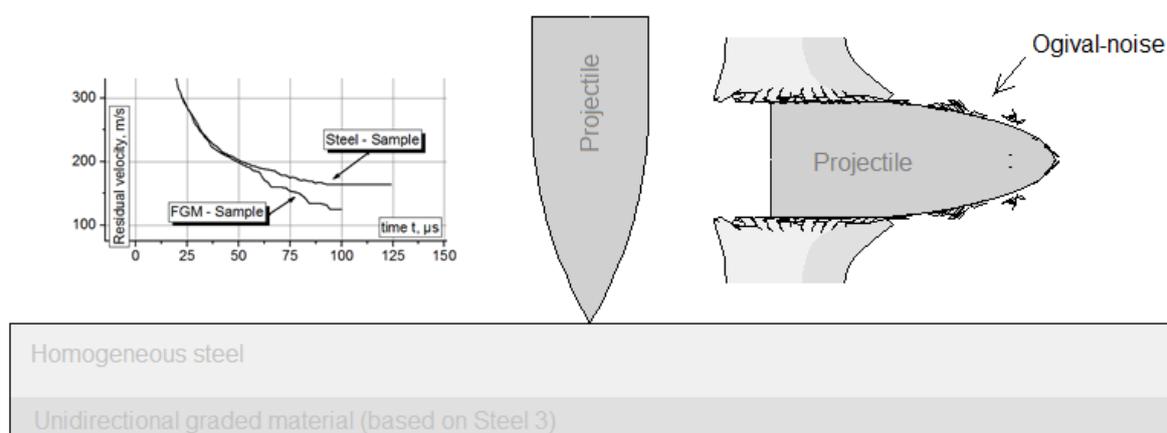


Рис. 1. Результаты вычислительных экспериментов: зависимость скорости ударника от времени для однородного и градиентного образцов при  $V = 500$  м/с, исходная ( $t = 0$   $\mu$ s) конфигурация тел, текущая конфигурация ( $t = 90$   $\mu$ s) пробития градиентного образца при  $V = 475$  м/с

Поведение материалов описывается с позиций феноменологической макроскопической модели механики сплошных сред на основе фундаментальных законов сохранения. Упругопластическое поведение материала описывается определяющими соотношениями Прандтля – Рейса при условии текучести Мизеса. Уравнение состояния выбрано в форме Уолша. Расчеты проведены в осесимметричной постановке при помощи модифицированного численного лагранжевого метода. Оригинальность метода заключается в новом способе выделения поверхностей разрыва сплошности ма-

териалов, который не накладывает серьезных ограничений на решение многоконтактных динамических задач МДТТ.

Результаты расчетов представлены текущими и конечными конфигурациями процесса, которые производят процесс пробития на всех стадиях, временными зависимостями скорости ударника, гидродинамического давления в контрольных точках, поврежденности материалов (рис. 1). Было вычислено время процесса внедрения, баллистический предел, диаметр пробоины и укорочение ударника. Баллистический предел составил 435 м/с, а время процесса пробития достигало  $\sim 175$  мкс, при этом диаметр сквозной пробоины практически совпадал с исходным диаметром ударника.

Было установлено, что наличие градиентной подложки предложенного рецептурного состава, расположенной ближе к тыльной стороне преграды, увеличивало ударную стойкость преграды до 15%.

### Литература

1. Johnson E.A., Saleh M., Edwards L. Ballistic performance of multy-layered metallic plates by a 7.62 mm APM2 projectile // International Journal Impact Engenering. (2011), Vol. 38, pp. 1022–1032.

2. Lu M., Chekroun O. Abraham V. Maupin and G. Villain Mechanical properties estimation of functionally graded materials using surface waves recorded with a laser interferometer // NDT & E International, Volume 44, Issue 2, March 2011, pp. 169–177.

3. Орлов М.Ю., Голубятников В.В. Численное моделирование процесса соударения однородного ударника со стальной пластиной с градиентной подложкой до 300 м/с // Труды Томского государственного университета. Т. 300. Серия физико-математическая. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2017. С. 117–126.

## ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СВЕРХЗВУКОВОМ ТЕЧЕНИИ ГАЗА В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ С ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ ВЕРХНЕЙ СТЕНКОЙ

**Е.В. Перчаткина**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия

E-mail: perchatkinae@mail.ru

**Аннотация.** В данной работе решается задача о сверхзвуковом течении газа в плоском канале с подвижной непроницаемой для газа верхней границей, совершающей колебания по гармоническому закону. Для получения численного решения уравнений газовой динамики реализована разностная схема с использованием расчета потоков по методу Ван Лиры первого порядка аппроксимации по пространству и времени. Приведена форма записи потоков уравнений газовой динамики в подвижной криволинейной системе координат, позволяющая вычислять потоки на гранях ячеек разностной сетки по методу Ван Лиры. Изучены особенности распространения косога скачка уплотнения в подвижной криволинейной области в зависимости от вида гармонического закона и начальных условий втекания газа в рассматриваемую область. Установлено, что при

определенной частоте, наличие колебания стенки практически не сказывается на характере течения внутри области. Проведенное сравнение численного решения, полученного по созданной программе, с численным решением, полученным с помощью решателя Ansys Fluent, показало корректность работы созданной программы.

**Ключевые слова:** косой скачок уплотнения, подвижная криволинейная система координат, метод Ван Лира.

## NUMERICAL SOLUTION FOR THE PROBLEM OF SUPERSONIC GAS FLOW IN 2-D CHANNEL WITH THE OSCILLATING UPPER WALL

**E. Perchatkina**

National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: perchatkinae@mail.ru

**Abstract.** In the present paper we solve the problem of supersonic gas flow in two-dimensional channel with the moving upper gas proof boundary making oscillations according to the harmonic law. In order to get a numerical solution for gas dynamics equations we have implemented the difference scheme with space and time approximation of the first order using Van Leer's method of flux computation. A special form of fluxes in the gas dynamics equations is given, which enables to calculate fluxes on cell faces of difference mesh using Van Leer's method. Depending on a type of harmonic law and initial gas inflow conditions, the peculiarities of angle-shock wave propagation in moving curvilinear fields have been investigated. It has been determined that under a particular oscillation frequency the presence of wall oscillation practically doesn't have an effect on the flow regime inside the field. While comparing the numerical solution obtained due to our program with the one obtained with Ansys Fluent solver we found that the constructed problem operates correctly.

**Keywords:** oblique compression shock, a movable curvilinear coordinate system, the Van Lyra method.

Сопла сложной конфигурации, как составные части реактивных двигателей, довольно распространены в настоящее время в различных областях авиа- и ракетостроения. Например, сопла с регулируемым выходным сечением, оптимизирующие работу реактивных двигателей при различных скоростях и режимах истечения из сопла, а также поворотные сопла с возможностью изменения вектора тяги. При полете ракет всегда наблюдается возникновение различных вибраций корпуса и составных частей ракеты: от механических вибраций, вызванных в самом начале запуском ракетных двигателей, до вибраций, возникающих во время полета при сверхзвуковых скоростях вследствие аэродинамических нагрузок (так называемое явление флаттера). В данной работе рассматривается задача о сверхзвуковом течении газа в плоском канале, с двух сторон ограниченном твердыми непроницаемыми стенками, при наличии колебания верхней стенки, совершаемого по гармоническому закону.

Существует два наиболее распространенных подхода к решению задач газовой динамики в областях с произвольной геометрией [1–4]. Суть первого подхода заключается в построении сетки, ячейки которой, ввиду криволинейности границ расчётной области, могут иметь произвольную форму, чаще форму многоугольников [4]. Это в значительной степени осложняет расчеты и увеличивает количество времени, требуемое для решения. Основная идея второго подхода состоит в предварительном преобразовании уравнений к криволинейной системе координат, что в дальнейшем позволяет построить более простую сетку, ячейками которой будут являться прямоугольники, ориентированные по координатным осям. В данной работе реализуется второй подход.

Известно, что при движении тел со звуковыми и сверхзвуковыми скоростями, происходит образование разрывов газодинамических параметров [5] и, как следствие, для решения таких задач необходимы специальные методы, позволяющие вычислять значения параметров состояния системы при распаде произвольного разрыва. Один из таких методов является метод Ван Лира [6]. Преимущество данного метода состоит в сравнительно небольших временных затратах при одновременном получении достаточно точного решения (при сравнении с методом Годунова). Однако, при переходе в криволинейную систему координат, для реализации метода необходимы дополнительные преобразования [7].

Целью данной работы является изучение особенностей течения газа в криволинейных областях с подвижными границами в зависимости от начальных условий втекания газа в область, а также вида гармонического закона колебания стенки. Главным образом рассматривается образование и распространение косых ударных волн и волн разряжения.

1. Для численного решения уравнений газовой динамики в данной задаче применена разностная схема первого порядка аппроксимации с использованием расчета потоков по методу Ван Лира для двумерной области.

2. Получена форма записи расщепления потоков по методу Ван Лира для подвижной криволинейной системы координат.

3. Изучены особенности распространения косого скачка уплотнения в области при наличии колебания верхней границы в зависимости от вида гармонического закона, по которому совершается это колебание.

4. Установлено, что при определенной амплитуде, колебание стенки в большей степени не сказывается на характере течения в рассматриваемой области.

5. Проведенное сравнение численного решения, полученного по созданной программе, с численным решением, полученным с помощью решателя Ansys Fluent, показало корректность работы созданной программы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 9.9625.2017/8.9.

## Литература

1. Численное моделирование течений в турбомашинах / С.Г. Черный [и др.]. Новосибирск: Наука, 2006. 202 с.
2. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: в 2 т.: пер. с англ. / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер. М.: Мир, 1990. Т. 1. 384 с.
3. Vinokur M. Conservation equations of gas dynamics in curvilinear coordinate systems // J. Comput. Phys. 1974, №14. С. 105–125.
4. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов [и др.]. М.: Наука, 1976. 400 с.
5. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика: в 2 т. М.: Наука, 1991. Т. 1. 600 с.
6. Toro E.F. Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics. London; New York : Springer–Verlag Berlin Heidelberg, 2009. 724 p.
7. Кисарова С.Ю. Математическое моделирование нестационарных газодинамических процессов, сопряженного теплообмена и воспламенения конденсированных веществ в каналах сложной формы: дис. ... канд. ф.-м. наук. Ижевск, 1995. 160 с.

## РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВБЛИЗИ ВЯЗКОУПРУГОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ В СЛУЧАЕ КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Д.А. Шавырин<sup>1</sup>, К.М. Зингерман<sup>2</sup>

ООО «ЭПАМ СИСТЭМЗ», филиал в гор. Твери.  
Тверской государственный университет.  
E-mail: shavyrin\_dmitriy@mail.ru

**Аннотация.** Предложен подход к расчету напряженно-деформированного состояния в бесконечно протяженном вязкоупругом теле с круговым вязкоупругим включением при конечных плоских деформациях. Предполагается, что на границе включения с остальной частью тела (матрицей) выполнены условия идеального контакта.

Для описания механических свойств материалов матрицы и включения использованы определяющие соотношения трех типов: 1. Модель физически линейного вязкоупругого материала, обобщающая на случай конечных деформаций модель стандартного вязкоупругого тела (модель Зенера). 2. Модель сжимаемого физически нелинейного материала, обобщающая на случай вязкоупругости определяющие соотношения Мурнагана для изотропного нелинейно-упругого материала. 3. Модель несжимаемого резиноподобного материала, обобщающая на случай вязкоупругости определяющие соотношения для неогукковского материала. Все перечисленные определяющие соотношения представлены в виде интегралов типа свертки по времени от тензорных характеристик деформаций. Расчет выполнен для случая периодического квазистатического нагружения с использованием приближенных аналитических методов: метода возмущений, преобразования Лапласа, метода Колосова-Мухомелишвили. При реализации метода возмущений учтены линейные и квадратичные эффекты. В качестве малого параметра выбрано отношение величины нагрузки на бесконечности к одному из модулей, характеризующих мгновенно-упругие свойства материала матрицы.

Расчеты выполнены с использованием специализированного программного обеспечения, разработанного авторами в среде системы компьютерной алгебры Maple. Приве-

дены некоторые результаты расчетов, дана оценка нелинейных эффектов. Исследовано влияние параметров периодического нагружения на напряженно-деформированное состояние.

**Ключевые слова:** вязкоупругость, включение, конечные деформации, плоская деформация, периодическое нагружение, компьютерная алгебра.

## ANALYSIS OF STRESSES NEAR A VISCOELASTIC INCLUSION UNDER PERIODICAL LOADING FOR FINITE STRAINS

**D. Shavyrin and K. Zingerman**

EPAM Systems Ltd.  
Tver State University, Russian Federation  
E-mail: shavyrin\_dmitriy@mail.ru

**Abstract.** An approach for stress analysis in an infinite viscoelastic body containing circular viscoelastic inclusion is developed for finite plane strains. It is assumed that ideal contact conditions are specified on the boundary of the inclusion.

Three types of constitutive equations are used in order to describe the mechanical properties of matrix and inclusion materials.

1. The model of physically linear viscoelastic material that generalizes Zener's model (the model of standard linear viscoelastic solid) to the case of finite strains.

2. The model of compressible physically nonlinear viscoelastic material that generalizes the Murnaghan constitutive equations for isotropic nonlinear elastic material to the case of viscoelasticity.

3. The model of incompressible rubber-like material that generalizes the neo-Hookean constitutive equations to the case of viscoelasticity.

All these constitutive equations are written in the form of convolution integrals of strain measures over time.

The computations are performed for periodical quasi-static loading. The approximate analytical methods are used: the perturbation technique, the Laplace transform, and Kolosov-Muskhelishvili's method. The first- and the second-order effects are taken into account in the implementation of the perturbation technique. The loading at infinity referred to an instantaneous elastic modulus of the matrix material is chosen as a small parameter.

The computations are performed using special-purpose software that is developed by the authors using Maple computer algebra system. Some results of computations are given, and the nonlinear effects are estimated. The impact of parameters of periodical loading on the state of stress and strain is investigated.

**Keywords:** viscoelasticity, inclusion, finite strains, plane strain, periodical loading, computer algebra.

Предложен подход к расчету напряженно-деформированного состояния в бесконечно протяженном вязкоупругом теле с круговым вязкоупругим включением при конечных плоских деформациях, когда на бесконечности к телу приложены периодически изменяющиеся во времени нагрузки. Подход может быть использован при моделировании деформации вязкоупругих волокнистых композитов с однонаправленными волокнами в

плоскости, перпендикулярной направлению волокон. Новизна подхода определяется учетом нелинейных эффектов, обусловленных конечностью деформаций, в приближенном аналитическом решении для изменяющихся во времени нагрузок. Предполагается, что на границе включения с остальной частью тела (матрицей) выполнены условия идеального контакта. Для описания механических свойств материалов матрицы и включения использованы определяющие соотношения трех типов:

1. Модель физически линейного вязкоупругого материала, обобщающая на случай конечных деформаций модель стандартного вязкоупругого тела (модель Зенера) [1, 2].

2. Модель сжимаемого физически нелинейного материала [3], обобщающая на случай вязкоупругости определяющие соотношения Мурнагана [4] для изотропного линейно-упругого материала.

3. Модель несжимаемого резиноподобного материала [5], обобщающая на случай вязкоупругости определяющие соотношения для неогукковского материала.

Все перечисленные определяющие соотношения представлены в виде интегралов типа свертки по времени от тензорных характеристик деформаций.

Расчет выполнен для квазистатического нагружения с использованием приближенных аналитических методов: метода возмущений, преобразования Лапласа, метода Колосова–Мухомелишвили [6–12]. При реализации метода возмущений учтены линейные и квадратичные эффекты. В качестве малого параметра выбрано отношение величины нагрузки на бесконечности к одному из модулей, характеризующих мгновенно-упругие свойства материала матрицы.

Расчеты выполнены с использованием специализированного программного обеспечения, разработанного авторами в среде системы компьютерной алгебры Maple. Приведены графики распределения напряжений в теле в различные моменты времени, графики, показывающие изменение формы включения со временем. Дана оценка эффектов геометрической и физической нелинейности. Исследовано влияние параметров периодического нагружения на напряженно-деформированное состояние.

Полученные результаты могут быть использованы, в частности, для нахождения эффективных механических характеристик вязкоупругих композитов [8, 13].

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки России в рамках базовой части Государственного задания (проект № 9.7446.2017/8.9).

## Литература

1. *Ильюшин А.А., Победря Б.Е.* Основы математической теории термовязкоупругости. М.: Наука, 1970. 280 с.

2. *Кристенсен Р.* Введение в теорию вязкоупругости. М.: Мир, 1974. 338 с.
3. *Левин В.А.* Многократное наложение больших деформаций в упругих и вязкоупругих телах. М.: Физматлит, 1999. 224 с.
4. *Лурье А.И.* Нелинейная теория упругости. М.: Наука, 1980. 512 с.
5. *Адамов А.А., Матвеев В.П., Труфанов Н.А., Шардаков И.Н.* Методы прикладной вязкоупругости. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 411 с.
6. *Громов В.Г., Толоконников Л.А.* К вычислению приближений в задаче о конечных плоских деформациях несжимаемого материала // Изв. АН СССР. Отделение технических наук, сер. Механика и машиностроение. 1963. № 2. С. 81–87.
7. *Мухелишвили Н.И.* Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966. 709 с.
8. *Левин В.А., Зингерман К.М.* Нелинейная вычислительная механика прочности / под общ. ред. В.А. Левина. Т. III: Точные и приближенные аналитические решения при конечных деформациях и их наложении. М.: Физматлит, 2016. 400 с.
9. *Levin V.A., Zingerman K.M.* A class of methods and algorithms for the analysis of successive origination of holes in a pre-stressed viscoelastic body. Finite strains // Communications in Numerical Methods in Engineering. 2008. Vol. 24. Is. 12. P. 2240–2251.
10. *Zingerman K.M., Shavyrin D.A.* Approximate analytical solution for the problem of an inclusion in a viscoelastic solid under finite strains // Mechanics of Time-Dependent Materials 2015, DOI 10.1007/s11043-015-9288-2.
11. *Шавырин Д.А.* Аналитическое решение плоской задачи о квазистатической деформации бесконечно протяжённого вязкоупругого тела с круговым вязкоупругим включением средствами компьютерной алгебры // Вестн. Твер. гос. ун-та. Серия: Прикладная математика. Вып. 1 (28). 2013. Тверь: Твер. гос. ун-т, 2013. С. 45–53.
12. *Шавырин Д.А., Зингерман К.М.* Учет несжимаемости материала при расчете напряжений вблизи вязкоупругого включения в вязкоупругом теле при конечных деформациях // Вестн. Твер. гос. ун-та. Сер.: Прикладная математика. 2016, № 2. С. 107–121.
13. *Светашков А.А., Куприянов Н.А., Манабаев К.К.* Эффективные по времени вязкоупругие модули типа Хашина-Штрикмана // Физическая мезомеханика. 2013. Т. 16. № 2. С. 33–39.

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ В СНЕЖНОМ МАССИВЕ ПРИ НАГНЕТАНИИ ХОЛОДНОГО ГАЗА**

**О.А. Шепелькевич, А.С. Чиглинцева, А.А. Русинов**

Башкирский государственный университет, Россия  
E-mail: oleg\_rt1@mail.ru

**Аннотация.** Решена задача в осесимметричном приближении о нагнетании в снежный массив гидратообразующего газа (метана), в исходном состоянии поры которого насыщены тем же газом. Построены автомодельные решения, описывающие поля температур, давлений и насыщенностей гидрата в снежном массиве. Показано, что при образовании гидрата в области фильтрации возможно возникновение трех характерных зон: «гидрат+газ», «гидрат+снег+газ» и «снег+газ». Установлено, что с ростом массового расхода газа происходит увеличение протяженности объемной зоны образования гидрата.

**Ключевые слова:** гидратообразование, газовый гидрат, осесимметричная постановка, снежный массив, нагнетание газа.

## MATHEMATICAL MODELING OF THE HYDRATE FORMATION PROCESS IN THE SNOW MASSIF WITH THE INJECTION OF COLD GAS

O. Shepelkevich, A. Chiglintseva and A. Rusinov

The Bashkir State University, Russian Federation  
E-mail: oleg\_rt1@mail.ru

**Abstract.** The problem is solved in the axisymmetric approximation of the injection of hydrate-forming gas (methane) into the snow massif, in the initial state, the pores of which are saturated with the same gas. Self-similar solutions are constructed that describe the temperature, pressure, and saturation fields of hydrate in a snow massif. It is shown that when forming a hydrate, three characteristic zones are possible: "hydrate + gas", "hydrate + snow + gas" and "snow + gas". It has been established that with increasing mass flow of gas, the region of complete transition of snow into a hydrated state increases.

**Keywords:** hydrate formation, gas hydrate, axisymmetric setting, snow mass, gas injection.

**Актуальность.** Как известно, газовые гидраты – это кристаллические соединения, образованные молекулами воды и основными компонентами природного газа. Так как 1 м<sup>3</sup> гидрата может содержать до 180 объемов газа, его можно использовать как удобную форму для захоронения и утилизации парниковых, радиоактивных, промышленных и других газов тем самым предотвращая выбросы вредных веществ в атмосферу [1, 2]. Поэтому во многих лабораториях, научных центрах и энергетических компаниях всего мира проводятся исследования возможности освоения этих ресурсов [3].

В данной работе построена математическая модель процесса нагнетания гидратообразующего газа (метана) в чистый снежный массив конечной протяженности, насыщенный тем же газом. Представляется, что через пробуренную в массиве скважину, снегонасыщенность которого  $S_{i0}$ , закачивается газ, с постоянным массовым расходом  $Q_g$  при постоянной температуре  $T_g$ . В результате чего образуются три характерные зоны: «гидрат+газ», «гидрат+снег+газ» и «снег+газ». Соответственно возникают две фронтальные границы: между дальней и промежуточной зонами, где начинается переход снега в состав гидрата, и между ближней и промежуточной зонами, на которой заканчивается процесс образования гидрата.

Данная задача имеет автомодельное решение, т.е. параметры, описывающие процесс, могут быть выражены как функции автомодельной коор-

динаты:  $\xi = x / \left( 2\sqrt{\chi_0^{(p)} t} \right)$  ( $\chi_0^{(p)} = k_g p_0 / (S_{g0} \mu_g)$  – коэффициент пьезопроводности). Построены, с использованием метода линеаризации Лейбензона, аналитические решения для ближней и дальней областей, описывающие распределения температуры и давления в массиве. Для промежуточной области получена система из трех обыкновенных дифференциальных уравнений.

Исходные значения температуры снежного массива, насыщенного газом, и нагнетаемого газа принимались соответственно равными  $T_0 = 225\text{K}$ ,  $T_g = 225\text{K}$ , начальная снегонасыщенность –  $S_{i0} = 0.3$ , проницаемость массива –  $k = 10\text{М}^5 \cdot \text{с}^{-2}$ .

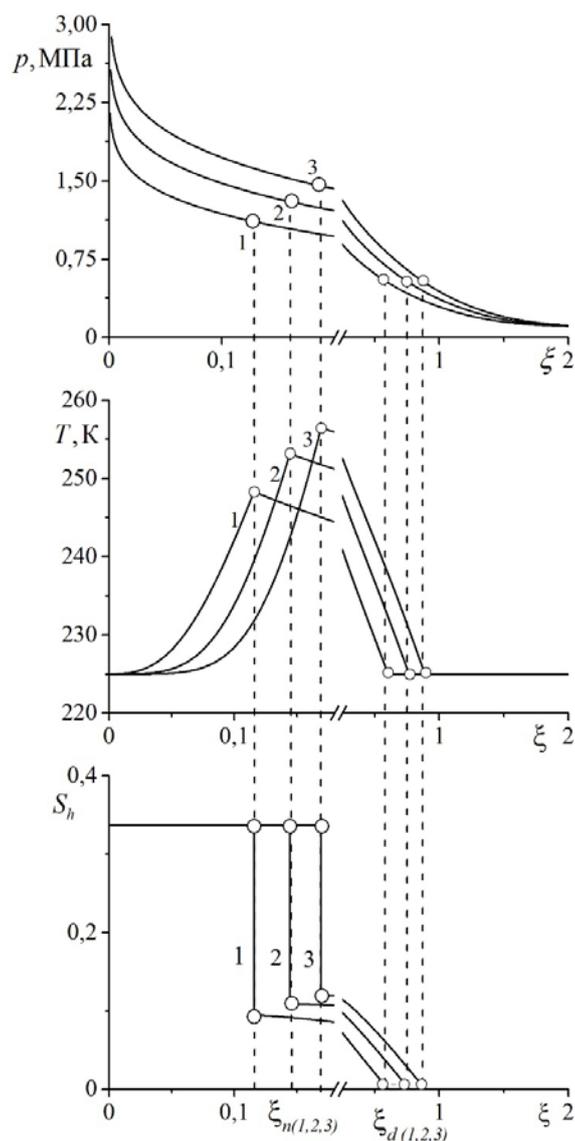


Рис. 1. Распределение давления, температуры и гидратонасыщенности в пласте при различных массовых расходах газа ( $Q_g$ ): 1 – 0.002; 2 – 0.003; 3 – 0.004 кг/м · с

Зависимость полей температуры, давления и насыщенности гидрата в массиве от массового расхода газа иллюстрируется на рис. 1. Из графиков видно, что в промежуточной зоне, где происходит образование гидрата, гидратонасыщенность не постоянна, и монотонно меняется вдоль координаты  $\xi$  и на ближней границе ( $\xi = \xi_{(n)}$ ) снег полностью переходит в состав гидрата, при этом гидратонасыщенность терпит скачок и принимает максимальное значение  $S_{h(e)} \approx 0.34$  в ближней зоне, которая представляет собой достаточно тонкий слой. Показано, что с ростом расхода газа  $Q_g$  в диапазоне значений от 0.002 до 0.004 процесс гидратообразования происходит интенсивнее, поскольку увеличивается давление нагнетания газа, вследствие чего максимальная температура, реализуемая в массиве, растет, при этом протяженность объемной зоны образования гидрата увеличивается.

**Выводы.** Предложена теоретическая модель процесса нагнетания гидратообразующего газа в снежный массив, насыщенный тем же газом, в осесимметричной постановке. Построены автомодельные решения, описывающие распределения основных параметров в массиве. Показано, что с увеличением массового расхода газа протяженность зоны образования гидрата увеличивается, при этом максимальная температура, реализуемая в массиве растет.

### Литература

1. Бондарев Э.А., Рожин И.И., Попов В.В., Аргунова К.К. Оценка возможности подземного хранения гидратов природного газа в зоне многолетней мерзлоты // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX, № 4. С. 64–74.
2. Левицкий И.Н., Силинский А.В., Гульков А.Н. Использование газовых гидратов в различных технологиях (обзорная статья) // Научный альманах, №12-2(14), 2015. С. 111–116.
3. Егоров А.В., Рожков А.Н., Вогт П.Р., Крейн К. Газогидраты непосредственно на морском дне. Природное явление и теоретическое обоснование. М.: Институт проблем механики. РАН, 2012. 22 с.
4. Khasanov M.K. Investigation of regimes of gas hydrate formation in a porous medium, partially saturated with ice // Thermophysics and Aeromechanics. 2015. Vol. 22. No. 2. P. 245–255.
5. Нурисламов О.Р., Шагапов В.Ш. Нагнетание газа во влажную пористую среду с образованием газогидрата // ПММ. 2009. Т.73, Вып. 5. С. 809–823.
6. Чиглинцева А.С. Автомодельное решение задачи образования гидрата в снежном массиве // Вычислительная механика сплошных сред. 2017. Т. 10, № 2. С. 212–224.

Секция 3  
**ИССЛЕДОВАНИЯ НОВЫХ ПЕРСПЕКТИВНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ В ПРИЛОЖЕНИЯХ МЕХАНИКИ  
СПЛОШНЫХ СРЕД**

---

**Session 3  
INVESTIGATION OF ADVANCED MATERIALS IN  
APPLICATIONS OF CONTINUUM MECHANICS**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ МОНОЛИТНЫХ ЧАСТИЦ ТИТАНА**

**Н.С. Белоусова**

Новосибирский государственный технический университет, Россия  
E-mail: [nata.bel.94@mail.ru](mailto:nata.bel.94@mail.ru)

**Аннотация.** Разработана методика создания крупных горящих монолитных частиц титана диаметром 250–550 мкм. Исследовано их горение в свободном падении в воздухе. Посредством видеосъёмки определены характерные времена начала фрагментации, окончания фрагментации, окончания горения, закономерности движения частиц, в частности, их скорость и координата в момент начала фрагментации. Оценен размер частиц, при котором изменяется режим фрагментации («звезда» → «еловая ветвь»).

**Ключевые слова:** частица титана, горение, фрагментация, конденсированные продукты горения, частицы оксида, сферулы.

**INVESTIGATION OF MONOLITHIC TITANIUM PARTICLES  
COMBUSTION**

**N. Belousova**

Novosibirsk State Technical University, Russian Federation  
E-mail: [nata.bel.94@mail.ru](mailto:nata.bel.94@mail.ru)

**Abstract.** The technique for producing the large titanium monolithic burning particles with a diameter of 300–500 microns is developed. The combustion of titanium particles in free fall in air was investigated. The characteristic times for the following events – beginning of fragmentation, end of fragmentation, end of burning, as well as the particle's motion law (including the coordinate and the velocity at the moment when the fragmentation process starts) are defined using the video recording. The size of particle at which the fragmentation picture changes from "star" to "spruce branch" is estimated.

**Keywords:** titanium particle; combustion; fragmentation; condensed combustion products; oxide particles; spherules.

Титан стоит на четвертом месте по распространенности в конструкционных материалах. С одной стороны, Ti – конструкционный материал, применяемый в экстремальных условиях (в изделиях ракетно-космической и авиационной техники, т.п.). С другой стороны, Ti – пирофорное металлическое горючее. В этом качестве Ti применяется в составе пиротехнических композиций и в композициях технологического горения. В 2005 г. было предложено использовать горение частиц Ti в воздухе для создания облака фотокаталитически-активных частиц  $TiO_2$  ( $TiO_2$  – основной продукт горения титана) с целью дезактивации вредных или опасных веществ, оказавшихся в атмосферном воздухе в результате техногенной аварии или террористического акта. Изучение механизма горения частиц Ti нацелено на исследование влияния размера материнских частиц Ti и условий их горения на время горения и на характеристики образующихся частиц  $TiO_2$ .

### **Методика экспериментов**

Используется образец, состоящий из безметального топлива-матрицы, в которую помещены металлизированные фрагменты. В волне горения матрицы каждый фрагмент превращается в горящую частицу-агломерат. Масса, состав и структура агломератов определены рецептурой и размером включений. Дальнейшее горение частиц происходит в воздухе [3, 4].

Образец представляет собой полосу безметальной матрицы с внедрёнными включениями, нанесённую на кварцевую трубку диаметром 12 мм, она играет роль держателя образца. Размеры матрицы  $W \times H$  примерно  $3 \times 30 \times 2$  мм. В матрице сделаны глухие отверстия диаметром 1.2 мм глубиной около 1 мм, в которых фиксируются титановые фрагменты.

Фрагменты изготавливали следующим образом. От слитка металлического титана отделяли фрагмент размером 2–3 мм. Фрагмент подвергался ковке, затем прокату на стальных вальцах до толщины около 50–80 мкм. В результате получали титановый «лепесток», от которого затем отрезали требуемое количество кусочков для размещения их в образце. Размер включений около 1 мм.

Вес лепестка 0.0100–0.0400 г, вес одного включения около 0.0002 г.

Проведение эксперимента. Кварцевую трубку-держатель образца закрепляли горизонтально на высоте 2–3 так, чтобы полоска матрицы находилась на нижней стороне трубки, рис. 1. По мере прохождения волны горения по полоске матрицы, включения воспламеняются и выбрасываются из матрицы. Вылетевшие частицы превращаются в горящие сферы, свободно падающие в воздухе. В ходе эксперимента производили видеосъемку падающих горящих частиц цифровой фотокамерой со скоростью съёмки 25 кадров в секунду. Обработка видеозаписи и выборка кадров в программе VirtualDubc. Совокупность фрагментов кадров с помощью программного обеспечения объединяли в единый графический файл – «видеограмму», рис. 2. Пиксельные измерения проводили в программе ScopePhoto. Закономерности движения частиц представляли в виде зависимостей координат

ты и скорости от времени. Скорость вычисляли как производную от координаты, все вычисления и построения графиков проводили в электронных таблицах Origin8.

Сбор остатков горения осуществляли так, образец располагался над открытым торцом большой кварцевой трубы, установленной вертикально на чашку Петри. Труба имела диаметр 9 см и высоту 220 см. Горение и падение частиц происходило внутри трубы. Все отобранные частицы подвергали гранулометрическому анализу с применением подходящих методов с построением изображения. Применяли макросъемку, оптическую и электронную микроскопию. Среди отобранных продуктов выделяли два морфологических типа: 1. Сферические частицы оксида с диаметрами порядка единиц-десятков микрон. Это остатки сгорания фрагментов; 2. Объекты со структурой аэрогеля с габаритным размером до тысячи микрон, состоящие из цепочек первичных оксидных наночастиц (так называемый сферул) с диаметрами в десятки нанометров.

### Результаты экспериментов

В качестве примера в табл. 1 представлены результаты траекторных измерений и параметры характерных событий для индивидуальной частицы.

Таблица 1. Результаты измерений

Событие	Начало фрагментации	Конец фрагментации	Конец горения
Время, с	0.72	0.84	0.92
Координата, см	186	211	217
Скорость, см/с	270	210	15...65

Получена информация о характерных временах горения и характеристиках фрагментации монолитных материнских частиц титана диаметром 300–500 мкм.

### Литература

1. *WeiQiangPang, XuezhongFan, FengqiZhao, HuixiangXu, WeiZhang, HongjianYu, YonghongLi, FangliLiu, WuxiXie, NingYan.* Effects of Different Metal Fuels on the Characteristics for HTPB-based Fuel Rich Solid Propellants // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics.* 2013. Vol. 38. P. 852–859.
2. *Matias T., Duraes L., Andrade-Campos A., Mendes R.* Prediction and experimental Al, Mg, Ti and Zr derived oxides and spinel formation by detonation // *41st Int. Annual Conference of ICT. Energetic Materials for High Performance, Insensitive Munitions and Zero Pollution.* Germany, Karlsruhe, June 29 – July 2, 2010. P. 95-1–95-16.
3. *Shafirovich E., Soon Kay Teoh, Arvind Varma.* Combustion of levitated titanium particles in air // *Combustion and Flame.* 2008. Vol. 152. P. 262–271.
4. *Глотов О.Г., Зарко В.Е., Карасев В.В., Федотова Т.Д., Рычков А.Д.* Макрокинетика горения монодисперсных агломератов в факеле модельного твердого топлива // *Физика горения и взрыва.* 2003. Т. 39, № 5. С. 74–85.

# ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛЕДОВЫХ ОБРАЗЦОВ УСИЛЕННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ АРМИРОВАНИЕМ

**А.С. Васильев, В.Л. Земляк**

Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема, Россия  
E-mail: Vasil-grunt@mail.ru

**Аннотация.** В работе представлены результаты экспериментальных и численных исследований. Эксперименты на ледяных балках проводились с целью оценки влияния поверхностного усиления растянутой зоны армирующим каркасом на их (балок) несущую способность в условиях чистого изгиба. Численный расчет напряженно-деформированного состояния ледяных образцов выполнялся в программном комплексе ANSYS Workbench v15, с использованием модуля ANSYS Mechanical. В результате исследования получены результаты по влиянию схем армирования на предельную разрушающую нагрузку. Установлен характер формирования трещин в образцах и построены диаграммы зависимости прогиба балок от нагрузки. Численно определено напряженно-деформированного состояния ледяных образцов в любой момент их нагружения. Сопоставление полученных данных показало высокую сходимость полученных экспериментальных и численных результатов по прогибам балок.

**Ключевые слова:** армирование, ледяная балка, численное исследование.

## NUMERICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE STRESSED-DEFORMED STATE OF ICE SAMPLES OF REINFORCED SURFACE REINFORCEMENT

**Al. Vasiliev, V. Zemlyak**

Sholom-Aleichem Priamursky State University, Russian Federation  
E-mail: Vasil-grunt@mail.ru

**Abstract.** The paper presents the results of experimental and numerical studies. Experiments on ice beams were carried out in order to assess the influence of the surface reinforcement of the stretched zone by the reinforcing skeleton on their (beams) carrying capacity under conditions of pure bending. Numerical calculation of the stressed-deformed state of ice samples was carried out in the ANSYS Workbench v15 software package, using the ANSYS Mechanical module. As a result of the study, the results on the effect of reinforcement schemes on the ultimate breaking load were obtained. The nature of the formation of cracks in the samples is established and diagrams of the dependence of the deflection of beams on the load are constructed. The stress-strain state of the ice samples is determined numerically at any moment of their loading. A comparison of the data obtained showed a high convergence of the experimental and numerical results obtained in the deflections of beams.

**Keywords:** reinforcement, ice beam, numerical research.

Ледовые переправы на автомобильных дорогах организуются в зимний период времени при образовании на водных преградах ледяного покрова требуемой толщины в случаях отсутствия мостовых сооружений, а также при невозможности устройства паромных переправ. Если толщина ледяно-

го покрова не достаточна для безопасной эксплуатации переправы, могут быть использованы традиционные методы повышения несущей способности льда, такие как: намораживание льда снизу, намораживание льда сверху или усиление льда деревянным копейным настилом. Практический опыт показывает, что физико-механические свойства ледяного покрова усиленного данными методами могут сильно зависеть от различных внешних факторов. В связи с этим весьма актуальной становится задача повышения несущей способности льда альтернативными методами, например внедрением в лед армирующих элементов. Достаточно перспективным может оказаться способ поверхностного армирования путем внедрения в относительно тонкий ледяной покров толщиной 0.3–0.4 м стальных цельносварных каркасов.

Целью работы являлось экспериментальное и численное исследование напряженно-деформированного состояния ледяных образцов усиленных поверхностными армирующими каркасами. Результаты экспериментов по нагружению образцов, работающих в условиях чистого изгиба, сопоставлялись с результатами расчетов, выполненных с помощью численных методов с использованием расчетного комплекса ANSYS. Для выполнения модельных экспериментов была спроектирована и собрана универсальная нагружающая установка, которая состояла из силовой рамы, состоящей из стоек, станин, верхней и нижней балок, нагружающего устройства и измерительного модуля. Для армирования ледяных балок размерами  $L \times B \times H = 2000 \times 200 \times 200$  мм использовались цельносварные каркасы из стальной арматуры. Всего было изготовлено 10 каркасов различающихся расположением и количеством продольных и поперечных связей. Эксперименты на ледяных балках проводились с целью оценки влияния поверхностного усиления растянутой зоны армирующим каркасом на их (балок) несущую способность в условиях чистого изгиба. Численный расчет напряженно-деформированного состояния ледяных образцов выполнялся в программном комплексе ANSYS Workbench v15, с использованием модуля ANSYS Mechanical. В результате исследования получены результаты по влиянию схем армирования на предельную разрушающую нагрузку. Установлен характер формирования трещин в образцах и построены диаграммы зависимости прогиба балок от нагрузки. Численно определено напряженно-деформированное состояние ледяных образцов в любой момент их нагружения. Сопоставление полученных данных показало высокую сходимость полученных экспериментальных и численных результатов по прогибам балок.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации в период 2017–2019 гг. проект №9.4934.2017/БЧ

# СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА $ZrO_2(MgO)-MgO$ С БИМОДАЛЬНОЙ ПОРИСТОСТЬЮ

**Е.О. Васильева**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: akchuch@gmail.com

**Аннотация.** В работе были исследованы пористые композиционные керамические материалы на основе стабилизированного оксидом магния диоксида циркония ( $ZrO_2(MgO)$ ) и оксида магния ( $MgO$ ) с добавлением частиц сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) для достижения высокого уровня пористости. Проведены рентгеноструктурные исследования тонко кристаллической структуры. Изучены зависимости областей когерентного рассеяния (ОКР) и микроискажений кристаллической решетки от состава, а так же механические характеристики.

**Ключевые слова:** диоксид циркония, оксид магния, циркониевая керамика, керамика, биомедицинские материалы, микроструктура, наноструктура, композиционные материалы

## STRUCTURE AND PROPERTIES OF CERAMIC COMPOSITE MATERIAL $ZrO_2 (MgO)-MGO$ WITH BIMODAL POROSITY

**E. Vasileva**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: akchuch@gmail.com

**Abstract.** Porous composite ceramic materials based on magnesium oxide-stabilized zirconia ( $ZrO_2 (MgO)$ ) and magnesium oxide ( $MgO$ ) with the addition of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMW PE) particles were studied to achieve a high porosity level. X-ray diffraction studies were carried out. The dependences of the coherent scattering and microdistortion of the crystal lattice on the composition, as well as the mechanical characteristics, are studied.

**Keywords:** zirconia, magnesium oxide, zirconium ceramics, ceramics, biomedical materials, microstructure, nanostructure, composite materials.

В работе были исследованы пористые композиционные керамические материалы на основе стабилизированного оксидом магния диоксида циркония ( $ZrO_2(MgO)$ ) и оксида магния ( $MgO$ ) с добавлением частиц сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) для достижения высокого уровня пористости. Проведены рентгеноструктурные исследования тонко кристаллической структуры. Изучены зависимости областей когерентного рассеяния (ОКР) и микроискажений кристаллической решетки от состава, а так же механические характеристики.

Исследования показали, что ОКР кубической фазы  $ZrO_2$  линейно растут одновременно с увеличением содержания  $MgO$  в составе композита. Микродисторсия  $ZrO_2$  стремительно снижается при увеличении количества  $MgO$  в составе до 25%, однако в дальнейшем остается практически неизменной. Средний размер ОКР и микродисторсия  $MgO$ , с увеличением содержания его в композите снижается линейно [1].

Анализ диаграмм «напряжение-деформация» образцов исследуемых материалов показал, что предел прочности при сжатии керамики  $MgO$  равен 33 МПа. С ростом концентрации кубической фазы  $ZrO_2$  прочность снижается до 18 МПа [2]. На основе совокупных данных о пределе прочности и микродеформациях кристаллической решетки построена зависимость между макронапряжениями, соответствующими нагрузке при разрушении, и микронапряжениями, соответствующими произведению микродисторсии и теоретического модуля упругости. Показано, что зависимость прочности от микронапряжений, возникающих в кристаллической решетке композита имеет вид логарифмической зависимости [3].

### Литература

1. Канаки А.В. Структура и свойства порошков  $ZrO_2$ - $MgO$ , синтезированных в плазме высокочастотного разряда, и керамики на их основе: дис. ... канд. ф.-м. наук / А.В. Канаки. Томск., 2015. 147 с.
2. Лукин Е.С., Попов Н.А., Здвижкова Н.И. и др. Особенности получения плотной керамики, содержащей диоксид циркония // Огнеупоры и техническая керамика. 1999. № 9.
3. Kalatur E.S. et al. Deformation behavior of zirconia-based porous ceramics // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2013. Т. 47. №. 1. С. 012004.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЁВ НИКЕЛИДА ТИТАНА ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ МОДИФИКАЦИЙ

<sup>1</sup>С.Н. Мейснер, <sup>2</sup>Е.В. Яковлев, <sup>1,3</sup>Ф.А. Дьяченко

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

<sup>2</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН

<sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: frozennonetroll@mail.ru

**Аннотация.** В работе представлены исследования физико-механических свойств поверхностных слоёв сплава на основе никелида титана ( $TiNi$ ) с  $TiTa$  покрытием. Модификация поверхности образцов  $TiNi$  включала в себя предварительную обработку низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком (НСЭП) и последующее магнетронное осаждение  $TiTa$  покрытия. Анализ физико-механических свойств был проведен методом наноиндентирования. Осаждение  $TiTa$  покрытия на поверхности

сплава привело к изменению физико-механических характеристик. На зависимостях  $H_{\mu}$ ,  $\delta_H$ ,  $\eta$  от максимальной глубины проникновения индентора  $h_{\max}$  обнаружено три квазилинейных участка. Результаты показывают, что тип многослойной поверхностной структуры коррелирует с её физико-механическими свойствами.

Ключевые слова: никелид титана, электронный пучок, магнетронное осаждение, динамическое наноиндентирование, физико-механические свойства.

## INVESTIGATION OF THE PHYSICS AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE SURFACE LAYER OF NICKEL TITANIUM ALLOY AFTER ELECTRON-ION-PLASMA MODIFICATIONS

<sup>1</sup>S.N. Meisner, <sup>2</sup>E.V. Yakovlev, <sup>1,3</sup>F.A. D'yachenko

<sup>1</sup>Institute of Strength and Materials Science SB RAS

<sup>2</sup>Institute of High-Current Electronics SB RAS

<sup>3</sup>National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: frozennonetroll@mail.ru

**Abstract.** The paper presents research data on the physicomechanical properties of NiTi surface coated with TiTa, which comprises preliminary treatment by a microsecond low-energy high-current electron beam (LEHCEB) and then TiTa deposition by magnetron sputtering. The physicomechanical properties of NiTi alloy before and after electron beam and ion-plasma treatment were studied by dynamic nanoindentation. Deposition of the TiTa coating (1  $\mu\text{m}$ ) on the surface of the alloy led to a change in the physicomechanical properties. The dependences of  $H_{\mu}$ ,  $\delta_H$ ,  $\eta$  as a function of maximum indentation depth  $h_{\max}$  reveal three quasi-linear portions with constant slopes of  $H_{\mu}$ ,  $\delta_H$ ,  $\eta$ . Our data suggest that the type of multi-layer surface structure correlates with its physicomechanical properties.

**Keywords:** Nickel titanium, electron beam, magnetron deposition, dynamic nanoindentation, physicomechanical properties.

Сплавы на основе никелида титана (TiNi) обладают высокими прочностными и упругопластическими характеристиками. Благодаря проявлению способностей, известных как эффект памяти формы (ЭПФ) и сверхэластичности (СЭ), данные сплавы нашли широкое применение в области медицины [1].

Известно, что физико-механические свойства поверхностных слоёв сплавов на основе TiNi оказывают влияние на их объёмные свойства. На сегодняшний день, одним из способов улучшения поверхностных свойств TiNi сплавов является обработка их поверхности низкоэнергетическим (10–30 кэВ) высокоточным (10–25 кА) электронным пучком (НСЭП). Однако данный вид обработки не всегда положительно влияет на интегральные механические свойства сплава. Это связано, в частности, с тем, что модифицированные микронные поверхностные слои сплавов TiNi на мезомасштабном уровне являются концентраторами упругих напряжений. Литературные сведения о физико-механических свойствах и их связи со структурой модифицированных поверхностных слоёв TiNi крайне ограни-

чены. Исследование физико-механических свойств и структуры модифицированных поверхностных слоёв позволит понять механизмы влияния НСЭП-обработки на интегральные механические свойства материала.

Известно, что наличие поверхностных слоёв на поверхности сплава TiNi, легированных танталом позволяют повысить рентгеноконтрастность медицинских изделий из этого сплава, что актуально в области эндоскопической хирургии (например, при операциях на сосудах малого диаметра). Однако результаты параллельного исследования структуры и физико-механических свойств таких поверхностных слоёв в литературе не обнаружены.

Целью данной работы было исследование физико-механических свойств поверхностных слоёв никелида титана после электронно-ионно-плазменных модификаций.

Образцы для исследования размерами 10×10×1 мм были приготовлены методом электроэрозионной резки из пластины, изготовленной из коммерческого сплава марки TN1 на основе TiNi (МАТЕК-СПФ, Россия). Сплав выплавлен методом индукционной плавки в вакуумной индукционной печи с графитовым тиглем (vacuum induction melting – VIM). Химический состав сплава: Ti – 50.08Ni – 0.051C – 0.03O – 0.002N (вес. %). Перед облучением была произведена химическая очистка и электролитическая полировка поверхности, а затем промывка в ультразвуковой ванне. Облучение НСЭП и осаждение Ti-Ta покрытия проводилось на установке «РИТМ-СП» (ООО «Микросплав», Россия) [2]. Плотность энергии электронного пучка составляла  $E_s = 3.4 \pm 0.7$  Дж/см<sup>2</sup>; длительность импульса  $\phi = 2\text{--}2.5$  мкс, число импульсов  $n = 32$ . После предварительной обработки электронным пучком на поверхность образцов было нанесено Ti-Ta покрытие, размер которого составлял ~ 1 мкм.

Исследование физико-механических свойств образцов до и после модификации поверхности было проведено методом динамического наноиндентирования на установке Nano Hardness Tester (CSEM, ННТ, Швейцария). По полученным  $P\text{--}h$  диаграммам, с использованием методики Оливера–Фарра [3], была определена величина твёрдости  $H_\mu$ . Пластичность поверхностного слоя  $\delta_H$  оценивали, используя методологию [4]. Неупругие свойства поверхностного слоя оценивали, используя параметр  $\eta$ , характеризующий степень неупругого формовосстановления отпечатка [5].

Исследование показало, что образовавшиеся новые структурно-фазовые состояния после обработок привели к тому, что физико-механические поверхностные свойства были изменены по сравнению с их исходными значениями. Установлено, что после НСЭП-обработки поверхностный слой TiNi на глубине менее ~ 500 нм имел следующие характеристики: параметр твёрдости  $H_\mu = 5000$  МПа, степень восстановления отпечатка  $\eta = 55\%$  и параметр пластичности  $\delta_H = 0,2$ . На глубине более 500 нм физико-механические свойства сплава соответствуют исходным.

Последующее осаждение TiTa покрытия (1 мкм) на поверхности сплава привело к изменению физико-механических свойств. Зависимости  $H_u$ ,  $\eta$ ,  $\delta_H$  от максимальной глубины проникновения индентора  $h_{max}$  демонстрируют наличие трёх квазилинейных стадий, в каждой из которых наклоны этих кривых остаются неизменными. Наличие стадийности на кривых  $H_u$ ,  $\eta$ ,  $\delta_H$  от  $h_{max}$  строго коррелирует с многослойной структурой модифицированных слоёв и покрытий, осаждённых на них.

В результате исследований установлено, что после обработки образцов сплава TiNi низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком и последующим осаждением TiTa покрытия в поверхностном слое формируется иерархически организованная многослойная структура. Влияние на физико-механические свойства TiNi-подложки двух обработок не распространяется на глубину более 1500 нм. Это означает, что электронно-ионно-плазменные воздействия не повлияют на такие объёмные свойства сплава TiNi, как эффект сверхэластичности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант РФФ №15-13-00023 от 18.05.2015).

#### Литература

1. *Хачин В.Н.* Никелид титана: структура и свойства / В.Н. Хачин, В.Г. Пушин, В.В. Кондратьев. М.: Металлургия, 1992. 106 с.
2. *Марков А.Б.* Установка РИТМ-СП для формирования поверхностных сплавов / А.Б. Марков, А.В. Миков, Г.Е. Озур // ПТЭ, 2011, №6. С. 122–126.
3. *Pharr G.M.* Measurement of thin film mechanical properties using nanoindentation / G.M. Pharr, W.C. Oliver // MRS Bulletin. 1992. P. 28–33.
4. *Мильман Ю.В.* К вопросу определения пластичности материалов методом индентирования / Ю.В. Мильман, С.И. Чугунова, И.В. Гончарова // Электронная микроскопия и прочность материалов: сб. науч. тр. К.: ИПМ НАН Украины, 2008. Вып. 15. С. 3–10.
5. *Crone W.C.* Shape recovery after nanoindentation of NiTi thin films / W.C. Crone, G.A. Shaw, D.S. Stone, A.D. Johnson, A.B. Ellis // Annual Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics, Carlotte. 2003. P. 1–6.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ВЫСОКОХРОМИСТЫХ СТАЛЕЙ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР

Е.С. Емельянова, В.А. Скрипняк

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: emelyanova\_es13@mail.ru

**Аннотация.** Высокохромистые стали, благодаря устойчивости к облучению и радиационным повреждениям, хорошей коррозионной стойкости и способности сохра-

нять высокую прочность и жесткость в условиях повышенных температур, являются перспективными конструкционными материалами для активной зоны ядерных реакторов, в том числе и для реакторов нового поколения. На механическое поведение таких сталей существенно влияет образование обогащенных железом  $\alpha$ - и обогащенных хромом мелкодисперсных  $\alpha'$ -фаз при температурах ниже 748 К. В связи с этим необходимо подробное изучение механического поведения таких сталей в широком диапазоне температур с учетом фазового перехода.

Целью данной работы является исследование закономерностей деформации высокохромистых сталей в диапазоне температур, которые могут возникать в элементах конструкций ядерных реакторов. Установлено, что в результате фазового перехода в сталях с 14% Cr механические свойства изменяются при нормированной температуре  $T^*$  выше 0.299 ( $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$ ), где  $T_m$  – температура плавления данной стали,  $T_r = 293\text{K}$  – комнатная температура).

Разработана вычислительная модель для описания деформации высокохромистых сталей в широком диапазоне температур с учетом фазового перехода.

С помощью численного моделирования и аналитических расчетов показано, что для адекватного описания свойств высокохромистых сталей с использованием модели Джонсона-Кука в широком диапазоне температур требуется учитывать изменение численных значений коэффициентов модели при фазовом переходе.

**Ключевые слова:** высокохромистые стали, конструкционные материалы для ядерных реакторов, численное моделирование.

## NUMERICAL SIMULATION DEFORMATION OF HIGH-CHROMIUM STEELS OVER A WIDE RANGE OF TEMPERATURE.

**E. Emelianova and V. Skripnyk**

National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: emelyanova\_es13@mail.ru

**Abstract.** High-chromium steels are promising construction materials for a nuclear reactor core due to the enhanced resistance to radiation and radiation damage, good corrosion resistance, and ability to maintain high strength and rigidity under elevated temperatures. Formation of iron-enriched  $\alpha$ - and chromium-enriched finely dispersed  $\alpha'$ -phases at temperatures below 748 K influences the mechanical behavior of such steels. It is thus necessary to study in detail the mechanical behavior of such steels over a wide range of temperature, taking the phase transition into account.

The aim of this work is to study the deformation behavior of high-chromium steels in the temperature range which can arise in structural components of a nuclear reactor. The mechanical properties are established to change at a normalized temperature  $T^*$  above 0.299 as a result of the phase transition in steels containing 14% Cr ( $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$ , where  $T_m$  is the melting temperature of the steel,  $T_r$  is the room temperature). A computational model has been developed to describe the deformation of high-chromium steels over a wide range of temperature. The developed model accounts for the phase transition in 14 Cr steels.

Numerical simulations and analytical calculations demonstrate the necessity of accounting for a change of model coefficients during the phase transition to adequately describe the mechanical properties of steels using the Johnson-Cook model over a wide range of temperature.

**Keywords:** high-chromium steels, construction materials for nuclear reactors, numerical simulation.

Благодаря своим высоким прочностным характеристикам, а также высокой жаропрочности и радиационной стойкости, высокохромистые стали представляют интерес как перспективные конструкционные материалы для ядерных реакторов IV поколения – реакторов с замкнутым топливным циклом. В таких сталях ниже 748 К образуются обогащенные железом  $\alpha$  - и обогащенные хромом мелкодисперсные  $\alpha'$  - фазы [1], что существенно влияет на механическое поведение материала.

Дисперсные выделения  $\alpha'$  и  $\sigma$  фазы играют важную роль в упрочнении сталей Fe–Cr, закрепляя дислокации. Поскольку данные материалы работают в зоне повышенных температур и высоких механических нагрузок, необходимо подробное изучение их механического поведения в широких условиях нагружения.

Цель данной работы – исследовать закономерности деформации высокохромистых сталей в широком диапазоне температур методом компьютерного моделирования, а также разработать теоретические методы оценки и прогнозирования механических свойств высокохромистых сталей.

Для достижения этих целей были поставлены следующие задачи:

Изучить влияние температуры фазового перехода на механическое поведение высокохромистых сталей на основе экспериментальных данных; определить параметры, описывающие закономерности деформации высокохромистых сталей в широком диапазоне температур и получить прогноз механических свойств высокохромистых сталей в широком диапазоне температур с учетом фазового перехода.

Для исследования закономерностей деформирования проводилось компьютерное моделирование механического поведения исследуемых сталей с использованием модели Джонсона–Кука.

В работе решалась задача об одноосном растяжении стальных образцов при растяжении с постоянной скоростью деформации.

Моделировался процесс деформирования плоских образцов типа SS-3 типа высокохромистых сталей, с длиной рабочей части 7.62 мм, шириной 1.52 мм, радиусом скругления 3.91 мм и толщиной 0.76 мм, использован программный комплекс ANSYS 14.

Учитывая специфику решаемой задачи, для описания механического поведения исследуемого материала была выбрана модель Джонсона–Кука, учитывающая влияние температуры и скорости деформации на напряжение течения и предельную степень деформации материала.

Для участка температур до фазового перехода предлагается брать оригинальную модель Джонсона–Кука, а после фазового перехода – уравнение, в котором начальная температура равна температуре фазового перехода.

Параметры уравнения Джонсона–Кука определены с учётом фазового перехода, согласно методике, предложенной в [2], на основе информации о пластических деформациях материала при разных интенсивностях деформирования и температурах. В данной работе исследуется влияние темпера-

туры на механическое поведение материала при фиксированной скорости деформации.

Проведено сравнение полученных расчетных зависимостей «напряжение–деформация» с экспериментальными данными, предлагаемая вычислительная модель хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Проведен анализ закономерностей деформации высокохромистых сталей в широком диапазоне температур. Установлено, что в результате фазового перехода в сталях с 14% Cr механические свойства изменяются при нормированной температуре  $T^*$  выше 0.299.

Разработана вычислительная модель для описания деформации высокохромистых сталей в широком диапазоне температур с учетом фазового перехода.

С помощью численного моделирования и аналитических расчетов показано, что для адекватного описания свойств сталей с использованием модели Джонсона-Кука в широком диапазоне температур требуется учитывать изменение численных значений коэффициентов модели при фазовом переходе.

### Литература

1. *Bonny G.* New Contribution to the Thermodynamics of Fe-Cr Alloys as Base for Ferritic Steels / G. Bonny, D. Terentyev, L. Malerba // *J. Phase Equilib. Diff.* 2010. Vol. 31. P. 439–444.

2. *Соболев А.В.* Использование модели пластичности Джонсона-Кука в численном моделировании бросковых испытаний контейнеров для транспортирования ОЯТ / А.В. Соболев, М.В. Радченко // *Изв. вузов. Ядерная энергетика. Топливный цикл и радиоактивные отходы.* 2016. Т. 3. С. 83–85.

## ИЗМЕНЕНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ

**М.Е. Журковский**

Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Россия

E-mail: makhimik@mail.ru

**Аннотация.** Проведены гранулометрические исследования твердой части хвостов флотации горно-обогатительной фабрики Чойского района республики Алтай. Проведены исследования по гравитационному осаждению твердых частиц и изменению гранулометрического состава в зависимости от времени отстаивания. Определены параметры, позволяющие в дальнейшем использовать отходы флотации в конструкционных материалах.

**Ключевые слова:** частицы, осаждение, гранулометрический состав, отходы флотации, пульпа, оптический метод.

# CHANGE IN GRANULOMETRIC COMPOSITION OF SUSPENDED PARTICLES DURING GRAVITY SETTLING

M. Zhurkovsky

Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies  
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation  
E-mail: makhimik@mail.ru

**Abstract.** Granulometric studies were done for the solid fraction of flotation tailings from a mining and beneficiation plant located in the Choysky District, the Altai Republic. Studies were also done on the gravitational settling of solid fines and on the change in granulometric composition subject to the settling time. Parameters were determined that enable flotation waste to be further used in constructional materials.

**Keywords:** particles, settling, granulometric composition, flotation waste, pulp, optical method.

Рациональное потребление ресурсов и эффективное использование отходов производства являются важнейшими экологическими и экономическими проблемами. Горнорудные обогатительные фабрики перерабатывают миллионы тон пород. Добыча полезных ископаемых сопровождается большими затратами энергоресурсов на дробление, измельчение сырья. После изъятия полезных руд пустая руда направляется в прудки-отстойники, далее вывозится в отвалы, занимая гектары земель. Так как на измельчение пустой породы затрачивается большое количество энергии, и она имеет высокую дисперсность, целесообразно использовать отходы в конструкционных материалах, в которых используются высокодисперсные наполнители [1]. Для применения в наполнителях необходимо знать размеры частиц и их распределение.

Целью работы является исследование на примере горно-обогатительной фабрики Чойского района республики Алтай гранулометрического состава пульпы для выделения фракций частиц, используемых в конструкционных материалах.

В зависимости от месторождения и технологического процесса дробления и обогащения, размеры частиц могут отличаться в 2–3 раза для различных рудоперерабатывающих предприятий. Для определения размеров были проведены экспериментальные исследования.

С целью определения дисперсного состава пульпы были отобраны пробы в месте сброса сточных вод в хвостохранилище. Измерение размеров частиц проводили оптическим методом.

Частицы дробленной руды имеют неправильную форму, разнообразны по размерам. Самые крупные частицы достигают размеров 200 мкм. Наиболее мелкие частицы имеют размеры до нескольких микрон. Из отобранных проб делали выборки и определили количество частиц, попавших в заданный интервал размеров.

Для расчета массообменных процессов и проектирования оборудования интерес представляет не количественное, а массовое распределение частиц по размерам. Массовое распределение пропорционально объемному.

В литературе для теоретической оценки плотности распределения используют законы нормального, бинормального распределения и другие [3]. Экспериментальное распределение частиц по размерам не соответствует теоретическому нормальному закону распределения, и содержит два максимума. Распределение в пределах обработанных проб воспроизводится, что исключает экспериментальную ошибку. Вероятно, эти два максимума могут быть обусловлены особенностями технологического процесса дробления руды на конкретном изучаемом производстве и соответствуют двум теоретическим нормальным законам распределения.

С помощью интегральной функции распределения удобно оценивать объемную долю частиц заданного размера. Например, наиболее крупные частицы размером от 50 до 200 мкм занимают по весу около 95 % всей фракции, а наиболее мелкие – 5 %.

Исследования осаждения твердых частиц под действием гравитационных сил проводились по объемному и массовому накоплению осадка.

Для определения объемного накопления осадка наполняли сосуд пробой, наблюдали за накоплением осадка на дне. Можно выявить, что в первые минуты частицы с большой скоростью опускались на дно и осадок быстро накапливался. Спустя некоторое время нижний плотный осадок перестал накапливаться, а взвешенные частицы в верхней части сосуда начали отслаиваться от воды и образовывать пористый взвешенный слой, который по мере уплотнения сдвигался вниз. В результате, можно было выделить 3 слоя, различных по цвету: нижний – более темный, средний – серый и верхний – прозрачная жидкость. Процесс осаждения частиц в покоящейся жидкости завершился через 24 часа.

Параллельно проводились исследования накопления массы осадка. Для этого наполняли суспензией сосуд объемом 200 мл. Через заданный интервал времени сливали жидкость до плотного осадка, отстаивали и повторяли процедуру. Из осадка отбирали пробу для гранулометрического анализа, затем высушивали до постоянной массы и взвешивали.

Определялось количество частиц, попавших в заданный интервал размеров, и рассчитывали весовую функцию распределения.

Можно заключить, что в первые секунды оседают крупные частицы, размерами от 50 до 200 мкм, а спустя 26 мин размер взвешенных частиц не превышает 40–50 мкм.

По полученным данным можно сделать вывод, что при осаждении под действием сил гравитации основная масса твердого осадка выпадает в течение 180 сек, взвешенные частицы обладают относительной седиментационной устойчивостью и выпадают в осадок гораздо медленнее, при этом, не образуя плотный осадок. Следует отметить, что мелкая взвесь легко взму-

чивается, и в процессах отстаивания в производственных условиях неизбежен унос легкой мелкой фракции с жидкостью на уровне 5–7 %.

Около 95% крупных частиц выпадает в течение 500 секунд, а затем происходит осаждение оставшихся частиц.

**Выводы.** Проведены гранулометрические исследования твердой фракции сточных вод флотационного обогащения комплексных руд. Экспериментально определены распределения частиц исходных хвостов по размерам. Проведены исследования процесса осаждения твердых частиц под действием гравитационных сил и исследовано перераспределение размеров частиц, в зависимости от времени осаждения. Основная масса частиц по размерам не превышает 150–200 мкм, что делает пригодными для их использования в качестве добавок к бетонам и наполнителей газобетонов, без дополнительного измельчения.

### Литература

1. Журковский М.Е., Фирсов В.В., Блазнов А.Н., Верещагин П.В. Исследование процесса твердения бетона с минеральными добавками/ Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: Материалы X Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (24–26 мая 2017 г., г. Бийск) / Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2017. С. 258–262.

2. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П.А. Коузов. 3-е изд. Л.: Химия, 1987, 264 с.

3. Блазнов А.Н., Денисов Ю.Н., Куничан В.А., Чащилов Д.В. Распределение пузырьков по размерам в жидкостно-газовых струйных аппаратах с удлиненной камерой смешения [Электронный ресурс] / А.Н. Блазнов, Ю.Н. Денисов, В.А. Куничан, Д.В. Чащилов // Электронный журнал "Исследовано в России", 14, 151–161, 2002. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/014.pdf>.

## МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ СПЛАВА Mg–0.8Ca МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

А.А. Казакбаева<sup>1</sup>, М.Б. Седельникова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия

E-mail: aigerim\_@bk.ru

**Аннотация.** Проведено исследование влияния напряжения микродугового оксидирования на элементный состав и свойства кальцийфосфатных покрытий. В качестве компонентов электролита использовали гидрофосфат натрия, гидроксид натрия, фторид натрия и частицы бета-трикальцийфосфата. Исследования коррозионной стойкости образцов магниевого сплава с покрытиями и без покрытий проводили с использованием 3.5% раствора NaCl. Элементный состав представлен следующими элементами: O, F, Ca, P, Mg. Увеличение напряжения приводит к росту толщины и шероховатости покрытий. Максимальное соотношение Ca/P составило 0.9. Сформированные микродуго-

вые КФ покрытия, содержащие частицы в-ТКФ, способствуют снижению скорости растворения сплава Mg–0.8Ca.

**Ключевые слова:** кальцийфосфатное покрытие, микродуговое окислирование, элементный состав, коррозионная стойкость.

## MODIFICATION OF THE SURFACE OF THE Mg-0.8Ca ALLOY BY MICRO ARC OXIDATION METHOD

A.A. Kazakbaeva<sup>1</sup>, M.B. Sedelnikova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University, Russian Federation

<sup>2</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science of SB RAS, Russian Federation

E-mail: aigerim\_@bk.ru

**Abstract.** The influence of voltage of micro-arc oxidation on the properties of calcium-phosphate coating such as thickness, roughness, porosity and elemental compositions has been studied. The coatings were deposited in the electrolyte, based on the aqueous solution of the disodium phosphate, sodium hydroxide, sodium fluoride and v-tricalcium phosphate. Corrosion resistance of magnesium alloy samples with and without coatings was studied using 3.5% NaCl solution. The elemental composition is represented by the following elements: O, F, Ca, P and Mg. The increase of the process voltage leads to the growth of the thickness and roughness. The maximum Ca/P atomic ratio was equal to 0.9. Thus, calcium phosphate coatings containing particles of v – tricalcium phosphate formed by micro arc oxidation method reduce the rate of dissolution of the alloy Mg-0.8 Ca.

**Keywords:** calcium phosphate coatings, micro arc oxidation, elemental composition, corrosion resistance.

В современной медицине широко используются искусственные материалы для создания имплантатов различного назначения. В зависимости от вида вводимые в организм имплантаты должны проявлять биоактивность и замещаться живой тканью или быть биоинертными и функционировать в течение длительного времени, не вызывая воспалительных реакций в организме. Большую часть металлических имплантатов, используемых в настоящее время в медицине, изготавливают из стали, титана и титановых сплавов [1]. Материалами нового поколения в имплантологии являются магниевые сплавы. При взаимодействии с биологическими жидкостями организма имплантаты из магниевых сплавов растворяются, причем продукты растворения не являются токсичными. Магний – важнейший внутриклеточный элемент, содержание которого в клетках во много раз превышает содержание во внеклеточной жидкости. Магний входит в состав многих ферментативных систем, задействованных в обменных процессах, чем объясняется его большая значимость для организма [2]. Магниевые сплавы имеют хорошие биомеханические свойства, т.к. их модуль упругости составляет около 45 ГПа и приближается к модулю упругости кости. Недостатком, существенно ограничивающим распространение сплавов на основе магния, является высокая скорость их растворения в организме [2].

Решением данной проблемы может служить формирование покрытий, снижающих скорость растворения имплантата. Для этих целей наиболее перспективно использовать биоактивные кальцийфосфатные (КФ) покрытия, содержащие в своем составе «родные» для костных тканей соединения фосфатов кальция [3]. Для нанесения биологически активных покрытий на поверхность металлических имплантатов метод микродугового оксидирования (МДО) является наиболее технологичным и востребованным. Формирование покрытия в этом случае связано с протеканием высокотемпературных химических процессов в зоне локальных плазменных микроархарадов под воздействием внешнего источника высокого напряжения, за счет чего происходит окисление основного материала и перенос в покрытие элементов электролита [3].

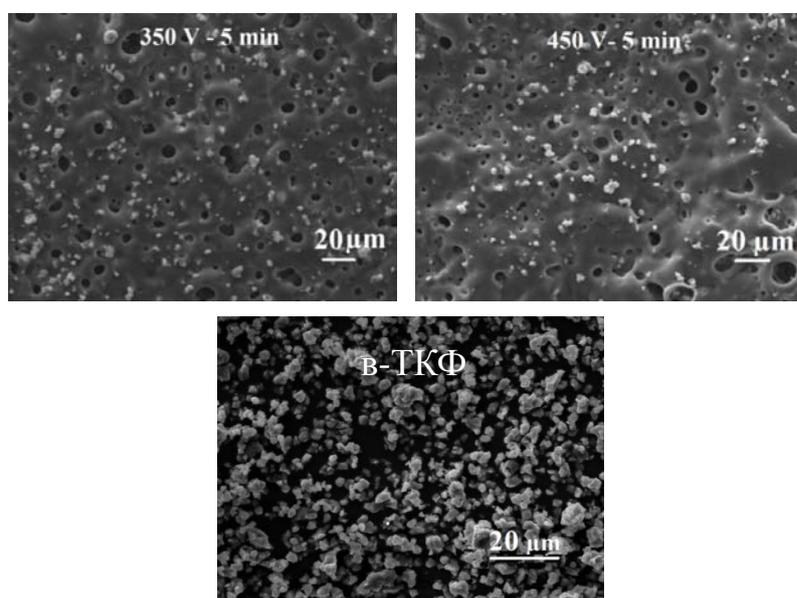


Рис. 1. РЭМ - изображения КФ покрытий и, нанесённых при различных напряжениях процесса и РЭМ – изображение порошка в-ТКФ

Образцы, использованные для проведения исследования, имели размеры 10\*10\*1 мм и были изготовлены из магниевого сплава Mg-0.8Ca. Покрытия наносили методом МДО на установке MicroArc – 3.0. В качестве компонентов электролита использовали гидрофосфат натрия, гидроксид натрия, фторид натрия и бета-трикальцийфосфат. Параметры нанесения покрытий были следующие [3]: длительность импульсов – 100 мкс, частота импульсов – 50 Гц, время нанесения покрытий – 5–10 мин, напряжение МДО варьировалось от 350 до 500 В.

Исследования, проведенные методом растровой электронной микроскопии (LEO EVO 50 с приставкой для энергодисперсионного анализа, ЦКП ИФПМ СО РАН «Нанотех», г. Томск) показали, что покрытия имеют однородную пористую структуру. На поверхности покрытий наблюдаются частицы в-ТКФ размером 1.3–3.0 мкм. Толщина и шероховатость покры-

тий (по параметру Ra) варьируются в диапазонах от 20 до 140 мкм и от 2 до 8 мкм, соответственно, при увеличении напряжения процесса МДО и длительности нанесения покрытий (рис. 1).

Методом энергодисперсионного микроанализа было установлено, что элементный состав покрытий варьируется по направлению от подложки к поверхности. Ближе к подложке в покрытиях преобладают элементы магний (34.3 ат.%) и кислород (44.7 ат.%). Здесь же наблюдается повышенное содержание фтора (9.8 ат.%). В поверхностном слое покрытий увеличивается содержание кальция (14.4 ат.%) и фосфора (18.4 ат.%), присутствие фтора не идентифицируется. Элементный состав частиц, присутствующих на поверхности покрытий, отличается от состава самого покрытия и представлен, в основном, кальцием и фосфором. При повышении напряжения процесса МДО от 350 до 500 В отношение Ca/P варьируется для покрытий в диапазоне от 0.7 до 0.9, а для частиц от 1.8 до 1.0. Данные закономерности можно объяснить тем, что при повышении напряжения процесса МДО увеличивается интенсивность микроплазменных разрядов, растет температура в области пробоя. Данные процессы инициируют переход:  $\beta$ -ТКФ  $\rightarrow$   $\alpha$ -ТКФ и частичное растворение  $\alpha$ -ТКФ.

Исследования коррозионной стойкости образцов магниевого сплава с покрытиями и без покрытий проводили с использованием 3,5% раствора NaCl (рис. 2). Было установлено, что при выдержке в стандартном растворе в течение 4 суток потеря массы образцов магниевого сплава без покрытий составляла 5,0 %, а образцов с покрытиями – 1,2 %.

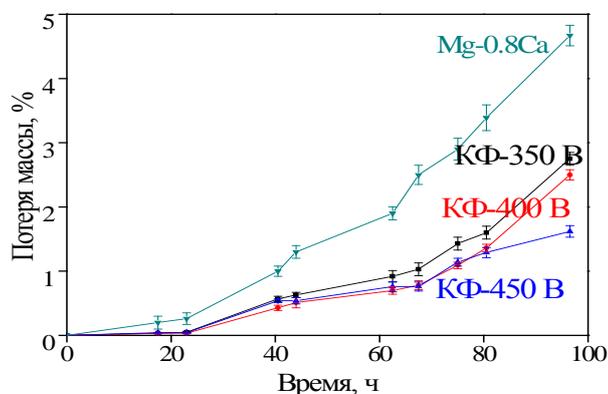


Рис. 2. График изменения потери массы сплава Mg-0.8Ca без покрытия и с покрытиями во времени

Таким образом, сформированные микродуговые КФ покрытия, содержащие частицы в-ТКФ, способствуют снижению скорости растворения сплава Mg-0.8Ca. Данные покрытия можно рекомендовать для создания биокomпозитов, используемых в травматологии и ортопедии, так как КФ соединения, входящие в состав покрытий, могут обеспечивать их высокую биологическую активность и успешную остеоинтеграцию имплантата.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований СО РАН, 2016–2019 гг., проект №23.2.5.

## Литература

1. Гнеденков С.В., Шаркеев Ю.П., Синебрюхов С.Л., Хрисанфова О.А., Легостаева Е.В., Завидная А.Г., Пузь А.В., Хлусов И.А. Функциональные покрытия для имплантационных материалов // ТМЖ. 2012. Т. 47, №1.
2. Владимиров Б.В., Крит Б.Л., Людин В.Б., Морозова Н.В., Суминов И.В., Эпельфельд А.В. Влияние состава электролита на свойства сплава МА2-1 при микродуговом оксидировании // Известия ТПУ. 2014. №2
3. *Sedelnikova M.V. et al.* Bioactive calcium phosphate coatings on metallic implants // AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2017. Vol. 1882, №. 1. P. 020062.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДОРОДОСТОЙКОСТИ, МЕХАНИЧЕСКИХ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА Э110 С ПОКРЫТИЕМ НИТРИДА ТИТАНА, ОСАЖДЕННОГО МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Э.М. Керимкулов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия  
E-mail: Theericfrost@mail.ru

**Аннотация.** В данной работе показано улучшения коррозионного сопротивления, механических и трибологических свойств образцов из сплава Э110 с осажденным защитным покрытием TiN под воздействием высокотемпературного наводороживания при 350 °С, 450 °С and 900 °С. Кристаллическая структура, морфология поверхности и распределение по глубине элементов были проанализированы с помощью рентгеновской дифракции, оптической микроскопии и спектроскопии оптического излучения тлеющего разряда. Интенсивность поглощения водорода сплавом Э110 с покрытием TiN увеличивается с температурой наводороживания. Твердость и модуль Юнга покрытий TiN немного изменились при наводороживании до 450 °С и уменьшились при 900 °С. На поверхности покрытых TiN образцов после наводороживания до 450 °С не наблюдалось трещин или отслоений, однако после наводороживания при 900 °С пленка растрескалась. Также было показано изменение коэффициента трения гидрогенизированных образцов.

**Ключевые слова:** покрытия, нитрид титана, сплавы циркония, сорбция водорода, механические свойства, коэффициент трения.

## HYDROGEN RESISTANCE, MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF ZIRCONIUM ALLOY E110 WITH TITANIUM NITRIDE COATING DEPOSITED BY MAGNETRON SPUTTERING

E. Kerimkulov

National Research Tomsk Polytechnic University, Russian Federation  
E-mail: Theericfrost@mail.ru

**Abstract.** In this paper, the increase in hydrogen resistance, mechanical and tribological properties of E110 alloy samples by TiN protective coating deposition under high-temperature gas-phase hydrogenation at 350 °C, 450 °C and 900 °C was shown. The crys-

talline structure, surface morphology and depth distribution of elements were analyzed by X-ray diffraction, optical microscopy and glow-discharge optical emission spectroscopy, respectively. The intensity of hydrogen absorption by TiN-coated E110 alloy increases with hydrogenation temperature. Hardness and Young's modulus of the TiN coatings slightly changed under hydrogenation up to 450 °C and dropped at 900 °C. No cracks or delaminations were observed on the surface of TiN-coated samples after hydrogenation up to 450 °C, however, the film was cracked after hydrogenation at 900 °C. Evolution of friction coefficient of hydrogenated samples was shown.

**Keywords:** coatings, titanium nitride, zirconium alloys, hydrogen sorption, mechanical properties, friction coefficient.

В данной работе показано улучшения коррозионного сопротивления, механических и трибологических свойств образцов из сплава Э110 с осажденным защитным покрытием TiN под воздействием высокотемпературного наводороживания при 350, 450 and 900 °C. Кристаллическая структура, морфология поверхности и распределение по глубине элементов были проанализированы с помощью рентгеновской дифракции, оптической микроскопии и спектроскопии оптического излучения тлеющего разряда. Интенсивность поглощения водорода сплавом Э110 с покрытием TiN увеличивается с температурой наводороживания. Твердость и модуль Юнга покрытий TiN немного изменились при наводороживании до 450 °C и уменьшились при 900 °C. На поверхности покрытых TiN образцов после наводороживания до 450 °C не наблюдалось трещин или отслоений, однако после наводороживания при 900 °C пленка растрескалась. Также было показано изменение коэффициента трения гидрогенизированных образцов.

В настоящее время актуальна проблема защиты циркониевых сплавов (Э110, Э125, Э635 и др.), являющихся конструкционными материалами оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), от деструктивного воздействия водорода в активных зонах водо-водяных и кипящих реакторов (ВВЭР и РБМК). В процессе эксплуатации такие изделия подвержены наводороживанию. Поглощенный циркониевыми сплавами водород, при достижении критической концентрации вызывает охрупчивание ТВЭЛа и последующее его разрушения. На процессы поглощения водорода изделиями существенное влияние оказывает структурно-фазовое состояние циркониевых сплавов, условия эксплуатации (температура, действующие напряжения). По техническим условиям не удается исключить проникновение водорода в изделия из циркониевых сплавов. Ввиду этого, разрабатываются различные технологии защиты сплавов от деструктивного воздействия водорода. Так, например, в работах [1, 2] приводятся нитридные и оксидные защитные покрытия. Одним из перспективных с точки зрения защитных свойств являются покрытия нитрида титана TiN. Покрытия TiN, осажденные методом магнетронного распыления, снижают интенсивность поглощения водорода циркониевыми сплавами и обладают высокой коррозионной и эрозионной стойкостью [3]. Однако в литературе не было рассмотрено влияние температуры на скорость поглощения водорода и изме-

нение физико-механических свойств после наводороживания. Таким образом, целью данной работы является исследование водородостойкости, механических и трибологических свойств циркониевого сплава Э110 при наводороживании в диапазоне температур 350–900 °С.

Для проведения экспериментов были подготовлены образцы из сплава Э110 размером 20×20×2 мм. Предварительно образцы были отшлифованы с помощью карбидкремниевой бумаги до средней высоты шероховатостей 60 нм, после чего были промыты в ацетоне. Нанесение покрытий осуществлялось на установке «Радуга-спектр» на кафедре общей физики ТПУ. Остаточное давление в камере составило  $3 \times 10^{-3}$  Па. Перед осаждением покрытия проводилась ионная очистка (Ar) низкоэнергетичным ионным источником при напряжении 1500 В в течение 5 мин. Основные параметры процесса магнетронного распыления: напряжение 380 В, ток 4 А, время напыления 30 мин. Анализ кривых поглощения водорода проводился на автоматизированном комплексе Gas Reaction Controller при температурах 350, 450 и 900 °С. С помощью металлографического микроскопа (МЕТАМ ЛВ-31) были получены изображения поверхностей образцов до и после наводороживания. При помощи высокотемпературного трибометра (PC-Operated High Temperature Tribometer ТНТ-S-АХ0000) было проанализировано изменение коэффициента трения. Твердость покрытий была определена по 10 индентациям при нагрузке 10 мН на нанотвердоме Nanotest 600 (Micro Materials, United Kingdom). Глубина индентации для всех измерений была меньше 1/10 толщины покрытия.

Из анализа графиков сорбции водорода образцами было показано, что скорость сорбции водорода циркониевым сплавом с покрытием TiN существенно ниже, чем исходным сплавом. С увеличением температуры наводороживания происходит увеличение интенсивность поглощения водорода в образцах циркониевого сплава с покрытием. При этом до температуры 450 °С интенсивность поглощения водорода меняется незначительно и имеет линейный вид. Однако, при температуре 900 °С интенсивность поглощения водорода резко возрастает, что связано с увеличением скорости диффузии водорода через покрытие и образованием трещин в покрытии. Склонность покрытий TiN к растрескиванию при температуре 900 °С обусловлена различием термических коэффициентов расширения нитрида титана и циркония. Твердость и модуль Юнга осажденного покрытия составили  $28,7 \pm 1,1$  ГПа и  $251 \pm 9$  ГПа, соответственно. После выдержки покрытий в среде водорода при температурах до 450 °С, твердость остается на уровне исходного покрытия, после чего резко снижается до  $18 \pm 3$  ГПа при 900 °С, что может быть связано с увеличением размера зерна покрытия и появлением растягивающих напряжений. Модуль Юнга покрытия TiN постепенно возрастает до  $272 \pm 12$  ГПа при увеличении температуры наводороживания до 450 °С, после чего также снижается до  $244 \pm 13$  ГПа. Коэффициент трения осажденного покрытия TiN составил 0.22, что в два раза

меньше, чем коэффициент трения циркониевого сплава Э110. Стоит отметить, что низкий коэффициент трения покрытия может оказывать благоприятный эффект на трибологические свойства сплава при вибрациях оболочек ТВЭЛов о дистанцирующие решетки. Износостойкость покрытий возрастает с увеличением температуры наводороживания, что может быть связано с формированием переходной диффузионной области между покрытием и циркониевым сплавом. На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Было показано, что формирование покрытий TiN на поверхности циркониевого сплава Э110 приводит к снижению наводороживания сплава. Скорость поглощения водорода сплавом с покрытием возрастает с увеличением температуры наводороживания.

2. Твердость покрытий с увеличением температуры наводороживания до 450 °С не изменяется и составляет примерно 28 ГПа, при этом модуль Юнга покрытий возрастает от 250 до 270 ГПа. Увеличение температуры наводороживания до 900 °С приводит к падению твердости и модуля Юнга покрытия, что может быть связано с увеличением размера зерна в покрытии и появлением растягивающих напряжений вследствие различия термических коэффициентов расширения циркониевого сплава и покрытия.

3. Показано, что при высоких температурах (900 °С) осажденные методом магнетронного распыления покрытия TiN склонны к растрескиванию. Таким образом, для защиты циркониевого сплава при высоких (аварийных) температурах необходимо формирование промежуточного слоя для выравнивания коэффициента термического расширения, либо формирование более эластичных покрытий, в том числе покрытий TiN.

## **СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СТАЛИ 20Х13, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ ИНЖЕКЦИОННОГО ФОРМОВАНИЯ**

**Н.В. Киселев, В.С. Шадрин**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия

E-mail: nicolas93.08@mail.ru

**Аннотация.** Наряду с развитием традиционных способов получения металлических изделий (литьем, штамповкой и др.) в последнее время интенсивно развиваются технологии, основанные на применении исходных компонентов в высокодисперсном состоянии, которые консолидируются в процессе воздействия давления, температуры и других факторов. Такие технологические процессы позволяют получить изделия сложной геометрической формы, обеспечивая высокую точность размеров, заданные эксплуатационные характеристики и приемлемую стоимость.

Примером такого процесса является МИМ-технология или технология инъекционного формования порошковых металлов под давлением.

Сталь 20X13 относится к коррозионностойким и жаропрочным сталям, применяется для изготовления режущего, мерительного инструмента, различных деталей, работающих на износ в агрессивных средах при повышенных температурах. Существуют порошки 20X13 отечественного производства, однако до настоящего времени они не нашли применения в МИМ-технологии. Поэтому целью настоящей работы является исследование структуры и свойств стали, полученной по МИМ-технологии, из фидстока на основе металлического порошка 20X13.

**Ключевые слова:** МИМ-технология, фидсток, металлический порошок, связующие, инжекционное формование.

## **STRUCTURE AND PROPERTIES OF STEEL 20X13, OBTAINED BY INJECTION FORMING METHOD**

**N. Kiselev and Shadrin**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: nicolas93.08@mail.ru

**Abstract.** Along with the development of traditional methods of producing metal products (the casting, stamping, etc.) have recently been intensively developing technologies based on using the initial components in a highly dispersed state, which consolidate in the process pressure, temperature, and other factors. Such technological processes make it possible to obtain products of complex geometric shape, providing high precision of dimensions, specified performance characteristics and acceptable cost.

An example of such a process is the MIM-technology or the technology of injection molding of powdered metals under pressure.

Steel 20X13 refers to corrosion-resistant and heat-resistant steels; it is used for the manufacture of cutting, measuring tools, various parts, working on wear in corrosive environments at elevated temperatures. There are powders 20X13 domestic productions, but up to now they have not found application in MIM-technology. Therefore, the aim of this work is to study the structure and properties of steel obtained by MIM-technology from a feedstock based on a metal powder 20X13.

**Keywords:** MIM technology, feedstock, metal powder, binders, injection molding.

МИМ-технология или технология инжекционного формования порошковых металлов под давлением является одной из перспективных инновационных технологий, которая обладает преимуществами порошковой металлургии и технологии литья. Технология основана на применении исходных компонентов в высокодисперсном состоянии, которые консолидируются в процессе воздействия давления, температуры и других факторов. МИМ-технология позволяет получить изделия сложной геометрической формы, обеспечивая высокую точность размеров, заданные эксплуатационные характеристики и приемлемую стоимость используя при этом практически неограниченный выбор металлических порошков. Технологический процесс заключается в формовании заготовки из металлополимерных композиций (фидстоков) с последующим спеканием до высокой плотности [1].

Основным преимуществом МИМ-технологии является возможность точного повторения геометрии изделия, высокая точность размеров и высокие прочностные характеристики, в дополнение к этому такой способ обработки материалов считается сегодня самым низкочувствительным. Сталь 20Х13 относится к коррозионно-стойким и жаропрочным сталям, применяется для изготовления режущего, мерительного инструмента, различных деталей, работающих на износ в агрессивных средах при повышенных температурах.

Образцы были изготовлены из смеси порошков железа и легирующих компонентов для формирования сплава 20Х13 [3]. В состав связующего входили парафин с воском. Фидсток разогревался до температуры 90 °С и под давлением подавался в стальную форму. Спекание образцов производили в вакууме при температуре 1350 °С. Исследование фазового состава и структуры, полученной стали проводили методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) и рентгеноструктурного анализа. Механические испытания на растяжение проводили на испытательной установке Instron 5982 со скоростью нагружения 1 мм/мин. Значения микротвердости по Виккерсу определяли на твердомере ПМТ-3.

Пористость материала составляет 6%. На рентгенограммах образца фиксируются только пики, соответствующие фазе Fe–Cr. Результаты рентгеноструктурного анализа показали, что параметр решетки Fe–Cr совпадает со значениями, представленными в картотеке ASTM и составляет 28773 Е, размер областей когерентного рассеяния (ОКР)  $D = 100$  нм, микродисторсия  $\epsilon = 1.5 \cdot 10^{-3}$ .

Условный предел текучести 250 МПа и предел прочности 620 МПа изготовленных образцов были определены из диаграммы нагружения. Значение микротвердости по Виккерсу составило 270 МПа. Значения предела прочности и твердости, указанные в справочных данных [2] для стали 20Х13, хорошо согласуются с аналогичными показателями, полученными в настоящей работе. Низкий предел текучести материала, по-видимому, вызван увеличением пластичности стали в следствие медленной скорости охлаждения.

Таким образом, в работе показано, что образцы, полученные методом инъекционного формования из фидстока на основе порошка 20Х13 обладают более высокой прочностью, чем изделия, полученные традиционными методами. Структура полученных образцов пористая. На рентгенограммах фиксируются только пики, соответствующие фазе Fe–Cr.

## Литература

1. Довыденков В.А. МИМ-технология: новые возможности изготовления заготовок / В.А. Довыденков, М.А. Крысь, Г.П. Фетисов // Заготовительные производства в машиностроении. 2006. № 8. С. 47–50.

2. *Металлические порошки для наплавки и напыления* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.polema.net/metallicheskie-poroshki.html>. 10.11.2016.

3. *Марочник сталей и сплавов*. 4-е изд., переработ. и доп. / Ю.Г. Драгунов, А.С. Зубченко, Ю.В. Каширский и др. / под общ. ред. Ю.Г. Драгунова, А.С. Зубченко. М., 2014. 491 с.

## **ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ УЗЛА ТРЕНИЯ В ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ**

**М.А. Кормушкин, А.В. Гуськов, К.Е. Милевский**

Новосибирский государственный технический университет, Россия  
E-mail: kormushkinmikhail@gmail.com

**Аннотация.** В работе выделены и исследованы физические процессы при движении метаемого устройства в баллистической установке. Изучен процесс формирования профиля на узле трения, и определено влияние геометрических параметров профиля внутренней поверхности баллистической установки на удельное давление формирования узла трения метаемого устройства.

**Ключевые слова:** узел трения, пластическое деформирование, удельное давление, метаемое устройство, тепловыделение, баллистическая установка.

## **THE STUDY OF THE PHYSICAL PROCESS OF FORMATION OF A FRICTION UNIT IN HIGH-SPEED BALLISTIC INSTALLATION**

**M.A. Kormushkin, A.V. Guskov and K.E. Milevskiy**

Novosibirsk State Technical University, Russian Federation  
E-mail: kormushkinmikhail@gmail.com

**Abstract.** In the paper, physical processes were identified and investigated when the device being thrown in a ballistic installation moved. The process of forming a profile on the friction unit was studied, and the influence of the geometric parameters of the profile of the inner surface of the ballistic installation on the specific pressure of the formation of the friction unit of the device being thrown was determined.

**Keywords:** friction unit, plastic deformation, ballistic installation.

Узел трения является важным элементом для разработки и проектирования метаемого устройства, применяемого в высокоскоростной баллистической установке.

Узел трения метаемого устройства выполняет две приоритетные задачи:

- обеспечение поступательного и вращательного движения метаемого устройства за счет профиля внутренней поверхности баллистической установки;
- герметизация пороховых газов.

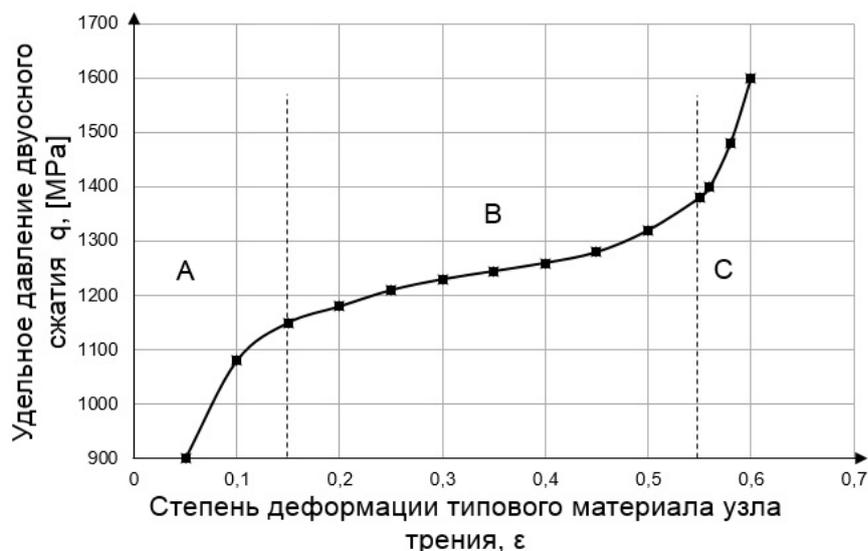


Рис. 1. Зависимость  $q = f(\epsilon)$  типowego материала узла трения

Особенностью совершенствования и модернизации метаемого устройства является необходимость сохранения геометрических параметров узла трения (диаметра, ширины, и расстояния от дна), и эксплуатационных свойств: усилия формирования профиля узла трения и выносливости баллистической установки.

При исследовании выделены основные физические процессы, протекающие в баллистической установке при метании образца:

- пластическое деформирование материала узла трения при движении по профилю баллистической установки (рис. 1);
- тепловыделение в зоне взаимодействия узла трения метаемого устройства и внутренней поверхности баллистической установки.

Целью исследования узла трения метаемого устройства нового типа является выделение и изучение физических процессов, протекающих при метании устройства.

Первоочередным методом для исследования пластической деформации материала узла трения при врезании (формирование впадины между выступами) использовался экспериментальный метод двусосного сжатия, основанный на ступенчатой деформации прямоугольного выступа узла трения нового типа пуансоном с рабочей поверхностью, соответствующей внутреннему профилю трубы типовой баллистической установки. На втором этапе исследований выполнена серия экспериментов для установления зависимости удельного давления  $q$

$= f(\epsilon)$  от степени деформации для конструкции узла трения нового типа.

Испытано 5 серий образцов (рис. 2) узлов трения нового типа с различным соотношением  $h/c$  единичного выступа. Точность оценки контактного давления составляет  $\pm 8\%$  при изменении предела текучести  $\sigma_{02}$  высокоуглеродистой стали от 350 до 440 МПа.

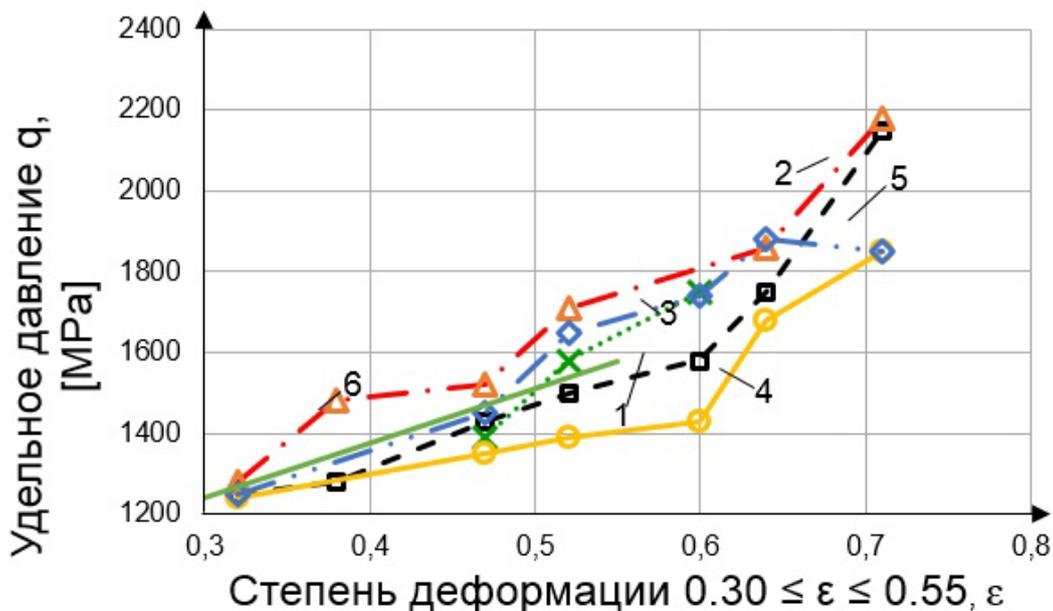


Рис. 2. Испытание 5 образцов с различной геометрией единичного выступа

На третьем этапе проведены эксперименты по двухосному сжатию единичного выступа узла трения на образце диаметром 122 мм. По результатам опытов построены зависимости усилия от глубины внедрения нареза:  $P = f(y)$ , и зависимость удельного контактного давления от степени деформации  $q = f(\epsilon)$ .

Экспериментальные исследования методом двухосного сжатия позволяют сделать вывод, что геометрические параметры узла трения нового типа и удельное давление, необходимое для формирования выступа, связаны между собой одним из основных параметров нарезной части баллистической установки – глубиной нареза  $\Delta$ .

При оценке нагрузок продавливания метаемых образцов через профиль установлены следующие зависимости:

- усилие продавливания образцов с узлом трения нового типа через трубу с гладкой внутренней поверхностью меньше, чем медных узлов приблизительно в 1.7 раза;
- усилие на втором этапе при формировании выступа превышает усилие на первом примерно в 1.55 раза для узла трения нового типа и в 2.2 раза для медного.

При равенстве углов наклона переднего конуса гладкой трубы и конического ската профильной трубы усилие проката пропорционально давлению в контакте «профильная труба – узел трения», т.е. удельному давлению.

По результатам проведенных опытов определено, что зависимости усилия продавливания зависят от количества выступов. С увеличением количества выступов усилие продавливания значительно возрастает. Экспери-

ментально установлено, что основное влияние на усилие продавливания оказывает ширина выступа узла трения.

### Литература

1. Балакин В.А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения. М.: Машиностроение, 1980. 136 с.
2. Ведяев В.Я., Гуськов А.В., Милевский К.Е. и др. Параметры, критерии работоспособности ведущего пояска нового типа // Наука. Промышленность. Оборона: Труды 15 Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 23–25 апр. 2014 г. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. С. 135–137.
3. Хребтова М. С. Новый тип ведущего пояска / М.С. Хребтова, К.Е. Милевский, А.В. Гуськов // Наука. Промышленность. Оборона: Труды 17 Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 20–22 апр. 2016 г. : в 4 т. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. Т. 2. С. 101–107.
4. Krafft I.M. Surface Friction in Ballistic Penetration // J. Appl. Phys. 1995. Vol. 26. P. 81–94.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КЕРАМИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА $ZrO_2(MgO)-Al_2O_3$ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР

М.В. Коробенков<sup>1</sup>, Р.В. Левков<sup>2</sup>, А.О. Товпинец<sup>3</sup>, В.Н. Лейцин<sup>3</sup>,  
С.Н. Кульков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия  
Балтийский федеральный университет имени И. Канта, Калининград, Россия  
E-mail: korobekov@ftf.tsu.ru

**Аннотация.** В работе представлены результаты экспериментальных исследований по определению температурной зависимости прочностных характеристик пористых керамических композитов. Композиты диоксида циркония с оксидом алюминия были получены изостатическим формованием нагрузкой 10 кН с последующим спеканием при температурах 1400, 1500 and 1650 °С. Показано, что с увеличением температуры спекания объем порового пространства уменьшался с 21 до 6,5%. Изгибная прочность композитов была получена изостатической нагрузкой при скорости 3 мм/мин в широком диапазоне температур. Уменьшение пористости привело к увеличению прочностных характеристик для всех температурных режимов испытаний. Прочность на изгиб полученных композитов уменьшалась с увеличением температуры испытаний.

**Ключевые слова:** Керамический композит, пористость, предел прочности.

# THE STUDY OF THE PROPERTIES OF CERAMIC COMPOSITES ZrO<sub>2</sub>(MgO)-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> IN A WIDE TEMPERATURE RANGE

M.V. Korobekov<sup>1</sup>, R.V. Levkov<sup>2</sup>, A.O. Tovpinets<sup>3</sup>, V.N. Leitsin<sup>3</sup>,  
S.N. Kulkov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> National Research Tomsk State University, Russian Federation

<sup>2</sup>Institute of strength physics and materials science SB RAS, Tomsk, Russian Federation

<sup>3</sup>Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russian Federation

E-mail: korobekov@ftf.tsu.ru

**Abstract.** The paper presents the experimental data on determining strength characteristics of samples of oxide ceramic composites. Zirconia toughened alumina composites has been prepared by uniaxial compaction at 10 kN by mixture of ZrO<sub>2</sub>(3%MgO) - 20 wt% and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 80 wt% followed by sintering at 1400, 1500 and 1650 °C. The bending strength are derived under static conditions at loading rate of 3 mm/min in a wide temperature range. The average values of the bending strength decreases with increasing test temperature for all obtained samples.

**Keywords:** ceramic composite, porosity, tensile strength.

Механизмы создания керамических композитов с заданными свойствами обуславливают наибольший интерес применимости подобного класса материалов в элементах конструкций и ответственных механизмов, работающих в условиях широкого диапазона температур. Известно, что наиболее значимыми факторами, влияющими на механические свойства, является пористость материала [1, 2]. Контроль технологических параметров производства композита, таких как дисперсность исходной системы порошковой смеси и температура спекания, позволяет создавать изделия с заданной пористостью.

Целью данной работы явилось исследование прочностных характеристик керамического композита при трехточечном изгибе в широком диапазоне температур.

В качестве объекта исследований были получены призматические образцы из порошковой смеси диоксида циркония, стабилизированного оксидом магния и оксида алюминия, предварительно мехактивированные в течение 24 часов в шаровой мельнице. Получение образцов заключалось в прессовании в пресс-формах с последующим спеканием при температурах 1400, 1500 и 1650 °C с высокотемпературной выдержкой в течение 1 ч.

Пористость образцов измерялась гидростатическим методом в дистиллированной воде. Результаты измерений объема порового пространства составили 21, 11 и 6.5% для температур спекания 1400, 1500 и 1650 °C соответственно.

Определение физико-механических свойств образцов проводили при испытании методом трехточечного изгиба с использованием испытательной системы Instron ElectroPuls E1000 с климатической камерой. Величину предела прочности определяли при скорости нагружения 0.3 мм/мин.

Средние значения предела прочности на изгиб исследуемого класса композита в широко диапазоне температур представлены в таблице:

Температура спекания	1400 °С	1500 °С	1650 °С
Температура испытаний	Выдержка 1 час	Выдержка 1 час	Выдержка 1 час
-50 °С	23.49 МПа	80.49 МПа	127.17 МПа
24 °С	27.26 МПа	86.88 МПа	94.63 МПа
250 °С	19.79 МПа	52.49 МПа	78.43 МПа

Результаты определения свойств пористых композитов показали, что наименьшими прочностными характеристиками обладают образцы с пористостью 21%. Выявлено, что увеличение температуры испытаний до 250 °С привело к снижению прочностных характеристик композитов для всех типов образцов, это связано с наличием тетрагональной фазы диоксида циркония и уменьшением энергии фазового перехода из тетрагональной в моноклинную модификацию. Для образцов, испытанных при отрицательной температуре также наблюдалось снижение прочностных характеристик, однако для высокоплотных образцов произошло увеличение прочностных характеристик на ~30%.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-31-60059 мол\_а\_дк.

#### Литература

1. *Grigoriev M.V. and Kulkov S.N.* Structures and properties of alumina-based ceramics for reconstructive oncology // AIP Conf. Proc., 2016, vol. 1760, p. 020022.
2. *Левков Р.В., Коробенков М.В.* Алюмооксидная керамика, спеченной при разложении смеси оксид-гидроксид, исследование ее свойств // Высокие технологии в современной науке и технике, 2016, С. 131.

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННОЙ СМЕСИ $ZrO_2(MgO)-Al_2O_3$

**А.С. Коченова, М.В. Коробенков**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: korobenzkov@ftf.tsu.ru

**Аннотация.** В работе представлены результаты процесса влияния механической активации порошков диоксида циркония и оксида алюминия на структуру порошковой смеси для получения керамического композита. Показано, что исходная структура порошка оксида алюминия состояла из изолированных частиц с правильной огранкой со средним размером 50 мкм. Структура порошка диоксида циркония представляла собой смесь сферических частиц со средним размером мкм и частиц нерегулярной формы со средним размером 20 мкм. В результате мехактивации были получены конгломераты частиц со средним размером 64 мкм, в стыках которых присутствовали частицы диоксида циркония.

**Ключевые слова:** Диоксид циркония, оксид алюминия, мехактивация

# STRUCTURE AND PROPERTIES OF COMPOSITE $ZrO_2(MgO)-Al_2O_3$

A. Kochenova and M. Korobekov

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: korobekov@ftf.tsu.ru

**Abstract:** The paper presents the results of the influence of mechanical activation of zirconium dioxide and aluminum oxide powders on the structure of the powder mixture to produce a ceramic composite. It is shown that the initial structure of the aluminum oxide powder consisted of isolated particles with a regular cut with an average size of 50 microns. The structure of zirconium dioxide powder was a mixture of spherical particles with an average size of microns and particles of irregular shape with an average size of 20 microns. As a result of mechanical activation conglomerates of particles with an average size of 64 microns in which joints there were particles of zirconium dioxide were received.

**Keywords:** Zirconium dioxide, aluminium oxide, mechanical activation.

Структура и свойства керамических композитов, изготовленных по порошковым технологиям, напрямую зависит от свойств исходных порошков [1–4]. В данной работе проведено исследование влияние механической активации в шаровых мельницах на структуру композитной смеси диоксида циркония, стабилизированного оксидом магния 3% ( $ZrO_2-MgO$ ) и оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ).

Порошки диоксида циркония, стабилизированные оксидом магния получали путем денитрации водных растворов солей циркония и нитрата магния в высокочастотном разряде плазмы. Морфология исходных структур порошка состояла из сферических частиц и частиц нерегулярной формы, напоминающих затвердевшую пену. При этом средний размер сферических частиц - 3 мкм, а размеры остальных частиц достигали 20 мкм.

Порошки оксида алюминия были получены термической обработкой гидроксида алюминия модификации гиббсит при температуре 1300°C. При данной температуре происходит разложение гидроксида на воду  $\alpha-Al_2O_3$ . Порошок состоял из изолированных поликристаллических частиц со средним размером частиц 50 мкм.

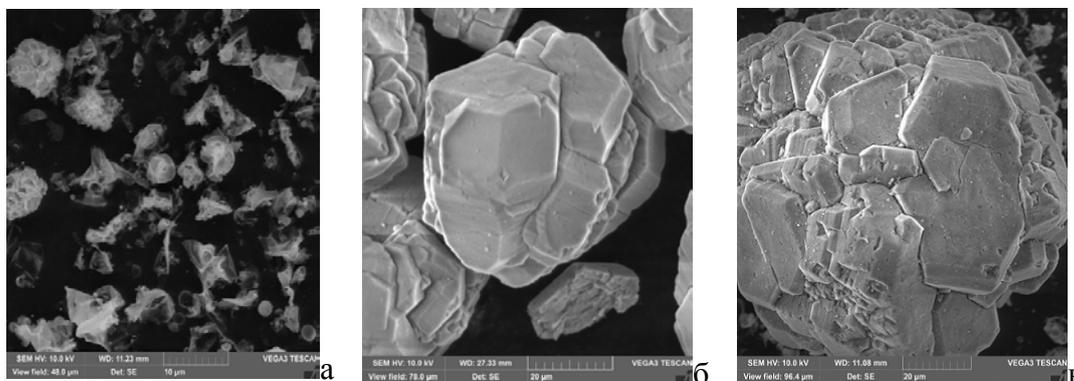


Рис. 1. Исходные структуры порошков а)  $ZrO_2-MgO$ , б)  $Al_2O_3$  и в) структура конгломерата после мехактивации

Полученные порошки в соотношении 20% ( $ZrO_2-MgO$ ) – 80% ( $\alpha-Al_2O_3$ ) смешивались в течение 24 часов в шаровых мельницах. В результате мехактивации образовались конгломераты поликристаллических частиц с хорошей огранкой, в стыках которых присутствовали частицы диоксида циркония. Средний размер полученных конгломератов – 64 мкм.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-31-60059 мол\_a\_дк.

### Литература

1. Буяков А.С., Кульков С.Н. Механические свойства композита  $ZrO_2-MgO$  с многоуровневой поровой структурой // Современные технологии и материалы новых поколений, 2017, С. 153-154.

2. Korobekov M.V., Kulkov S.N. Structure and properties of ZTA composites for joint replacement // AIP Conf. Proc., 2017, vol. 1882, p. 020035.

3. Sablina T., Savchenko N., Pshenichnyy A., Grigoriev M., Buyakova S. and Kulkov S. Development of bioceramic material for spinal surgery implants // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 2016, vol. 140, p. 012004.

4. Левков Р.В., Коробенков М.В. Алюмооксидная керамика, спеченной при разложении смеси оксид-гидроксид, исследование ее свойств // Высокие технологии в современной науке и технике, 2016. С. 131.

## ВЛИЯНИЕ ДВУХ СХЕМ РЕАЛИЗАЦИИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

**В.А. Красновейкин, Е.Н. Москвичев, В.А. Скрипняк, Д.А. Бородулин**

Национальный исследовательский Томский государственный университет;  
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия  
E-mail: volodia74ms@yandex.ru

**Аннотация.** По схеме равноканального углового прессования и прессования рифлением, реализующим интенсивную пластическую деформацию, были получены объемные и плоские образцы из алюминиевого сплава 1560 с ультрамелкозернистой структурой. Проведен комплекс исследований физико-механических свойств материала обработанных образцов, включающий изучение микроструктуры, фазового состава, измерение микротвердости, предела текучести и прочности при растяжении. Оба метода обработки показали общие тенденции влияния интенсивной пластической деформации на увеличение микротвердости, условного предела текучести на растяжение и повышение величины временного сопротивления при уменьшении предельных деформаций до разрушения.

**Ключевые слова:** интенсивная пластическая деформация, алюминиевые сплавы.

# DEPENDENCE OF PHYSICS AND MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINUM ALLOYS ON SEVERE PLASTIC DEFORMATION IN TWO TREATMENT SCHEMES

V. Krasnoveikin, E.N. Moskvichev, V.A. Skripnyak, D.A. Borodulin

National Research Tomsk State University,  
Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy  
of Sciences, Russian Federation  
E-mail: volodia74ms@yandex.ru

**Abstract.** In this work bulk and flat specimens of Al-Mg-based alloy 1560 with ultrafine-grained structure were obtained after processing by severe plastic deformation. Severe plastic deformation was realized in the scheme of equal channel angular pressing for bulk specimens and groove pressing for flat specimens. Both treatment methods showed general trends of the effect of severe plastic deformation on increasing of microhardness, tensile yield strength, ultimate tensile strength and reducing of ultimate tensile strain.

**Key words:** severe plastic deformation, aluminum alloys.

Высокие требования к прочности и надежности ответственных механизмов и элементов конструкций и новой техники является стимулом для развития технологий обработки конструкционных сплавов с целью повышения их прочностных свойств [1]. Технологии интенсивной пластической деформации позволяют за счет модификации зеренной структуры сплавов варьировать величину предельных деформаций до разрушения, предела текучести и временного сопротивления разрушению. Модификация крупнокристаллической (КК) зеренной структуры, в частности, ее измельчение с помощью интенсивной пластической деформации до нано- и ультрамелкозернистого (УМЗ) состояния, открывает новые возможности для создания материалов с заданными свойствами [2]. Варьируя параметры режимов прессования, а так же подбирая программу обработки по схемам равноканального углового прессования (РКУП) и прессования рифлением (ПР) можно добиться существенного повышения прочностных характеристик материалов объемных и плоских заготовок [3-5].

В работе представлены результаты исследований влияния интенсивной пластической деформации (ИПД) на микроструктуру и физико-механические свойства крупнокристаллического алюминиевого сплава 1560 в состоянии поставки. Обработка интенсивной пластической деформацией реализована по двум схемам: равноканальное угловое прессование (РКУП) и прессование рифлением (ПР).

РКУП проводили с использованием пресс-формы с каналами, пересекающимися под углом  $90^\circ$  без скруглений. Геометрические особенности пресс-формы обеспечивают максимальные степени накопления пластической деформации в материале за один проход равной 115 %. Обработку проводили при температуре 593 К. Обработывались призматические заго-

товки размерами 8x8x45 мм, изготовленные из горячекатаного прутка сплава 1560 (91 % Al – 7 % Mg – 0.73 Mn – < 1.2 % – остальное). ПР проводили при многократном обжатии плоских заготовок между двумя рифлеными пресс-формами, имеющими пазы трапециевидной формы, и последующем выпрямлении до начальной геометрии. Накопление пластической деформации в пределах 116 % за один цикл происходит в области изгиба за счет больших сдвиговых деформаций. Плоские заготовки для прессования размером 12x20x1.5 мм вырезали из прокатного листа сплава 1560 (92% Al – 6.1 % Mg – 0.59 % Mn – остальное.).

Исследование микроструктуры и текстуры образцов исследуемого алюминиевого сплава показало, что после обработки четырьмя проходами РКУП формируется однородная ультрамелкозернистая структура со средним размером зерна 3 мкм. После четырех циклов ПР в исследуемом сплаве получена бимодальная зеренная структура, состоящая из вытянутых крупных зерен размерами от 2.5 до 10 мкм и скоплений вокруг них зерен микронных и субмикронных размеров до 2.5 мкм.

Анализ экспериментальных данных выявил значительный вклад ИПД в изменение физико-механических свойств исследуемого сплава обоими методами прессования. Определено, что после обработки сплава четырьмя проходами РКУП его микротвердость возросла в ~1.5 раза, условный предел текучести при одноосном растяжении увеличился в ~1.8 раз, временное сопротивление в ~1.4 раза по сравнению с соответствующими значениями параметров в состоянии поставки [6]. После четырех циклов обработки ПР установлено, что величина микротвердости возрастает в ~2.7 раза условный предел текучести и временное сопротивление разрушению возрастают в ~1.4 и ~1.5 раз, соответственно [7]. Эффекты упрочнения исследуемого сплава после обработки в обоих случаях сопровождаются уменьшением предельных деформаций.

Эффекты увеличения микротвердости, условного предела текучести и временного сопротивления при растяжении с одновременным уменьшением предельных деформаций до разрушения после различных схем обработки ИПД являются общей характерной особенностью исследуемого алюминиевого сплава.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-5914.2016.1.

### Литература

1. *Sabirov I., Murashkin M.Yu., Valiev R.Z. et al.* Nanostructured aluminium alloys produced by severe plastic deformation: new horizons in development // *Materials science and engineering: A*. 2013. Vol. 560. P. 1-24.
2. *Валиев Р.З., Александров И.В.* Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. М.: Академкнига, 2007. 397 с.

3. *Estrin Y., Murashkin M.Yu., Valiev R.Z.* Ultrafine-grained aluminium alloys: Processes, structural features and properties// *Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Production, Processing and Applications*. 2010. P. 468–503.

4. *Маркушев М.В.* К вопросу об эффективности некоторых методов интенсивной пластической деформации, предназначенных для получения объемных наноструктурных материалов // *Письма о материалах*. 2011. Т. 1. № 1. С. 36–42.

5. *Козулин А.А., Скрипняк В.А., Красновейкин В.А., Скрипняк В.В., Каравацкий А.К.* Исследование физико-механических свойств ультрамелкозернистых магниевых сплавов после интенсивной пластической деформации // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2014. Т. 57. № 9. С. 98–104.

6. *Козулин А.А., Красновейкин В.А., Скрипняк В.В., Хандаев Б.В., Ли Ю.В.* Механические свойства алюминий магниевых сплавов после интенсивной пластической деформации // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 6. С. 888.

7. *Москвичев Е.Н., Скрипняк В.А., Лычагин Д.В., Козулин А.А., Скрипняк В.В.* Влияние структуры на сопротивление пластической деформации алюминиевого сплава 1560 после обработки методом прессования рифлением. *Письма о материалах*. 2016. Т. 6. № 2 (22). С. 141–145.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ АУКСЕТИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ ПОД СОСРЕДОТОЧЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

**А.А. Кузнецова, Д.Д. Мухин, А.А. Васильев**

Тверской государственный университет, Россия

E-mail: ddmu@yandex.ru

**Аннотация.** Представлены структурная и математическая модель, результаты аналитического исследования ауксетических свойств структурной ячейки. Приведены результаты вычислительных экспериментов. Показаны обусловленные отрицательным коэффициентом Пуассона необычные особенности деформирования ауксетической решетки под сосредоточенной нагрузкой. В частности, показано, что частицы ауксетической решетки смещаются в зону под нагрузкой.

**Ключевые слова:** метаматериал, ауксетик, моделирование.

## MODELING OF THE DEFORMATION OF AUXETIC LATTICE UNDER A CONCENTRATED LOAD

**A. Kuznetsova, D. Mukhin, A. Vasiliev**

Tver State University, Russian Federation

E-mail: ddmu@yandex.ru

**Abstract.** The structural and mathematical model, the results of an analytical study of the auxetic properties of the structural cell are presented. The results of computational experiments are presented. The unusual features of deformation of the auxetic lattice under the concentrated load due to the negative Poisson coefficient are shown. In particular, it is shown that the particles of the auxetic lattice are shifted to the zone under load.

**Keywords:** metamaterial, auxetic, modeling.

В настоящее время все большее внимание уделяется разработке теории метаматериалов – искусственных материалов, обладающих необычными для природных материалов свойствами. Одним из таких свойств является свойство ауксетичности – отрицательного коэффициента Пуассона, когда материал расширяется в поперечном направлении при растяжении в продольном направлении.

Решетки Коссера, составленные из частиц конечного размера с симметричными соединениями использовались как исходные структурные модели для построения обобщенных континуальных микрополярных моделей сред с учетом микровращений частиц. Усложнение структуры ячеек позволяет строить модели решеток и сред с новыми необычными свойствами, в частности свойством ауксетичности. Структурная и математическая модель ауксетической решетки на основе частиц конечного размера предложены в статьях [1, 2].

В работе исследованы свойства простейшей ячейки из четырех частиц. Для нее выполнено аналитическое исследование и, в частности, найдены соотношения микропараметров, при которых ячейка приобретает ауксетические свойства.

Исследование свойств решеток с большим количеством частиц проведено на основе вычислительных экспериментов. Явление расширения ауксетической решетки при растяжении уже достаточно известно. Интерес представляет выявление и демонстрация других обусловленных отрицательным коэффициентом Пуассона необычных эффектов. В вычислительных экспериментах изучалось деформирование обычной решетки с симметричными соединениями и ауксетической решетки под действием сосредоточенной нагрузки. Представлены некоторые результаты таких экспериментов. В обычной решетке при деформировании частицы смещаются в направлении из зоны сжатия и, таким образом, обычная решетка разрыхляется под нагрузкой. В ауксетической решетке смещения частиц направлены в зону под приложенной нагрузкой и, таким образом, ауксетическая решетка уплотняется под нагрузкой. Различается также воздействие на основание.

В технологических применениях такое свойство ауксетического материала представляет интерес в ловушках, фильтрах частиц, фундаментах, основаниях. В обычном материале частица, нажимая на ячейки фильтра, раздвигает их, уменьшая задерживающую силу, ауксетический материал сжимается, сгущаясь под частицей, удерживает ее.

Работа частично выполнялась в рамках базовой части госзадания Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 9.7446.2017/БЧ).

## Литература

1. *Vasiliev A.A., Dmitriev S.V., Ishibashi Y., Shigenari T.* Elastic properties of a two-dimensional model of crystals containing particles with rotational degrees of freedom // *Physical Review B*, 2002, 65, 094101.

2. *Vasiliev A.A., Dmitriev S.V., Miroshnichenko A.E.* Multi-field continuum theory for medium with microscopic rotations // *Int. J. Solids Struct.*, 2005, 42 (24-25), 6245-6260.

## ФОРМИРОВАНИЕ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ В БИОИНЕРТНОМ СПЛАВЕ Ti-40 мас.% Nb В РЕЗУЛЬТАТЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

**А.М. Майрамбекова, А.Ю. Ерошенко**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

E-mail: aikol@ispms.tsc.ru

**Аннотация.** Представлены результаты исследования микроструктуры, фазового состава и механических свойств (микротвердости) биоинертного сплава Ti-40 мас.% Nb в ультрамелкозернистом состоянии. Ультрамелкозернистое состояние формировали комбинированной интенсивной пластической деформацией (ИПД), включающей абс-прессование в пресс-форме и многоходовую прокатку. Комбинированный метод ИПД приводит к формированию в биоинертном сплаве Ti-40 мас. % Nb УМЗ структуры со средним размером структурных элементов до 0.3 мкм. Ультрамелкозернистая структура обеспечивает высокий уровень механических свойств (микротвердости), при сохранении низкого модуля упругости 70–75 ГПа.

**Ключевые слова:** ультрамелкозернистое состояние, интенсивная пластическая деформация, микроструктура, механические свойства.

## PRODUCTION OF THE ULTRAFINE-GRAINED STRUCTURE IN THE BIOINERT TI-40 WT.%NB ALLOY AS A RESULT OF SEVERE PLASTIC DEFORMATION

**A. Mairambekova and A. Eroschenko**

National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: aikol@ispms.tsc.ru

**Abstract.** The results of investigation of microstructure, phase composition and mechanical properties (microhardness) of bioinert Ti-40 wt.% Nb alloy in ultrafine-grained state are represented. The ultrafine-grained state was formed by combined severe plastic deformation (SPD), including abc-pressing in a press form and multi-pass rolling. The combined method of SPD to result the formation in the bioinert Ti-40 wt. % Nb alloy ultrafine-grained state structures with an average size of structural elements up to 0.3 mm. Ultrafine-grained structure provides a high level of mechanical properties (microhardness) while retaining a low modulus of elasticity of 70–75 GPa.

**Keywords:** ultrafine-grained state, severe plastic deformation, microstructure, mechanical properties.

В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений в развитии медицинских материалов является применение биоинертных титановых  $\beta$ -сплавов с низким модулем упругости и высокими механическими свойствами, например, сплавов систем Ti-Nb, и Ti-Nb-Zr [1]. Легирование титана ниобием до 40–45 мас. % позволяет уменьшить модуль упругости до 55 ГПа, но при этом происходит снижение и прочностных характеристик. Формирование в биоинертных сплавах наноструктурного (НС) и ультрамелкозернистого (УМЗ) состояния методами интенсивной пластической деформации (ИПД) позволяет решить данную проблему и получать заготовки и изделия со значительно более высокими механическими свойствами по сравнению крупнозернистым состоянием [2]. В связи с этим актуальными являются задачи, посвященные формированию НС / УМЗ состояний методами ИПД в биоинертных сплавах системы титан и ниобий с целью повышения механических свойств при сохранении низкого модуля упругости.

Целью работы является исследование структуры и механических свойств биоинертного сплава Ti-40 мас. % Nb в УМЗ состоянии, сформированном комбинированным методом интенсивной пластической деформации, включающий abc- прессование и многоходовую прокатку.

В качестве материала исследования был выбран сплав Ti-40 мас. % Nb (Ti40Nb). Для формирования УМЗ структуры применяли двухэтапный метод интенсивной пластической деформации (ИПД), разработанный в лаборатории ФНБ ИФПМ СО РАН, который включал многократную трехцикловую осадку заготовки в пресс-форме в интервале температур 500–400°C и последующую многоходовую прокатку при комнатной температуре. Дополнительная деформация прокаткой способствовала уменьшению размера структурных элементов и формированию однородной структуры, созданной в объеме заготовок на этапе прессования. Перед деформационной обработкой заготовки сплава Ti40Nb в литом состоянии отжигали при температуре 1100°C в течение 1 часа в аргоне с последующей закалкой в воду [3]. Исходным состоянием сплава будем считать закаленное состояние.

После закалки микроструктура сплава Ti40Nb состояла из матричных зерен с размерами 120–650 мкм мартенсита. Средний размер элементов структуры сплава в закаленном состоянии составляет 330 мкм. Распределение микротвердости по объему заготовки сплава Ti40Nb неоднородное. Для зерен  $\beta$ -фазы значения микротвердости находятся в пределах 1300–1900 МПа, а для мартенситной  $\alpha'$ -фазы 2800–3200 МПа [3]. На полученных рентгеновских дифрактограммах сплава Ti40Nb после закалки четко наблюдаются пики  $\beta$ -фазы и мартенситной  $\alpha'$ -фазы. Значения модуля упругости в исходном состоянии сплава Ti40Nb находятся в пределах 70–75 ГПа, которые определяли при измерении нанотвердости.

В результате ИПД по всему объему заготовки сплава Ti40Nb было сформировано УМЗ состояние со средним размером элементов структуры

(зерна, субзерна и фрагменты) не превышающем 0.3 мкм. Согласно данным просвечивающей электронной микроскопии структура сплава Ti40Nb после ИПД представлена стабильными  $\beta$ -фазой на основе твердого раствора титана и/или ниобия и  $\beta$ -фазой, а также неравновесной наноразмерной  $\omega$ -фазой (5–10 нм). Распределение микротвердости по объему образцов после ИПД однородная. Среднее значение микротвердости сплава Ti40Nb составило 3300 МПа. На рентгеновских дифрактограммах сплава Ti<sub>40</sub>Nb в УМЗ состоянии присутствуют рефлексы только основной матричной фазы. Рефлексы от  $\omega$ -фазы на дифрактограммах не обнаружены, вероятно, вследствие нанокристаллического размера данной фазы и ее небольшой объемной доли.

Комбинированный метод ИПД, включающий многократное абс-прессование и многоходовую прокатку, приводит к формированию в биоинертном сплаве Ti-40 мас. % Nb УМЗ структуры со средним размером структурных элементов до 0.3 мкм. Многофазная УМЗ структура в исследуемом сплаве, по сравнению с исходным крупнозернистым состоянием, обеспечивает значительное повышение микротвердости до 3300 МПа при сохранении низкого модуля упругости 70–75 ГПа.

#### Литература

1. *Abdel-Hady Gepreel M., Niinomi M.* Biocompatibility of Ti-alloys for long-term implantation // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2013. Vol. 20. P. 407–415.
2. *Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G.* Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications // *Publ. Wiley and TMS, Hoboken, USA*. 2014. P.456.
3. *Sharkeev Y.P., Eroshenko A.Y., Glukhov I.A., et al.* Microstructure and mechanical properties of Ti–40 mass % Nb alloy after megaplastic deformation effect. *AIP Conf. Proc.* New York: AIP Publishing LLC. 2015. 1683: 020206.
4. *Шаркеев Ю.П., Ерошенко А.Ю., Данилов В.И., Глухов И.А., Толмачев А.И.* Получение биоинертных сплавов в ультрамелкозернистом состоянии // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2015. Т. 58. № 2. С. 112–116.

### ФАЗОВЫЙ СОСТАВ СВС-ЛИГАТУР СИСТЕМЫ Al–Ti–V И ИХ ВЛИЯНИЕ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

**А.Е. Матвеев<sup>1</sup>, И.А. Жуков<sup>1,2</sup>, В.В. Промахов<sup>1,2</sup> П.Ю. Никитин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,

<sup>2</sup>Институт проблем химических и энергетических технологий СО РАН, Россия

E-mail: gofra930@gmail.com

**Аннотация.** В работе исследовано структурно-фазовое состояние порошковых композиционных материалов Ti–V–Al, полученных методом СВС. Полученные композиционные материалы использовались в качестве лигатур для ковального алюминиевого

сплава 6082. Введение 1 мас.% частиц диборида титана в алюминиевый расплав приводит к увеличению прочности сплава в литом состоянии от 100 МПа до 160 МПа и сопровождается увеличением пластичности.

**Ключевые слова:** СВС, порошковая система, лигатуры Al–Ti–B, прочность, пластичность.

## PHASE COMPOSITION OF SHS-LIGATURES OF Al–Ti–B SYSTEM AND THEIR IMPACT ON MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINUM ALLOYS A.E.

Matveev<sup>1</sup>, I.A. Zhukov<sup>1,2</sup>, V.V. Promakhov<sup>1,2</sup>, P.Y. Nikitin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University,

<sup>2</sup>Institute for Problems of Chemical & Energetic Technologies SB RAS, Russian Federation  
E-mail: gofra930@gmail.com

**Abstract.** In the paper studied the structural-phase state of the Ti–B–Al powder composite materials obtained via SHS process. The resulting composite materials were used as master alloy for wrought aluminum alloy 6082. The introduction of 1 wt.% of the titanium diboride particles into aluminum melt leads to increase the strength of the alloy in the cast state from 100 MPa to 160 MPa and accompanied with increasing of elongation.

**Keywords:** SHS, powder system, alloys Al–Ti–B, toughness, ductility.

С развитием автомобильной и авиакосмической промышленности возрастает интерес к алюминиевым материалам повышенной прочности. Добиться повышения свойств материала можно контролируя химический состав и размер зерна в алюминиевом сплаве за счет введения в него нано-, микроразмерных частиц тугоплавких соединений [1, 2]. Однако непосредственное введение частиц и равномерное распределение их по расплаву невозможно, так как присутствует эффект агломерации этих частиц. Решить данную проблему возможно используя предварительно подготовленные лигатуры. В данном случае большое значение имеет способ получения лигатуры, обеспечивающий оптимальное содержание упрочняющих частиц, их морфологию и фазовый состав [1, 3]. Одним из таких методов является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), с использованием которого возможно получение различных соединений (бориды карбиды, нитриды и т.п.). Данный метод отличается от остальных своей простотой, скоростями синтеза и минимальными затратами энергии. [3] Таким образом, цель работы – изучение влияния структуры и свойств СВС-материалов на основе системы Al–Ti–B на механические свойства алюминиевых сплавов.

**Таблица 1. Результаты рентгенофазового анализа СВС-материалов, полученных из различных порошковых смесей Al–Ti–B**

Состав исходной порошковой шихты	Фазовый состав	Содержание фаз, %	Параметры решетки, Å	Размер ОКР, нм	$\Delta d/d \cdot 10^{-3}$
90 % (Ti + 2B) + 10 % Al	TiB2	71	a = 3,0335 c = 3,2313 9	91	0.8
	TiAl	29	a = 4,0564 c = 4,0563	88	0.7
80 % (Ti + 2B) + 20 % Al	TiB2	78	a = 3.0327 c = 3.2319	99	1.1
	TiAl	22	a = 4.0541 c = 4.0543	72	0.9
70 % (Ti + 2B) + 30 % Al	TiB2	85	a = 3.0324 c = 3.2327	130	0.5
	TiAl	15	a = 4.0555 c = 4.0612	78	0.7
60 % (Ti + 2B) + 40 % Al	TiB2	66	a = 3.0338 c = 3.2320	123	0.1
	TiAl	40	a = 4.0536 c = 4.0511	101	0.3
50 % (Ti + 2B) + 50 % Al	TiB2	63	a = 3.0312 c = 3.2309	129	0.2
	TiAl	37	a = 4.0524 c = 4.0572	108	0.2

В качестве исходных компонентов порошковой шихты для получения композитов использовались порошки Ti марки ПТОМ-1, Al марки АСД-0 и В марки Б-99. Порошковая смесь готовилась следующим образом: 1) смешивание порошка титана и бора в стехиометрическом соотношении (69% Ti+31 % B); 2) добавка к полученной смеси порошка порошок алюминия от 10 масс. % до 55 масс. %. Из полученной порошковой смеси изготавливались прессовки диаметром 23 мм и высотой 25 мм, прессование осуществлялось в стальной пресс-форме, усилие прессования составляло ~1,5 т. Синтез образцов производился в СВС-реакторе объем 3 л. Полученные продукты реакции исследовались с использованием растровой электронной микроскопии и рентгенофазового анализа. Введение СВС-материалов в расплав алюминия осуществлялось с использованием механического смесителя. В качестве матричного сплава использовался алюминий 6082.

Установлено, что в структуре полученных СВС-материалов наблюдались зерна диборида титана (TiB2) формой близкой к сферической. Согласно данным элементного анализа, частицы диборида титана разделены интерметаллидной матрицей типа Ti–Al (табл. 1).

Исследования при помощи рентгенофазового анализа показало, что независимо от содержания алюминия в исходной шихте Ti–B–Al, фазовый

состав продуктов реакции практически не изменялся. Кроме того, выявлено, что увеличение содержания алюминия от 10 до 60 масс % в шихте приводит к уменьшению среднего размера зерна  $TiB_2$  в получаемых композициях от 3.7 мкм до 0.7 мкм. По-видимому, такая закономерность обусловлена термодинамической природой реакций. Литературные данные свидетельствуют о том, что при изменении стехиометрии в системе Ti–B можно контролировать фазовый состав конечных продуктов реакции и получать интерметаллидную матрицу из фаз  $Al_3Ti$ ,  $Ti_3Al$  и др. [4]. В случае использования полученных материалов в качестве лигатур, наличие фазы  $AlTi$  является положительным фактором, поскольку литературные данные свидетельствуют о том, что лигатуры  $AlTi$  используются, как отдельный класс лигатур в цветной металлургии [3]. Полученные СВС-материалы из порошковой шихты 50% (Ti+2B) + 50 % Al были использованы в качестве лигатуры для алюминиевого сплава 6082. Методика эксперимента взята из работы [3]. Испытание сплавов на растяжении производилось в литом состоянии. Количество вводимых частиц  $TiB_2$  составляло 0.05 и 1 %. Обнаружено, что при введении частиц диборида титана в сплав алюминия происходит увеличение пластичности по сравнению с исходным сплавом, при этом предел прочности при растяжении для сплавов, содержащих 1 масс. % частиц диборида титана составил ~160МПа, в то время как у исходного сплава предел прочности при растяжении составлял ~100 МПа. Данный факт объясняется следующим. При кристаллизации жидкого металла частицы диборида титана являются центрами зародышеобразования, что приводит к измельчению зерна сплава более чем в 2 раза по сравнению с исходным (без частиц) сплавом [3].

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта президента МК-837.2017.8 договор № 14.У30.17.837-МК.

### Литература

1. *Vorozhtsov S. et al.* The Influence of ScF3 Nanoparticles on the Physical and Mechanical Properties of New Metal Matrix Composites Based on A356 Aluminum Alloy // JOM. 2016. Т. 68. №. 12. P. 3101–3106.
2. *Vorozhtsov S., Zhukov I., Vorozhtsov A. et al.* Synthesis of Micro- and Nanoparticles of Metal Oxides and Their Application for Reinforcement of Al-Based Alloys // Advances in Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 2015. P. 6.
3. *Жуков И.А.* Самораспространяющийся высокотемпературный синтез боридов Al и Ti / М.Х. Зиатдинов, А.Б. Ворожцов, А.С. Жуков, С.А. Ворожцов, В.В. Промахов // Изв. высших учебных заведений. Физика. 2016. Т. 59. №. 8. С. 177–178.
4. *Vicario I. et al.* Effect of Material and Process Atmosphere in the Preparation of Al–Ti–B Grain Refiner by SHS // Metals. 2015. Т. 5. №. 3. С. 1387–1396.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ ПОРИСТОЙ КЕРАМИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗНЫХ КРИТЕРИЕВ РАЗРУШЕНИЯ

**В.А. Микушина**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: mikushina\_93@mail.ru

**Аннотация:** В работе представлены результаты моделирования механического поведения пористой керамики на основе оксида алюминия при использовании разных критериев разрушения. Для описания механического отклика пористых керамических материалов использована математическая модель упруго-хрупко-пластической среды. Численное решение выполнено на основе конечно-разностного метода Уилкинса в двумерной постановке в условиях плоской деформации. В модели крупные поры учитывались явно, а наличие мелкой пористости учитывалось неявно за счет эффективных физико-механических свойств каркаса. Общая пористость образцов составляла 36%. Показано, что в зависимости от выбранного критерия разрушения меняется толщина областей разрушения и вид усредненной диаграммы нагружения. При использовании критерия, основанного на предельных неупругих деформациях, диаграмма наиболее соответствует хрупкому материалу, а при использовании критерия по накопленной поврежденности – вязкому материалу. Максимальная область разрушения отмечается для деформационного критерия, а наиболее узкие области разрушения – для критерия по поврежденности.

**Ключевые слова:** керамика, пористость, численное моделирование, механическое поведение, конечно-разностный метод

## MODELING OF STRAIN AND DAMAGE OF POROUS CERAMICS USING DIFFERENT FRACTURE CRITERIA

**V.A. Mikushina**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: mikushina\_93@mail.ru

**Abstract:** The results of modeling the mechanical behavior of porous alumina ceramics using different fracture criteria are presented. A mathematical model of an elastic-brittle-plastic medium was used to describe the mechanical response of porous ceramic materials. The numerical solution on the basis of the finite-difference Wilkins method in a two-dimensional formulation under the conditions of plane strain was performed. Large pores in the model were taken into account explicitly, and the presence of shallow porosity was taken into account implicitly due to the effective physico-mechanical properties of the framework. The total porosity of the samples was 36%. It is shown that the thickness of the fracture regions and the shape of the averaged loading diagram change depending on the chosen fracture criterion. The averaged loading diagram the most closely corresponds to brittle material when the criterion based on limiting inelastic deformations is used. The maximum fracture zones

are observed for the deformation criterion, while the narrow fracture zones meet the criterion based on damage.

**Keywords:** ceramics, porosity, numerical modeling, mechanical behavior, finite-difference method.

Благодаря сочетанию хорошей биосовместимости и механической прочности пористая керамика используется при создании таких изделий как биоимплантаты, носители катализаторов, фильтры. Известно, что наличие пористости в керамических материалах оказывает влияние на физико-механические свойства материалов. Поэтому важной задачей является изучение влияния различных характеристик порового пространства на упругие и прочностные свойства керамических материалов с пористой структурой. Для решения данной задачи широко используются методы компьютерного моделирования.

Целью работы является численное исследование механического поведения пористой керамики на основе оксида алюминия при использовании разных критериев разрушения. На основе экспериментальных данных, приведенных в статье [1], составлены двухмерные геометрические модели структуры пористых мезообъемов. В этих моделях явным образом учтены крупные поры размером порядка 100 мкм, а поры мелкого масштаба учтены неявно через эффективные механические свойства каркаса. Общая пористость образцов составляла 36%.

Для описания механического отклика пористых керамических материалов использована математическая модель упруго-хрупко-пластической среды [2]. В работе были рассмотрены три критерия разрушения, основанные на предельных значениях накопленных неупругих деформаций, главных растягивающих напряжений и поврежденности без учета вида напряженного состояния [3, 4]. Численное решение выполнено на основе конечно-разностного метода Уилкинса в двумерной постановке в условиях плоской деформации [5].

Результаты расчетов показали, что в зависимости от выбранного критерия разрушения меняется толщина областей разрушения и вид усредненной диаграммы нагружения. В мезообъеме зоны разрушения зарождаются и развиваются в одних и тех же местах концентрации напряжений, обусловленных расположением и формой пор. Максимальная область разрушения отмечается для деформационного критерия, а наиболее узкие области разрушения – для критерия по поврежденности. Вид диаграммы деформирования при использовании критерия разрушения, основанного на предельных неупругих деформаций соответствует хрупкому материалу, а при использовании критерия поврежденности – вязкому материалу.

## Литература

1. Григорьев М.В., Савченко Н.Л., Буякова С.П., Кульков С.Н. Неупругое поведение при сжатии керамики с иерархической поровой структурой // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. Вып. 15. С. 79–86.
2. Макаров П.В., Смолин И.Ю., Стефанов Ю.П., Кузнецов П.В., Трубицын А.А., Трубицына Н.В., Ворошилов С.П., Ворошилов Я.С. Нелинейная механика геоматериалов и геосред. Новосибирск: Академич. изд-во «Гео», 2007. 235 с.
3. Смолин И.Ю., Еремин М.О., Макаров П.В., Буякова С.П., Кульков С.Н., Евтушенко Е.П. Численное моделирование механического поведения модельных хрупких пористых материалов на мезоуровне // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2013. № 5(25). С. 78–90.
4. Микушина В.А., Смолин И.Ю. Численное моделирование механического поведения и определение эффективных механических свойств керамических материалов с иерархической пористой структурой // Высокие технологии в современной науке и технике. Сборник научных трудов VI Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов / под ред. А.Н. Яковлева. Томск: НИ ТПУ, 2017. С. 366–367.
5. Уилкинс М.Л. Расчет упруго-пластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике / под ред. Б. Олдера, С. Фернбаха, М. Ротенберга. М.: Мир, 1967. С. 212–263.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ ГРАНУЛИРОВАННЫХ СЛОЕВ ИЗ СВИНЦОВЫХ ШАРИКОВ

**И.А. Модин, А.В. Кочетков, Н.В. Леонтьев**

Научно-исследовательский институт механики  
Национального исследовательского Нижегородского государственного университета  
им. Н.И. Лобачевского, Россия  
E-mail: mianet@mail.ru

**Аннотация.** Насыпные слои из металлических шариков являются перспективным демпфирующим элементом, защищающим конструкции от импульсных воздействий. Для оценки их демпфирующих свойств необходимы знания деформационных и прочностных характеристик при статическом и динамическом сжатии. В деформировании насыпных пористых сред можно выделить три этапа: переукладка до плотной упаковки без заметной деформации частиц (ликвидация свободной пористости); деформирование до почти полной компоновки (отсутствие пор); деформирование как сплошного материала без пор. Для получения динамических характеристик слоя использовалась методика Кольского в системе разрезного стержня Гопкинсона. Приведены результаты исследований при различных скоростях деформации, определяемых начальной скоростью вылета бойка. В силу малого сопротивления пористого образца деформированию на стадиях переупаковки и начального этапа деформирования шариков, большая часть сформированного при ударе бойка по нагружающему стержню импульса сжатия возвращается в первый мерный стержень. Это приводит к повторному циклическому нагружению образца со всё более убывающей амплитудой нагрузки. Помимо кривых активного нагружения методика позволяет получить кривые разгрузки в процессе одного

эксперимента. Показано что в результате деформирования образцов с ростом нагрузки наблюдается развитое пластическое течение и фрагментация шариков. Статическое сжатие насыпной среды производилось на испытательной машине Zwick. Проведенные испытания в широком диапазоне нагрузок показали большие отличия между статическими и динамическими кривыми деформирования, характерные для высокопористых сред. Полученные результаты могут быть использованы для предсказательного математического моделирования элементов конструкций содержащих насыпные слои.

**Ключевые слова:** насыпной слой, пористая среда, эксперимент, разрезной стержень Гопкинсона, динамическая деформация, статическая деформация, сжатие, нелинейность, необратимость.

## NUMERICAL MODELING OF ELASTIC PLASTIC COMPRESSION OF GRANULATED LAYERS FROM PLUMBUM BALLS

**Iv. Modin, A. Kochetkov, N. Leontiev**

Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Russian Federation

E-mail: mianet@mail.ru

**Abstract.** Bulk layers of metal balls are a promising damping element that protects structures from impulsive actions. To assess their damping properties, the knowledge of the deformation and strength characteristics for static and dynamic compression is required. Three stages can be distinguished in the deformation of bulk porous media: re-stacking to close packing without appreciable deformation of the particles (elimination of free porosity); deformation to almost complete layout (absence of pores); deformation as a continuous material without pores. To obtain the dynamic characteristics of the layer, we used the Kolsky method with the Hopkinson bar system. The results of investigations at various deformation rates determined by the initial speed of the striker's departure are presented. Due to the small resistance of the porous sample to the deformation at the stages of repackaging and the initial stage of the deformation of the balls, most of the compression pulse formed when the striker projectile the loading bar is returned to the first measuring bar. This leads to a repeated cyclic loading of the sample with an increasingly decreasing load amplitude. In addition to the active loading curves, the technique allows obtaining unloading curves in the course of one experiment. It is demonstrated that a developed plastic flow and fragmentation of the balls are observed as a result of deformation of the samples with increasing load. Static compression of the bulk was carried out on a Zwick test machine. The tests carried out in a wide range of loads showed great differences between the static and dynamic deformation curves characteristic of highly porous media. The obtained results can be used for predictive mathematical modeling of elements of structures containing bulk layers.

**Key words:** bulk layer, porous medium, experiment, Hopkinson bar, dynamic deformation, static deformation, compression, nonlinearity, irreversibility.

Насыпные слои являются перспективным демпфирующим элементом, защищающим конструкции от импульсных воздействий. В работах [1–3] приведены результаты экспериментальных исследований и численного моделирования действия пористых преград. Проведены квазистатические испытания образцов пористых насыпных слоев из свинцовых шариков на сжатие. Кривые носят нелинейный и необратимый характер, при высоких нагрузках происходит не только переукладка частиц, но и сильное пласти-

ческое течение материала. Экспериментальные исследования, позволяющие определить характеристики при одноосном нагружении, не выявляют детальную картину пластического деформирования шариков. В целях определения особенностей деформирования слоя при развитом пластическом течении, проводится математическое моделирование сжатия отдельных симметричных фрагментов слоев в вычислительной системе ANSYS. Моделирование проводилось методом конечных элементов, моделировались две задачи:

1. Первая задача – когда центры шариков образуют куб (свободная упаковка); в этом случае объемное содержание пор  $\alpha_1 = 0.48$ .

2. Вторая задача – с более плотно уложенными шариками, когда центры ближайших шариков образуют правильный тетраэдр (плотная упаковка); в этом случае объемное содержание пор  $\alpha_1 = 0.26$ .

Реальные гранулированные слои, ввиду наличия неидеальной формы, некоторого разброса размеров шариков, наличие границ, способа укладки и т.д. имеют, как правило, другие (промежуточные) значения объемного содержания пор. Проведенные оценки начального содержания пор в экспериментах по одноосному сжатию гранулированного слоя составляли  $\alpha_1 = 0.39–0.40$ . Для численного моделирования плотной упаковки была выбрана ячейка симметрии с радиусом шарика 1 мм, материал – свинец. Сжатие проводилось абсолютно жесткой плоскостью против направления оси Z, до перемещения 0.424 мм, полная высота модели составляла 1,63 мм, для построения конечно-элементной модели использовался узловой конечный элемент (КЭ) второго порядка. Модель симметричной ячейки состояла из двух шаровых секторов состоящих из 2000 КЭ всего 4000 КЭ, каждый сектор представляет из себя 1/12 полного шара (сектор с углом  $60^\circ$  в плоскости XY).

По результатам моделирования получены кривые изменения параметра  $\alpha_1$  в зависимости от величины деформации слоя для тетраэдральной и кубической упаковки. Получены численные усредненные по области кривые зависимости напряжения от деформации по оси нагружения для тетраэдральной, кубической и экспериментальной упаковок. Экспериментальная кривая располагается между численными кривыми, что подтверждает промежуточный характер расположения кривых деформирования для реальных (неидеальных) упаковок шариков в гранулированном слое. Поведение численных кривых существенно зависит от начальной упаковки шариков, т.е. от значения начальной пористости среды, характеризуемой параметром  $\alpha_1$ . Характерный перегиб диаграмм деформирования связан с тем, что практически все поры гранулированной среды заполнены и происходит сжатие материала, из которого изготовлены шарики.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 15-48-02333р\_поволжье\_a, 16-08-00458а, 17-308-50038.

## Литература

1. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. Фугасные эффекты взрывов. СПб.: Полигон. 2002. 272 с.
2. Брагов А.М., Жегалов Д.В., Константинов А.Ю., Кочетков А.В., Модин И.А., Савихин А.О. Экспериментальное исследование деформационных характеристик пакетов плетеных металлических сеток при динамическом и квазистатическом нагружении // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2016. № 3. С. 252–262.
3. Кочетков А.В., Леонтьев Н.В., Модин И.А. Экспериментально-численное исследование деформирования металлических плетеных сеток при квазистатическом нагружении // Проблемы прочности и пластичности. 2017. Т. 79. № 1. С. 104–113.

## РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОРИСТЫХ СРЕД ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ КОМПОЗИТОВ

П.И. Москвитина, Ю.Н. Сидоренко

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail pmoskvitina12@gmail.com

**Аннотация.** Функциональные свойства пористых материалов во многом определяются параметрами их поровой структуры. К числу основных характеристик такой структуры относятся объемное содержание пор, тип поровой структуры (открытая или закрытая), величина ее удельной поверхности, параметры закона распределения пор по их размерам и другие. Необходимость повышения эффективности использования пористых материалов делает актуальной задачу разработки компьютерных методов описания поровой структуры таких материалов, методик определения ее параметров и численного моделирования поведения пористых материалов в различных условиях эксплуатации.

В работе рассматривается подход к описанию структуры пористой среды, основанный на ее представлении в виде идеализированной имитационной геометрической модели пористого каркаса материала. Эффективность предложенного подхода показана на примере решения в двумерной постановке задачи об оценке проницаемости модельного пористого материала.

**Ключевые слова:** функциональные свойства, пористые материалы, компьютерное моделирование, имитационное моделирование, проницаемость пористых сред, производство композитов.

## DEVELOPMENT OF A TECHNIQUE FOR MODELING POROUS MEDIA WITH REFERENCE TO COMPOSITE TECHNOLOGY

P. Moskvitina and Yu. Sidorenko

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: pmoskvitina12@gmail.com

**Abstract.** The functional properties of porous materials are largely determined by the parameters of their pore structure. The main characteristics of this structure are the volume con-

tent of pores, type of pore structure (open or closed), the value of its specific surface area, parameters of the distribution of pore sizes, and other. The need to improve the efficiency of the use of porous materials makes it urgent to develop computer methods for describing the pore structure of such materials, methods for determining its parameters and numerical simulation of the behavior of porous materials under various operating conditions.

The paper considers an approach to describing the structure of a porous medium, based on its representation in the form of an idealized imitational geometric model of the porous material skeleton. The effectiveness of the proposed approach is shown by the example of a solution in the two-dimensional formulation of the problem of estimating the permeability of a model porous material.

**Keywords:** Functional properties, porous materials, computer modeling, simulation modeling, permeability of porous media, production of composites.

Исследования технологических свойств и характеристик пористых материалов являются востребованными в связи с тем, что проблемы, связанные с их использованием, встречаются во многих технических приложениях. Примерами таких проблем могут служить приживление пористых имплантатов, уплотнение композитов, изготовление фильтров и катализаторов в химической промышленности, нефтедобыча и другие.

Пористые материалы можно рассматривать как частный случай структурно-неоднородных материалов [1]. По геометрическим признакам пористые тела подразделяются на стохастические и на регулярные пористые структуры. В стохастических структурах размеры, форма, ориентация, взаимосвязи и взаимное расположение пор представлены случайным образом. Регулярные пористые структуры образуются правильным чередованием отдельных пор или полостей и соединяющих их каналов в объеме тела, связанных между собой скоплением пор. В основном, пористые материалы имеют стохастическую структуру.

Представление о материале, как о стохастической пористой среде, может быть полезно при моделировании некоторых технологических процессов, в частности, как было отмечено ранее, процессов создания многих композитных материалов.

Для изготовления композиционных материалов с пористой структурой (пористых каркасов) часто используют один наиболее освоенный промышленный способ – пропитку. Пропитка имеет ряд преимуществ перед твердофазными способами изготовления. Например, высокую производительность процесса, практическое отсутствие силового воздействия на компоненты, а также возможность создания непрерывного процесса пропитки [2]. Процесс течения жидкости при пропитке волокнистых наполнителей трудно поддается математическому анализу. Пока что не существует универсальной модели, которая смогла бы адекватно описывать процесс пропитки.

Эффективность пропитки как технологического процесса во многом определяется параметрами поровой структуры пропитываемого материала, одной из важнейших характеристик которой является ее проницаемость

[3]. Проницаемость определяет интенсивность переноса сквозь пористую среду заполняющего ее вещества. В качестве параметра проницаемость входит во многие законы течения вязких жидкостей в пористых средах.

В связи с этим, оценка проницаемости пористых сред представляет собой важную практическую задачу. Для решения такой задачи актуальным является развитие методов описания и компьютерного моделирования, как самой структуры пор подобных материалов, так и методик определения их физико-механических характеристик, в частности, проницаемости.

В работе рассматривается подход к построению вычислительной модели технологического процесса пропитки пористого каркаса при создании композита. При создании модели каркаса как проницаемой пористой среды предлагается использовать геометрическую модель некоторого ее объема, в которой реальная пористая структура заменяется ее идеализированным представлением. При построении модели полагается, что в пористом каркасе имеется две системы пор. Первая представлена крупными пустотами – собственно, порами между элементами каркаса. Вторая система более мелких пор предназначена для имитации наличия межпоровых каналов, по которым движется матричный материал при пропитке композита.

Для оценки эффективности предложенного подхода выполнена сравнительная оценка проницаемости пористых каркасов с разным типом пористости: регулярной и стохастической. Полученные результаты могут быть использованы для анализа условий формирования композитов при разных типах армирования.

В связи с этим, можно полагать, что параметры технологического процесса формирования композитов с регулярной и нерегулярной структурой армирования должны быть различными.

### Литература

1. Белов С.В. Пористые проницаемые материалы: справ. изд. / С.В. Белов, П.А. Витязь, В.К. Шелег [и др.] // под ред. С.В. Белова. М.: Металлургия. 1987. 335 с.
2. Кордикова Е.И. Моделирование процесса пропитки тканых материалов линейно-вязкой жидкостью / Е.И. Кордикова, А.В. Спиглазов // Труды БГТУ, Сер. IV «Химическая технология органических веществ», вып. XVI. М., 2008. С. 133–135.
3. Косторнов А.Г. Пористые проницаемые материалы: научные основы формирования структуры и свойств, опыт изготовления и эффективного применения // Порошковая металлургия, 1995. №11/12. 24 с.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРОШКОВ БОРИДОВ МЕТАЛЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА

П.Ю. Никитин, Я.А. Дубкова, В.В. Платов, И.А. Жуков

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: [upavelru@yandex.ru](mailto:upavelru@yandex.ru)

**Аннотация.** В работе проведено исследование боридов металлов, полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). В качестве исходных порошков использовались порошки алюминия (100 мкм), титана (40 мкм) и аморфного бора (0.8 мкм), которые смешивались в стехиометрических соотношениях. Общий процесс получения конечного продукта включал в себя СВС-синтез исходных материалов; дробление, сфероидизацию и классификацию полученных материалов.

Результаты показали, что продукты, полученные методом СВС, содержат большое количество боридных фаз: 98.43% для  $TiB_2$ , 93.18% для  $AlB_2$  и 88.04% для  $AlB_{12}$ . Установлено, что синтезированные бориды металлов, согласно данным термического анализа, перспективны в качестве топлива в высокоэнергетических материалах: степень окисления  $AlB_2$  составляет ~ 80%, при степени окисления бора ~ 20%, алюминия ~ 67 %

**Ключевые слова:** бориды, порошки металлов, СВС, сфероидизация, высокотемпературная плазма.

## INVESTIGATION OF METAL BORIDES POWDERS OBTAINED BY THE SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS

P. Nikitin, Y. Dubkova, V. Platov, I. Zhukov

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: [upavelru@yandex.ru](mailto:upavelru@yandex.ru)

**Abstract.** In this work, a study was conducted of the borides obtained by SHS-method and low-temperature plasma. Powders of aluminum (100 mm), titanium (40 mm) and amorphous boron (0.8 mm) were used as starting powders and mixed in stoichiometric proportions. The overall process for obtaining the final product consisted of the SHS-process of the raw materials, milling, spheroidization and classification of the obtained materials.

The results showed that the products obtained by SHS-method contain a large amount of the desired borides: 98.43% for  $TiB_2$ , 93.18% for  $AlB_2$  and 88.04% for  $AlB_{12}$ . It was found that the synthesized metal borides, according to the thermal analysis data, are promising as a fuel in high-energy materials: the oxidation state of  $AlB_2$  is ~ 80%, at a degree of boron oxidation ~ 20%, aluminum ~ 67 %.

**Keywords:** borides, metal powders, SHS, spheroidization, high-temperature plasma.

Потенциал использования металлических порошков (Al, Mg и др.) на сегодняшний день практически исчерпан. Требуются новые добавки с высокими энергетическими характеристиками, одной из которых является бор. Его теплота сгорания почти в два раза выше, чем у алюминия [1]. Наиболее перспективными материалами являются бориды алюминия, маг-

ния, титана и циркония: их использование может найти широкое применение в высокоэнергетических топливах. Теплоты сгорания этих боридов значительно выше, чем теплоты сгорания соответствующих им металлов. Стоит также отметить, что при взаимодействии Ti и Al с бором выделяется большое количество энергии, обеспечивающее основу для процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Это позволяет избежать использования сложного печного оборудования и снизить потребление энергии получения боридов. Таким образом, в данной работе проведено исследование порошков  $TiB_2$ ,  $AlB_2$ ,  $AlB_{12}$ , полученных методом СВС. Общий процесс получения конечного продукта включает в себя СВС-синтез исходных компонентов; сфероидизацию и классификацию полученных материалов. Для синтеза боридов порошки алюминия (100 мкм), титана (40 мкм) и аморфного бора (0.8 мкм) смешивались в стехиометрических соотношениях со следующими реакциями:

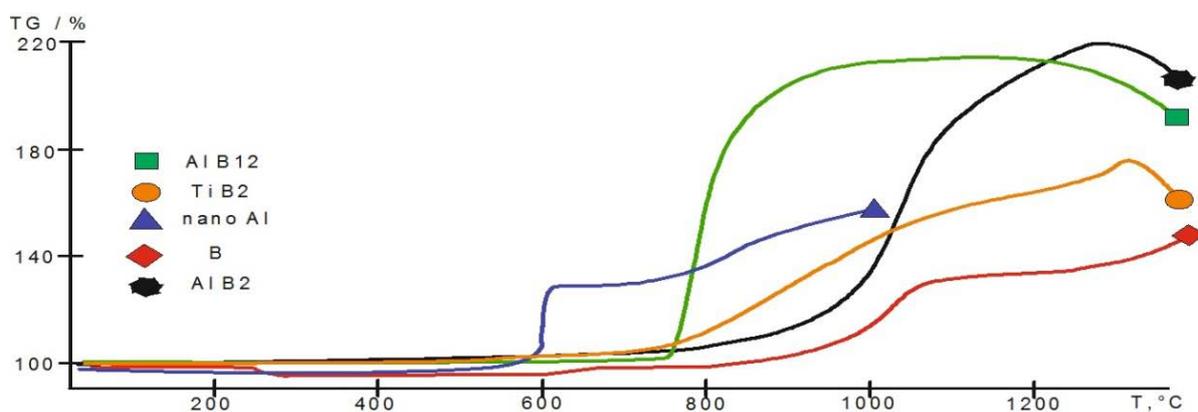
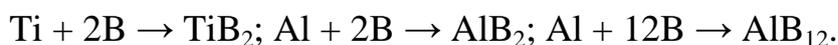


Рис. 1. Степени окисления исследуемых материалов

Таблица 1. Результаты термического анализа

Параметры	B	Al наноразмерный	TiB <sub>2</sub>	AlB <sub>2</sub>	AlB <sub>12</sub>
Степень окисления, α, %	67	67	68	80	58

Синтез боридов проводился в лабораторном СВС-реакторе. Сфероидизация проводилась в высокочастотном плазмотроне с учетом исследований, направленных на выявление параметров для получения частиц порошка соответствующих размеров и морфологии [2]–[3]. Морфология порошков была исследована, используя сканирующий электронный микроскоп Philips SEM 515. Рентгенофазовые исследования проводились с ис-

пользованием дифрактометра Schimadzu XRD6000. Дифференциальный термический анализ проводили на устройстве Netzch STA 409 PC / PG. Сравнение результатов термического анализа исходных порошков и исследуемых боридов представлено на рис. 1 и в табл. 1. Из уравнения реакции окисления  $AlB_2$  следует, что масса продукта реакции больше в  $\sim 2.26$  раза:  $2AlB_2 + 4,5O_2 = Al_2O_3 + 2B_2O_3$ . При этом, степень окисления составляет  $\sim 80\%$ .

Окисление алюминия происходит в несколько этапов [4]. На первом этапе (до  $500\text{ }^\circ\text{C}$ ) скорость окисления алюминия ограничивается воздействием тонкого слоя аморфного оксида (2–4 нм). На следующей стадии (при  $600\text{ }^\circ\text{C}$ ) скорость окисления резко увеличивается из-за нарушения непрерывности оксидного слоя. Затем скорость вновь уменьшается и в дальнейшем колеблется в зависимости от полиморфных превращений. При температуре  $\sim 1000\text{ }^\circ\text{C}$  степень окисления алюминия составляет менее  $70\%$ . Окисление бора происходит аналогичным образом, но даже при относительно низких температурах бор окисляется не полностью. При  $1400\text{ }^\circ\text{C}$  степень окисления бора достигает всего  $20\%$  [5]. Поскольку оксид бора и оксид алюминия контактируют между собой, образуются бораты, которые удаляют жидкость  $B_2O_3$  с поверхности частиц, значительно повышая скорость окисления боридов.

### **Заключение**

Было обнаружено, что бориды, полученные СВС, являются перспективными в качестве добавок для высокоэнергетических топлив: степень окисления  $AlB_2$  составляет  $\sim 80\%$  при степени окисления исходных порошков бора  $\sim 20\%$ , алюминия  $\sim 67\%$ .

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента МК-837.2017.8.

### **Литература**

1. Vorozhtsov A.B. et al. Sci. Tech. Energetic Materials, 2015. 76. P. 105–109
2. Zhukov I., Bondarchuk S., Borisov B.V. MATEC Web of Conferences, 722016, 1016 (2016).
3. Bondarchuk I.S., Zhukov I.A., Borisov B.V. MATEC Web of Conferences, 23, 01046 (2015).
4. Trunov M.A., Schoenitz M., Dreizin E.L. Combustion Theory and Modelling, 10, 603–623 (2006).
5. Yeh C.L., Kuo K.K. Progress in Energy and Combustion Science, T. 22. P. 511–541(1996).

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМИТОВ НА ОСНОВЕ ИОДАТА КАЛЬЦИЯ

М.П. Орлова, Т.И. Горбенко

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: maria-orlova-93@mail.ru

**Аннотация.** В работе исследуются термитные реакции на основе иодата кальция с добавками алюминия и бора. При горении иодат кальция взаимодействует с чистым металлом, при этом образуется оксид металла, оксид кальция и выделяется йод. Установлено влияние содержания металлического горючего на термодинамические свойства термита. Система с алюминием показывает при высоких адиабатических температурах горения наличие в продуктах сгорания конденсированной фазы, при идентичных условиях система с бором образует только газовую фазу. Анализ продуктов сгорания в рамках соотношения газовой и конденсированной фазы позволяет предположить, что частичная замена алюминия на бор может привести к уменьшению конденсированного оксида алюминия.

**Ключевые слова:** термит на основе иодата кальция, термодинамический анализ.

## STUDY OF THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THERMITES BASED ON CALCIUM IODATE

M.P. Orlova and T.I. Gorbenko

National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: [maria-orlova-93@mail.ru](mailto:maria-orlova-93@mail.ru)

**Abstract.** Thermite reactions based on calcium iodate with additives of aluminum and boron are studied in the work. During combustion, calcium iodate reacts with a pure metal, with the formation of a metal oxide, calcium oxide and iodine. The influence of the content of metallic fuel on the thermodynamic properties of the thermite is established. The system with aluminum shows, at high adiabatic combustion temperatures, the presence of a condensed phase in combustion products, under identical conditions the system with boron forms only the gas phase. Analysis of combustion products within the framework of the ratio of the gas and condensed phases suggests that partial replacement of aluminum by boron can lead to a reduction of the condensed aluminum oxide.

**Keywords:** thermite based on calcium iodate, thermodynamic analysis.

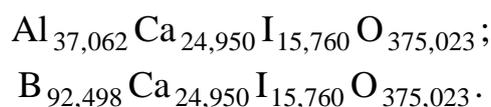
В ряде технологических процессов целесообразно создание топливных элементов для установок, работающих вдали от источников сырья и в условиях сложного транспортного обеспечения. В качестве таких топливных элементов все чаще применяют тепловые составы [1, 2, 3]. Тепловые составы в процессе их сгорания выделяют значительное количество тепла с высокими температурами при прохождении термитных реакций. В качестве термитных систем используются и системы на основе иодата кальция ( $\text{Ca}(\text{IO}_3)_2$ ).

В работе [4] результаты экспериментального исследования показали, что температуры зажигания термитов на основе иодата кальция с алюминием (Al) и бором (B) принимают значения равные 1150, 600 ÷ 700 К, соответственно. Скорость горения у системы иодата кальция с бором в два раза выше, чем у системы иодата кальция с алюминием. На основе экспериментальных исследований сделан вывод, что композиты B – Ca(IO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> лучше подходят в качестве компонентов энергетических составов.

Целью данной работы является исследование влияние содержания металлического горючего (Al, B) на термодинамические свойства термита на основе иодата кальция.

Термодинамический расчет проводился по программе ASTRA (Трусов Б.Г., МГТУ им. Н.Э. Баумана). Исходные данные для термодинамического расчета:

- 1) Исследуемые системы: Al – Ca(IO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> и B – Ca(IO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>
- 2) Компонентный состав: содержание Al и B в системах принималось равным 20, 25, 30 масс.%; соответственно 80, 75, 70 масс. % – Ca(IO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.
- 3) Давление: 0,1 МПа.
- 4) Расчет проведен при двух температурах: 2430 К; 3712 К
- 5) Рассчитаны эквивалентные формулы исследуемых систем:



В настоящей работе, в отличие от работы [4], термодинамическое исследование термитных систем проведено при широком варьировании содержания как металлического горючего (Al и B), так и окислителя иодата кальция.

При заданных адиабатических температурах горения определены следующие термодинамические параметры: энтальпия – мера теплоты химической реакции, средняя молярная масса газовой фазы, массовая доля всех конденсированных фаз, содержание компонентов в продуктах сгорания и другие параметры.

#### **Выводы.**

Литературный обзор показал достаточно широкий интерес российских и зарубежных исследователей к термитным реакциям.

На основании проведенных термодинамических расчетов получено, что при адиабатической температуре 2430 К повышение содержания алюминия в системе на основе иодата кальция приводит к увеличению энтальпии (тепловыделению), средней молярной массы газовой фазы при одновременном росте содержания конденсированного оксида алюминия в продуктах сгорания. Получено, что при горении системы на основе иодата кальция с добавкой бора образуется только газовая фаза. Было установлено,

что при адиабатической температуре равной 2430 К увеличение содержания бора приводит к снижению энтальпии (снижению тепловыделения) и молярной массы газовой фазы. Повышение адиабатической температуры до 3712 К приводит к значительному снижению тепловыделения (в 3–4 раза) как для системы Al-Ca(IO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, так и для системы В-Ca(IO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.

Анализ термодинамических расчетов систем на основе иодата кальция дает возможность предположить, что частичная замена алюминия на бор может привести к уменьшению конденсированного оксида алюминия, при сохранении или даже повышении энерговыделения системы иодат кальция – смешанное металлическое горючее алюминий-бор.

### Литература

1. Горшков В.А. и др. Химический и фазовый составы продуктов горения смесей термитного типа на основе оксидов хрома, лантана и кальция / В.А. Горшков, А.А. Самборук, В.И. Юхвид // Хим. физика. 2009. № 28 (10). С. 48–51.

2. Абдуллин И.А., Белобородова О.И. Тепловые пиротехнические составы. Свойства, технология, применение: учеб. пособие. Казань: Казан. гос. технолог. ун-т., 2004. 120 с.

3. Gorbenko T.I. Study of the energy characteristics of metallized mixed compositions based on a double oxidizer at increased pressures / T.I. Gorbenko, M.V. Gorbenko, E.O. Dyundin, and N.N. Zolotorev // Russian Physics Journal, Vol. 57, No. 5, September, 2014, p. 359–364.

4. Wang S., Liu X., Schoenitz M., Dreizin E.L. Nanocomposite Thermites with Calcium Iodate Oxidizer, J. Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2017, 1–9.

## ХОЛОДНОЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ НАПЫЛЕНИЕ СМЕСЕЙ ТИТАНА И КЕРАМИКИ И МИКРОСТРУКТУРА ФОРМИРУЕМЫХ ПОКРЫТИЙ\*

**Н.С. Ряшин<sup>1, а</sup>, В.С. Шикалов<sup>1</sup>, И.С. Батраев<sup>2</sup>, Н.В. Миронов<sup>1</sup>,  
В.Ф. Косарев<sup>1</sup>, В.М. Фомин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича

<sup>2</sup>Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Россия

E-mail: [ryashin@itam.nsc.ru](mailto:ryashin@itam.nsc.ru)

## COLD SPRAYING TITANIUM + CERAMICS BLENDS AND MICRO- STRUCTURE OF FORMED COATINGS

**N.S. Ryashin<sup>1</sup>, V.S. Shikalov<sup>1</sup>, I.S. Batraev<sup>2</sup>,  
N.V. Mironov<sup>1</sup>, V.F. Kosarev<sup>1</sup>, V.M. Fomin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Russia

<sup>2</sup>Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Russia

E-mail: [ryashin@itam.nsc.ru](mailto:ryashin@itam.nsc.ru)

**Abstract.** The paper presents experimental results of cold spraying composite coatings from powder blends of titanium and ceramics. The volume content of the ceramic component ( $B_4C$ ,  $SiC$ ,  $Al_2O_3$ ) in mechanical blends was 0.8. Experimental dependences of the relative deposition efficiency, porosity and microhardness on the ceramic component material in the sprayed powder blends are obtained. These results can be used to control the composition and properties of functional cold sprayed coatings in scientific and practical problems.

**Keywords:** cold spray, composite coating, powder blend, microstructure

**Введение.** В настоящее время большой интерес исследователей [1–8] представляет формирование композиционных материалов и покрытий методом холодного газодинамического напыления (ХГН) [9, 10]. Высокотвердые включения в покрытиях ХГН способны повысить их стойкость к абразивному износу, твердость и другие свойства. Холодное газодинамическое напыление позволяет гибко варьировать состав формируемого композита и создавать материал с требуемыми свойствами под каждую задачу. Следует отметить, что особенностью метода ХГН является минимальное термическое воздействие на порошок и подложку и, следовательно, нанесение покрытий с сохранением исходного фазового состава материала [11].

В настоящей работе исследованы зависимость относительного коэффициента напыления смесей титана и керамики от материала керамической компоненты и микроструктура формируемых покрытий.

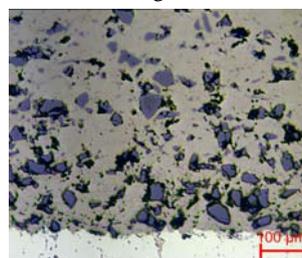
**Материалы и экспериментальное оборудование.** Для получения методом холодного газодинамического напыления композиционных металлокерамических покрытий были подготовлены смеси порошков Ti и керамики ( $B_4C$ ,  $SiC$ ,  $Al_2O_3$ ) с объемным содержанием абразива  $c_V = 0,8$ . Смешивание порошков производилось с помощью V-образного смесителя Venus FTLMV-02 (FILTRA VIBRACION, Испания) в течение 30 мин. В качестве материала подложек использовался дюралюминий.



*a*



*б*



*в*

Рис. Фотография стенда ХГН ИТПМ СО РАН в пыле-шумозащитной камере (*a*), микрофотографии поперечных сечений покрытий ХГН из титана (*б*) и смеси титана и карбида бора (*в*)

Формирование покрытий из полученных порошковых смесей осуществлялось с помощью сопла Лавалья с критическим и выходным сечениями диаметром 3 и 6 мм соответственно. Дистанция напыления равнялась 30 мм, скорость сканирования – 25 мм/с. Рабочим и несущим газом был выбран воздух. Напыление проводилось с помощью экспериментального стенда ХГН ИТПМ СО РАН (см. рис. а), оснащенного 6-осевым промышленным роботом KR 16-2 (KUKA Robotics, Германия) в качестве системы позиционирования. Относительный коэффициент напыления определялся как отношение толщины покрытия, полученного за одно полное сканирование подложки, к толщине наиболее толстого покрытия.

Исследование микроструктуры выполнялось с помощью цифрового оптического микроскопа Axio Scope.A1 (Carl Zeiss, Германия). Оценка содержания керамических включений в покрытиях ХГН проводилась определением соотношения площадей в поперечном сечении, занятых частицами керамики и титана. Микротвердость полученных композиционных покрытий измерялась на поперечных шлифах покрытий с помощью автоматического микротвердомера DuraScan 50 (Emco-Test, Австрия) по методу Виккерса с нагрузкой 0.49 Н. Микротвердость измерялась в 10 эквидистантных точках вдоль прямой. По полученным данным рассчитывались средние значения микротвердости  $HV_{0.05}$ .

**Результаты экспериментов.** Были выбраны следующие параметры напыления: давление торможения  $p_0 = 3.6$  МПа, температура торможения  $T_0 = 670$  К; скорость сканирования (скорость перемещения сопла)  $u_n = 25$  мм/с, шаг сканирования (шаг перемещения оси сопла)  $s_n = 3$  мм.

Для выбранных параметров получена экспериментальная зависимость относительного удельного (за одно полное сканирование рабочей стороны поверхности подложки) коэффициента напыления от материала керамической компоненты в порошковой смеси. Наибольший коэффициент напыления получен для чистого титана, смесь титана с карбидом бора напылялась примерно в два раза менее эффективно, смеси с оксидом алюминия и карбидом кремния – в 7 и 14 раз соответственно. Примеры микрофотографий поперечных шлифов полученных композиционных покрытий ХГН представлены на рисунке (б, в). Микротвердость материала использованной подложки из алюминиевого сплава составила  $HV_{0.05} = 145 \pm 7$ . Показано, что микротвердость композиционных покрытий ХГН зависит от состава напыляемой смеси и составляет  $94 \pm 18$ ,  $129 \pm 41$ ,  $178 \pm 61$ , и  $240 \pm 72$  для порошка Ti и смесей Ti+B<sub>4</sub>C, Ti+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Ti+SiC соответственно.

**Заключение.** Результаты настоящей работы демонстрируют возможность формирования методом ХГН композиционных покрытий из порошковых смесей титана и керамики (B<sub>4</sub>C, SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Получены экспериментальные зависимости относительного коэффициента напыления, пористости и микротвердости от материала керамической компоненты в напыляемых порошковых смесях. Представленные результаты могут быть исполь-

зованы для управления ростом и свойствами функциональных покрытий ХГН в научных и практических задачах.

### Литература

1. A. Shkodkin, A. Kashirin, O. Klyuev and T. Buzdygar, J. Therm. Spray Technol., 2006, 15 (3), pp. 382–386.
2. A. Sova, A. Papyrin, I. Smurov, J. Thermal Spray Technol., 2009, 18(4), pp. 633–641.
3. K. Spencer, D.M. Fabijanic, M.-X. Zhang, Surf and Coatings Techn. 204, 2009, pp. 336–344.
4. X.K. Suo et al., J. Therm. Spray Technol., V.23(1-2), pp. 91–97.
5. H. Bu, M. Yandouzi, Ch. Lu, D. MacDonald, B. Jodoin, Surf and Coat Techn, 207, 2012, pp. 155–162.
6. S.V. Klinkov, and V.F. Kosarev, J. Therm. Spray Technol., 2012, 20(4), pp. 837–844.
7. S.V. Klinkov et al., J. Therm. Spray Technol., 2009, 18(5-6), pp. 944–956
8. M. Yandouzi et al., Surf and Coatings Techn. 205 (2010), pp. 2234–2246.
9. A.P. Alkhimov, V.F. Kosarev, A.N. Papyrin, Dokl. Akad. Nauk. SSSR 315(5). 1990. pp. 1062–1065.
10. A.N. Papyrin, et al., Therm. Spray 2001: New Surf. For a New Millennium, pp. 423–431, 2001.
11. O.I. Lomovsky et al., Vols. 534-536, pp. 1373–1376, 2007. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.534-536.1373

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПОРИСТОГО КОМПОЗИТЕ $ZrO_2(MgO) - MgO$ ПРИ ТРЕХТОЧЕЧНОМ ИЗГИБЕ

Д.А. Ткачев, А.С. Буяков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия  
E-mail: d.tkachev11@gmail.com

**Аннотация.** Получены экспериментальные данные прочностных характеристик образцов пористого композита  $ZrO_2(MgO) - MgO$ . Рассмотрена зависимость полученных значений от концентрации в композите  $MgO$  и времени выдержки. Образцы получены путем прессования в пресс-форме составов керамик  $ZrO_2(MgO) - MgO$  различной концентрации с добавлением СВМПЭ в количестве 50 об. % для достижения поровой структуры. Для удаления СВМПЭ образцы отжигались при температуре  $300^\circ C$ . Затем спекались на воздухе при температуре  $1600^\circ C$  с изотермической выдержкой в течении 10 мин, 3 часов, 10 часов. Результаты механических испытаний при изменении концентрации  $MgO$  и времени выдержки варьируются в пределах 6–24 МПа – предел прочности, модуль упругости в пределах 5–36 ГПа.

**Ключевые слова:** оксидная керамика, диоксид циркония, оксид магния, остеозамещение, механические свойства, прочность при изгибе.

# INVESTIGATION OF FLEXURAL STRENGTH OF POROUS $ZrO_2(MgO)$ – $MgO$ COMPOSITE AT THREE POINT BENDING

**D. Tkachev and A. Buyakov**

National Research Tomsk Polytechnic University, Russian Federation  
E-mail: d.tkachev11@gmail.com

**Abstract.** The following research represents experimental data on strength characteristics of porous  $ZrO_2(MgO)$  –  $MgO$  composite. The dependence of obtained values on the concentration of  $MgO$  and sintering time was studied. Samples were produced by pressing ceramic compositions  $ZrO_2(MgO)$  –  $MgO$  with various concentrations in the press-form. The additional UHMWPE was added in an amount of 50 vol. % to achieve pore structure. To remove UHMWPE samples were annealed at a temperature of 300°C. The next step was sintering at 1600° C for 10 minutes, 3 hours, 10 hours for different groups of samples. The results of mechanical tests for various concentrations of  $MgO$  and the sintering time are in the range of 6-24 MPa for bending strength, the Young's modulus is in the range of 5-36 GPa.

**Keywords:** oxide ceramic, zirconium dioxide, magnesium oxide, bone replacement, mechanical properties, flexural strength.

Особый интерес среди керамических материалов представляет композит на основе диоксида циркония ( $ZrO_2$ ) и оксида магния ( $MgO$ ). Данный материал обладает высокой коррозионной стойкостью и биологической совместимостью, что позволяет использовать его в качестве остеозамещающего [1]. Помимо химической биосовместимости важную роль играют прочностные характеристики материала, которые должны соответствовать характеристикам костной ткани. Поэтому определение прочностных свойств керамик, в частности предела прочности при изгибе является важным этапом в разработке материала для остеозамещения.

Цель работы – изучить влияния оксида магния ( $MgO$ ) на прочностные характеристики пористого композита  $ZrO_2(MgO)$  –  $MgO$  при трехточечном изгибе. Соответственно, были поставлены задачи: изучить методику проведения испытаний материалов при трехточечном изгибе, получить образцы исследуемого материала, имеющие соответствующие методике проведения испытаний размеры, с варьируемой концентрацией  $MgO$ , провести серию испытаний образцов, определить предел прочности при трехточечном изгибе, рассчитать модуль упругости.

Исходными материалами для исследования являлись керамические порошки  $ZrO_2$ , стабилизированный 3 мол %  $MgO$ ,  $MgO$  и сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), добавляемый для достижения поровой структуры образца в количестве 50 об.% каждого состава.  $MgO$  добавлялся в количестве 0, 25, 50, 75, 100 масс. % соответственно для каждого из 5 составов.

Формование образцов проводилось одноосным холодным прессованием с помощью гидравлического пресса в закрытой металлической пресс-форме при давлении 100 МПа без добавления связующего.

Следующим шагом после формования стал отжиг с изотермической выдержкой в течении часа при температуре 300°C с целью удаления СВМПЭ, и последующее спекание на воздухе при температуре 1600°C партий образцов с различным временем выдержки: 10 мин., 3 часа., 10 часов.

Полученные образцы имели форму балок со средней длиной 34 мм., и сечением со средней высотой 3 мм, шириной 5,5 мм.

Механические испытания по определению прочности при трехточечном изгибе проводились на испытательной машине Instron E1000 в соответствии со стандартом проведения испытаний керамических образцов на изгиб [2] и руководством по эксплуатации испытательной машины [3]. Скорость нагружения испытываемых образцов составила 0.3 мм/мин. Величину предела прочности  $\sigma_{изг.}$  и модуля упругости  $E_{изг.}$  керамических балок определена по формулам:

$$\sigma_{изг.} = \frac{3Pl}{2bh^2}, \quad (1)$$

$$E_{изг.} = \frac{Pl^3}{4fbh^3}, \quad (2)$$

где  $P$  – предельная нагрузка определенная при испытании образца, Н;  $l$  – расстояние между осями опор, мм;  $b$  – ширина образца, мм;  $h$  – высота образца, мм;  $f$  – прогиб, мм.

Согласно полученным результатам значение предела прочности исследуемых образцов композита  $ZrO_2(MgO) - MgO$  увеличивается с ростом концентрации MgO до 20%, а при последующем увеличении концентрации MgO, предел прочности керамик уменьшается (рис. 1, а).

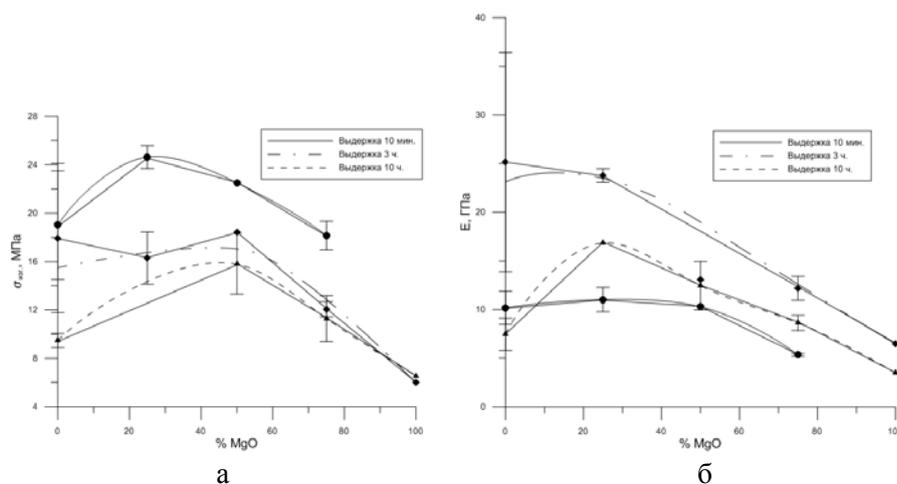
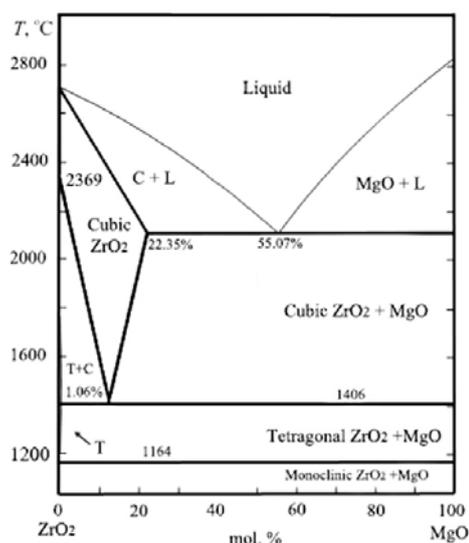


Рис. 1. Зависимость предела прочности (а) и модуля Юнга (б) композита  $ZrO_2(MgO) - MgO$  от концентрации MgO с варьируемым временем выдержки

Рис. 2. Диаграмма состояний системы  $ZrO_2 - MgO$



Подобная зависимость объясняется изменением фазового состава исследуемых образцов с изменением концентрации MgO и времени выдержки. Диаграмма состояний системы  $ZrO_2 - MgO$  представлена на рис. 2.

При концентрациях MgO до 10 % при температуре 1600°C присутствует тетрагональная фаза  $ZrO_2$ , которой свойственны локально протекающие мартенситные превращения  $t \rightarrow m$ , способствующие увеличению объема зоны деформации, и в следствии чего понижению напряжений в острие трещины, называемые эффектом трансформационного упрочнения [4]. При увеличении концентрации MgO, стабилизируется кубическая фаза, которой не свойственен эффект трансформационного упрочнения. Затем MgO полностью растворяется в кубической решетке  $ZrO_2$  и, после достижения концентрации 20%, выделяется в виде отдельной фазы. Присутствие только механической смеси кубической фазы  $ZrO_2$  и MgO приводит к уменьшению прочности материала при изгибе, так как значение прочности при изгибе MgO меньше, чем  $ZrO_2$ , о чем свидетельствуют полученные результаты, отображенные на рисунке 1-а.

Зависимость рассчитанных по формуле 2 значений модуля Юнга от состава изображена на рисунке 1-б. С увеличением концентрации MgO, модуль Юнга композита  $ZrO_2(MgO) - MgO$  увеличивается с увеличением концентрации MgO до 20%, затем при последующем увеличении концентрации MgO значения модуля Юнга уменьшаются.

### Заключение

Получены результаты испытаний по определению предела прочности образцов композита  $ZrO_2(MgO) - MgO$ . Предел прочности исследуемых образцов варьируется в пределах 6–24 МПа, модуль упругости в пределах 5–36 ГПа в зависимости от фазового состава и времени выдержки при спекании.

Определен характер зависимости предела прочности и модуля Юнга от концентрации MgO в составе композита при варьируемом времени вы-

держки. Полученные зависимости объясняются особенностями фаз присутствующих в композите при определенных концентрациях MgO и времени выдержки, а так же свойственным керамике на основе ZrO<sub>2</sub> эффектом трансформационного упрочнения.

Для костной ткани в литературе значения предела прочности приводятся в пределах 7–22 МПа [5], модуля упругости 4–22 ГПа [6]. То есть экспериментально полученные данные для механических характеристик исследуемого композита на основе ZrO<sub>2</sub> соотносимы по своему значению с биологической костной тканью.

### Литература

1. *Buyakov A., et al.* Porous Ceramic Composite ZrO<sub>2</sub>(MgO)–MgO for Osteoimplantology, Abstracts of the International Conference on Physics of Cancer: Interdisciplinary Problems and Clinical Applications, Tomsk, March 22–25, 2016.
2. ASTM C1161-13, Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
3. *Справочник* по программе InstronBluehill, Справочник, версия 1.0. 2012.
4. *Головин Ю.И. и др.* Синтез и характеристика физико-механических свойств стабилизированной циркониевой керамики из природного бадделеита // Вестник Тамбовского университета. Сер.: Естественные и технические науки. 2012. Т. 17. №. 3.
5. *Olson S.A.* Designing a biomechanics investigation: choosing the right model // J Orthop Trauma. 2012 Dec. № 26(12). P. 672–677.
6. *Currey J.D.* Mechanical properties of vertebrate hard tissues // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine. 1998. Т. 212. №. 6. P. 399–411.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МАТРИЦЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.О. Товпинец<sup>1</sup>, В.Н. Лейцин<sup>1</sup>, М.А. Дмитриева<sup>1</sup>, С.В. Пономарев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Балтийский федеральный университет им. И. Канта

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: tovpinets\_a@mail.ru

**Аннотация.** Исследования, посвященные прогнозированию структурно-механических характеристик низкотемпературных композиционных материалов, актуальны для оптимизации исходных составов порошковых смесей получаемых композитов, перспективных для современных аддитивных технологий. В представленной работе методами компьютерного моделирования исследовано влияние термической деструкции связующего, сопровождающегося образованием твердофазных продуктов, на концентрационный и поровый состав исходных порошковых компактов низкотемпературного композиционного материала. Развита методика оценки остаточных термических напряжений в легкоплавкой матрице спеченного композита и эффективных значений изгибной прочности спеченных модельных образцов. Данный подход позволяет добиваться выполнения критериев прочности матрицы спеченного низкотемпературного

композиционного материала путем оптимизации концентрационных составов компонентов исходной смеси.

**Ключевые слова:** низкотемпературные композиционные материалы, прочностные характеристики, механические свойства материалов

## **PREDICTION OF STRUCTURAL-MECHANICAL CHARACTERISTICS AND RESIDUAL STRESSES IN THE MATRIX OF LOW-TEMPERATURE COMPOSITE MATERIALS**

**A.O. Tovpinets<sup>1</sup>, V.N. Leitsin<sup>1</sup>, M.A. Dmitrieva<sup>1</sup>, S.V. Ponomarev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Immanuel Kant Baltic Federal University,

<sup>2</sup>National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: tovpinets\_a@mail.ru

**Abstract.** The development of prediction of structural and mechanical characteristics of low-temperature composite materials are relevant for modern additive technologies. The influence of thermal destruction of a binder is investigated by computer simulation methods. An approach for estimating the residual thermal stresses in the low-melting matrix of the sintered composite and the effective values of the bending strength of sintered model samples is developed.

**Keywords:** low-temperature composite materials, strength characteristics, mechanical properties of materials.

В композиционных материалах, перспективных для аддитивных технологий, консолидация компакта обеспечивается наличием легкоплавкой фазы, образующей матрицу композиционного материала после спекания при температурах, не превышающих температуры плавления, фазового перехода или перекристаллизации ответственных тугоплавких компонентов исходной смеси. Изделия из таких материалов получают послойным наращиванием исходного материала с последующим спеканием. При этом значимым технологическим параметром укладки слоев является неоднородность размеров тугоплавких частиц и плотностей их упаковки в процессе формирования исходных компактов.

Актуальной задачей является развитие подхода прогнозирования механических свойств и структуры спекаемого низкотемпературного композита методами компьютерного моделирования; изучение способов управления исходными составами порошковой смеси и влияние изменений составов смеси на формирование поровой структуры исходных компактов; оценка остаточных термических напряжений в матрице спеченного изделия.

В представленной работе использован подход компьютерного моделирования материалов с учетом иерархии реологических процессов в порошковых телах и модификации иерархически организованных структур. Исследуемая модельная структура исходного компакта отражает неоднород-

ность концентраций и размеров исходных порошковых компонентов и пор в консолидированных слоях и межслойных интерфейсах.

На каждом шаге моделирования используются эффективные характеристики материала, определяемые макроскопической структурой исходного компакта, распределением в нем тугоплавких, легкоплавких компонентов и пор, неоднородностью концентраций, фазового и фракционного состава компонентов. В каждый момент времени эти характеристики уточняются итерационно.

При подготовке и просушке исходного компакта композиционного материала термодеструкция связующего проходит с образованием газофазных продуктов распада и кристаллического остатка. Считается, что кинетика процесса деструкции определяется интенсивностью подвода тепла. Численно решается задача теплопереноса со стоками тепла, характеризующими затраты на термодеструкцию связующего. Задаются значения пороговой температуры и удельной работы термодеструкции.

Рассмотрен модельный слой двухкомпонентной порошковой смеси:  $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$  и боросиликатного стекла, консолидированных связующим – полиорганосилоксаном. При распаде полиорганосилоксана образуется твердый остаток – кристаллическая окись кремния. Считается, что дисперсный остаток термодеструкции связующего представляет третий компонент исходной порошковой смеси. Новообразованный кристаллический компонент смеси вместе с  $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$  в процессе спекания образуют ансамбль тугоплавких частиц в легкоплавкой матрице.

Полученные результаты вычислительных экспериментов показывают, что удаление газовой фазы продуктов термодеструкции связующего приводит к увеличению начальной пористости исходного компакта. Кристаллический остаток термодеструкции является дополнительной тугоплавкой фазой в матрице спекаемых образцов. Это приводит к появлению в матрице спеченной керамики термических остаточных напряжений, вызванных разностью коэффициентов термического расширения дисперсных компонентов и матрицы.

Для оценки остаточных термических напряжений в матрице спекаемого композита, рассмотрены два состава исходной смеси, различающихся массовым содержанием компонентов в исходном компакте:

а)  $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$  – 40 масс.%, боросиликатное стекло – 40 масс.%, полиорганосилоксан (связующее) – 20 масс.%,

б)  $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$  – 30 масс.%, боросиликатное стекло – 50 масс.%, полиорганосилоксан (связующее) – 20 масс.%

Полученный прогноз термических напряжений в матрице моделируемого образца по толщине модельного слоя для рассматриваемых составов показывает, что возможно появление как растягивающих, так и сжимающих значений остаточных напряжений в матрице спеченного композита. Это может приводить к разрушающим или упрочняющим эффектам получае-

мых изделий. Изменение значений и знака остаточных напряжений в спеченном материале возможно оптимизацией концентрационного состава исходного компакта компонентов. Для состава (b) величины растягивающих напряжений в межслойном интерфейсе (выделено тонкой сплошной линией) оказываются 2 раза меньшими по значению, чем для состава (a). Кроме того, в композите, спеченном из состава (b) прогнозируется появление значительных локальных сжимающих термических напряжений в матрице моделируемого слоя.

#### **Заключение.**

Представленный подход численного моделирования позволяет оценить изменение пористости и концентрации тугоплавких компонентов в исходном компакте спекаемого композита.

Учет термодеструкции связующего, являющегося начальным этапом процесса спекания композиционного материала, позволяет получить предварительный прогноз структуры спекаемых образцов, определяющий механические характеристики композита и остаточные термические напряжения в матрице спеченного образца.

Развитый подход компьютерного моделирования позволяет проводить оптимизацию составов исходной смеси и добиваться выполнения критериев прочности матрицы спеченного низкотемпературного композиционного материала.

## **ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЖЕКТОРНЫХ СОПЕЛ ДЛЯ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ**

**В.С. Шикалов, С.В. Клинков, В.Ф. Косарев,  
Н.С. Ряшин, Б.М. Меламед**

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
СО РАН, Россия  
E-mail: v.shikalov@gmail.com

**Аннотация.** В работе получены экспериментальные результаты по измерению скорости сферических микрочастиц в струе, истекающей из эжекторного сопла, используемого в холодном газодинамическом напылении (ХГН). Обнаружено, что существует диапазон давлений, в котором скорость частиц достигает максимума и начинает снижаться. Показано, что частицы алюминия достигают близких значений скорости как с использованием предложенного эжекторного сопла, так и с типичным соплом Лавалья, применяемым в ХГН. Продемонстрировано получение алюминиевых покрытий при напылении с помощью эжекторных сопел. Полученные результаты открывают широкие перспективы применения эжекторных сопел с центральным телом и дозаторов открытого типа в условиях ХГН.

**Ключевые слова:** холодное газодинамическое напыление, эжекторное сопло, скорость частиц, алюминиевое покрытие

# PRELIMINARY EXPERIMENTAL RESULTS OF EJECTOR NOZZLE OPTIMIZATION FOR COLD SPRAY

V.S. Shikalov, S.V. Klinkov, V.F. Kosarev, N.S. Ryashin, B.M. Melamed

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Russian Federation  
E-mail: v.shikalov@gmail.com

**Abstract.** In the paper, experimental results are obtained on measuring the spherical microparticles velocity in a jet flowing out from an ejector nozzle used in cold spray. It is found that there is a range of pressures in which the particles velocity reaches a maximum and begins to decrease. It is shown that aluminum particles reach similar velocities both with the use of the proposed ejector nozzle and with the typical Laval nozzle used in cold spray. It was demonstrated that aluminum coatings were obtained by spraying with ejector nozzles. The obtained results open wide prospects for the use of ejector nozzles with a central body and open-type feeders under cold spray conditions.

**Keywords:** cold spray, ejector nozzle, particles velocity, aluminum coating.

Использование эжекторных сопел в холодном газодинамическом напылении (ХГН) позволяет применять для порошкового питания установки напыления дозатор открытого типа, работающий при атмосферном давлении [1, 2]. Как следствие, существенно упрощается система дозирования и подачи порошка, а также улучшается дозирование низкосыпучих материалов и суспензий. Еще одним преимуществом такой схемы порошкового питания является ввод частиц в ускоряющий поток после критического сечения сопла, что снижает его износ, особенно в случае подачи высокотвердых частиц. Следует отметить, что особенности конструкции эжекторного сопла с центральным телом позволяют гибко варьировать параметры эжектирующего потока, влияющие на скорость частиц, которая является одним из критических параметров в ХГН [3–5]. Целью настоящей работы стало определение режима работы эжекторного сопла, а именно положения центрального тела в нем и давления торможения, обеспечивающих максимальную скорость частиц алюминия в потоке.

Эксперименты по измерению скорости частиц алюминиевого порошка АСД-1 со средним размером частиц 30 мкм проводились на стенде трехимпульсной теневой диагностики [6] с помощью экспериментального осесимметричного эжекторного сопла с центральным телом и осесимметричного сопла Лавалья, широко применяющегося в холодном газодинамическом напылении. Диаметры входного сечения эжекторного сопла и критического сечения сопла Лавалья равнялись 5.5 и 2.8 мм соответственно, диаметры выходных сечений сопел были 7 и 6,5 мм соответственно. Длина эжекторного сопла составляла 150 мм, длина сверхзвуковой части сопла Лавалья равнялась 130 мм. Внешний и внутренний диаметры центрального тела эжектора были 8 и 2 мм соответственно, угол его конуса  $28^\circ$ . В качестве рабочего газа использовался воздух. Измерение скорости частиц проводилось на расстоянии 30 мм ниже по потоку от среза сопла.

Конструкция эжекторного соплового узла с центральным телом позволяет поддерживать постоянным разрежение на срезе центрального тела (выходе конической порошковой трубки) эжектора при варьировании давления торможения за счёт перемещения конуса центрального тела вдоль оси. В каждой точке по давлению измерена скорость не менее ста частиц и рассчитано ее среднее значение, а ошибка среднего не превышает 5 м/с.

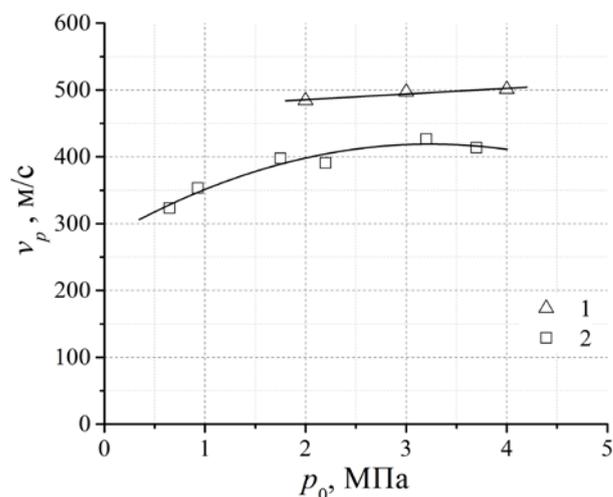


Рис. 1. Сравнение графиков зависимости скорости алюминиевых частиц в потоках из осесимметричного эжекторного сопла и осесимметричного сопла Лавалю от давления торможения: 1 – сопло Лавалю; 2 – эжекторное сопло

Напыление проводилось на экспериментальной установке ХГН (ИТПМ СО РАН, Россия), оснащенной 6-осевым промышленным роботом KR 16-2 (KUKA Robotics, Германия). В качестве подложек использовались пластины из стали 3 размером  $100 \times 15 \times 3$  мм. Одиночные дорожки наносились с помощью эжекторного сопла при разном давлении в форкамере, которое менялось в пределах 0.68–2.4 МПа. Температура воздуха в форкамере была постоянной и равной 520 К. Сопло перемещалось со скоростью 10 мм/с относительно подложки, дистанция напыления была равна 30 мм. График экспериментальной зависимости скорости микрочастиц алюминия от давления торможения для эжекторного сопла и сопла Лавалю представлены на рис. 1.

Получена экспериментальная зависимость скорости сферических микрочастиц в потоке из экспериментального эжекторного сопла с центральным телом. Обнаружен участок данной зависимости, на котором скорость частиц достигает максимума и начинает снижаться, что отличает эжекторные сопла от классических сопел Лавалю. Экспериментально показано, что частицы алюминия достигают близких значений скорости как с использованием предложенного эжекторного сопла, так и с типичным соплом Лавалю, применяемым в холодном газодинамическом напылении. Продемонстрировано получение алюминиевых покрытий методом ХГН при напылении с помощью эжекторных сопел в диапазоне давлений в форкамере

0.68–2.4 МПа. Полученные результаты открывают широкие перспективы применения эжекторных сопел с центральным телом и дозаторов открытого типа в условиях холодного газодинамического напыления.

### Литература

1. *Клинков С.В., Косарев В.Ф., Сова А.А.* Исследование эжекторной схемы формирования гетерогенных сверхзвуковых потоков в условиях холодного газодинамического напыления // Теплофизика и аэромеханика. 2006. Т. 13, № 3. С. 387–397.
2. *Косарев В.Ф., Клинков С.В., Лаврушин В.В., Сова А.А.* Устройство газодинамического напыления порошковых материалов // Патент РФ № 2334827. БИПМ. 2008. № 27.
3. *Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Папырин А.Н.* Метод “холодного” газодинамического напыления // Доклады Академии наук СССР. 1990. Т. 315, № 5. С. 1062–1065.
4. *Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Папырин А.Н.* Газодинамическое напыление. Экспериментальное исследование процесса напыления // Прикладная механика и техническая физика. 1998. Т. 39, № 2. С. 182–188.
5. *Shikalov V.S., Klinkov S.V., and Kosarev V.F.* Cold spraying on materials with low erosion resistance // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1770. P. 040015. Doi: 10.1063/1.4964084
6. *Клинков С.В., Косарев В.Ф., Ряшин Н.С.* Сравнение результатов экспериментов и моделирования холодного газодинамического напыления за маской. Ч. 2 // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24, № 2. С. 221–232.

Секция 4  
**БАЛЛИСТИКА И НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА**

---

---

Session 4  
**BALLISTICS AND CELESTIAL MECHANICS**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ  
ОТРАБОТАВШЕГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА  
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СВЕТОВОГО ДАВЛЕНИЯ**

**А.Г. Александрова, В.А. Авдюшев**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: aleksann@sibmail.com

**Аннотация.** Учет влияния силы светового давления (СД) является одной из основных трудностей при высокоточном моделировании орбитального движения действующих и отработавших космических аппаратов (КА). Результаты наших ранних исследований различных моделей СД на примере спутников ГЛОНАСС показали, что применение стандартной модели силы СД, где КА представляется в виде шара, приводит к недопустимо большим ошибкам моделирования орбитального движения. Между тем наилучшая точность достигается с моделью СД, основанной на физическом взаимодействии солнечного излучения с поверхностью спутника, учитывающей форму КА.

Для определения эффективной площади поверхности отработавшего спутника ГЛОНАСС в зависимости от его ориентации рассматривалась точечная модель КА. Спутник представлялся как множество точек, равномерно распределенных по поверхности КА. Затем варьировались долготный и широтный углы в жестко связанной с аппаратом системе координат, и точечное множество проецировалось на картинную плоскость. Наконец, определялся контур спроецированного множества, и вычислялась его площадь. В итоге была получена приближенная зависимость эффективной площади спутника от двух углов ориентации.

**Ключевые слова:** отработавший космический аппарат, световое давление, ГЛОНАСС.

**DETERMINATION OF THE EFFECTIVE SURFACE OF A SPENT  
SPACECRAFT FOR SIMULATING THE LIGHT PRESSURE**

**A. Aleksandrova and V. Avdyushev**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: aleksann@sibmail.com

**Abstract.** Accounting for the influence of the light pressure force (LPF) is one of the main difficulties in the high-accuracy simulation of the orbital motion of operating and spent spacecrafts (SCs). The results of our early studies of various LPF-models for GLONASS sat-

ellites have shown that the application of the standard LPF-model, where the SC is represented as a sphere, leads to unacceptably large errors of orbit simulation. Meanwhile, the best accuracy is achieved with the LPF-model, based on the physical interaction of solar radiation with the satellite surface, and taking into account the shape of the SC.

To determine the effective surface area of a spent GLONASS satellite, depending on its orientation, the point model of the SC was considered. The satellite was represented as a set of points uniformly distributed over the SC's surface. Then, the longitude and latitude angles were varied in a system of coordinates rigidly connected with the SC, and the point set was projected onto the picture plane. Finally, the contour of the projected set was determined, and its area was calculated. As a result, an approximate dependence of the effective area of the satellite on two orientation angles was obtained.

**Keywords:** spent spacecraft, light pressure, GLONASS.

Одной из главных трудностей при прогнозировании движения действующих и отработавших космических аппаратов (КА), а также другого космического мусора является учет влияния светового давления (СД), которое непосредственно зависит от геометрических и физических свойств поверхности объекта.

Наши ранние исследования различных моделей СД на примере действующих КА ГЛОНАСС показали [1–3], что наилучшая точность достигается с моделью [4], основанной на физическом взаимодействии между солнечным излучением и поверхностью спутника, учитывающей форму КА.

В случае действующих КА ГЛОНАСС их ориентация в пространстве довольно легко определяется, поскольку они стабилизированы, и панели их солнечных батарей перпендикулярны направлению на Солнце, а корпус КА направлен на Землю (рис. 1). Следовательно, площадь эффективной поверхности КА легко определяется. Под эффективной поверхностью мы понимаем ту часть поверхности КА, которая непосредственно взаимодействует с солнечным излучением. Между тем сила СД прямо пропорциональна площади эффективной поверхности в проекции на картинную плоскость, перпендикулярную к направлению силы СД, т.е. площади мишени сечения КА.

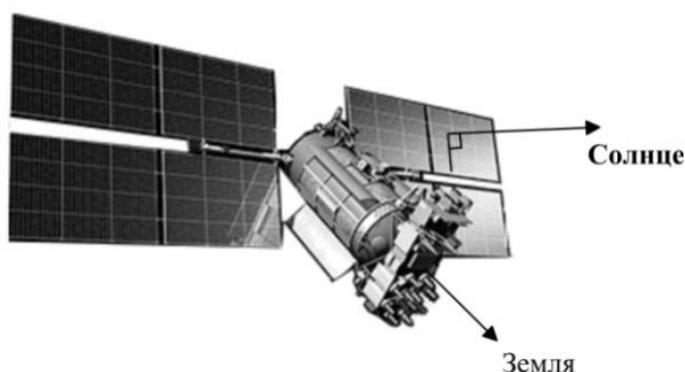


Рис. 1. Спутник ГЛОНАСС-М

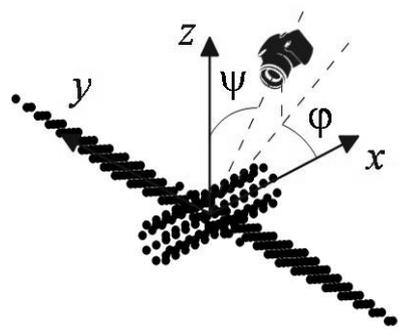


Рис. 2. Виртуальная фотосессия точечной модели спутника ГЛОНАСС

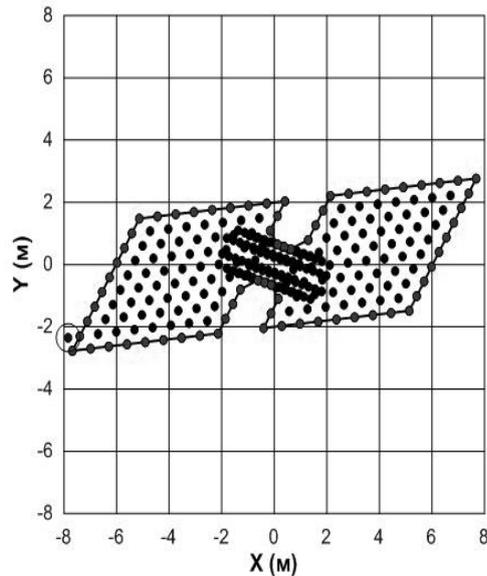


Рис. 3. Точечная модель спутника в картинной плоскости  
( $\varphi = 60^\circ$ ,  $\psi = 80^\circ$ )

Что касается отработавших КА ГЛОНАСС, определение эффективной поверхности или площади миделева сечения усложняется произвольностью пространственной ориентации КА, когда его составляющие: корпус, панели солнечных батарей или другие вспомогательные блоки, могут перекрывать друг друга в картинной плоскости, что не имеет место для действующих спутников. Для разрешения этой трудности мы предлагаем численный метод определения миделева сечения, основанный на виртуальной фотосессии точечной модели КА (рис. 2).

Спутник представляется как множество точек (рис. 2), равномерно распределенных по поверхности КА. Каждой точке назначается коэффициент отражения. Затем выполняется виртуальная фотосессия: варьируется долготный  $\varphi$  и широтный  $\psi$  углы в жестко связанной с КА системе координат (рис. 2) и точечное множество проецируется на картинную плоскость (рис. 3). Далее, по принципу катящегося шарика для каждой пары  $\varphi$  и  $\psi$  определяются граничные точки (рис. 3) спроецированного на картинную плоскость множества. Первая граничная точка – крайняя левая. Каждая следующая определяется при касании шарика (рис. 3: окружность с центром), который обходит множество, вращаясь против часовой стрелки. Диаметр шарика выбирается так, чтобы он не проваливался внутрь множества. Этот принцип легко интерпретируется математически, как и просто реализуется алгоритмически и программно. Наконец, когда известны граничные точки множества  $(X_i, Y_i)$  ( $i = 1, \dots, N$ ) ( $N$  – число граничных точек), площадь миделева сечения  $S$  представляется как площадь многоугольника, образуемого этими точками:

$$S = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (X_i + X_{i+1})(Y_i - Y_{i+1}) \quad (X_{N+1}, Y_{N+1}) = (X_N, Y_N).$$

Таким образом, в работе представлен численный метод для определения площади эффективной поверхности отработавшего спутника ГЛОНАСС в зависимости от его пространственной ориентации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-60097 мол\_а\_дк.

### Литература

1. Александрова А.Г., Бордовицына Т.В., Чувашов И.Н. Численное моделирование в задачах динамики околоземных объектов // Изв. вузов. Физика. 2017. Т. 60. № 1 С. 69–76.
2. Александрова А.Г., Чувашов И.Н. Выбор эффективной модели силы светового давления для спутников ГЛОНАСС // Изв. вузов. Физика. 2017. Т. 60. № 2 С. 117–122
3. Александрова А. Г., Чувашов И. Н., Бордовицына Т. В. Численно-аналитическая методика построения по данным измерений аппроксимации эффективной поверхности ИСЗ // Сборник трудов IX всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики». 2016. С. 328–330.
4. Rodriguez-Solano C.J., Hugentobler U., Steigenberger P. Adjustable box-wing model for solar radiation pressure impacting GPS satellites // Advances in Space Research. 2012. 49. P. 1113–1128.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СОВМЕСТНОГО ВЛИЯНИЯ ВЕКОВЫХ РЕЗОНАНСОВ НИЗКИХ ПОРЯДКОВ И СВЕТОВОГО ДАВЛЕНИЯ НА ДВИЖЕНИЕ ОКОЛОЗЕМНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

**А.Г. Александрова, И.В. Томилова**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: aleksann@sibmail.com

**Аннотация.** В данной работе рассмотрено совместное влияние вековых резонансов и светового давления на долговременную орбитальную эволюцию объектов в области околоземного космического пространства (ОКП), ограниченной большими полуосями от 15000 до 45000 км. Данная область включает в себя зоны МЕО (medium Earth orbits) и GEO (geostationary orbits), которые представляют особый интерес, поскольку большая часть действующих космических аппаратов, а также космического мусора находятся в этих зонах ОКП. Поскольку сила светового давления зависит от парусности объекта  $\gamma$  (отношения площади миделевого сечения к массе), каждый из объектов рассматривался при следующих значениях  $\gamma$ : 0.001; 1; 10 м<sup>2</sup>/кг. Особое внимание в данной работе уделено тем вековым резонансам, влияние которых проявляется, прежде всего, в возрастании эксцентриситета орбиты околоземных космических объектов, поскольку при сильном росте эксцентриситета такие объекты способны достигать в перицентре уровня ат-

мосферы Земли. Моделирование динамической эволюции проводилось на интервале времени 100 лет с помощью «Численной модели движения систем ИСЗ», при этом учитывались следующие возмущающие факторы: несферичность Земли, притяжение Луны и Солнца, а также световое давление.

**Ключевые слова:** космический аппарат, световое давление, вековые резонансы.

## INVESTIGATION OF THE COLLABORATIVE INFLUENCE OF SECULAR RESONANCES OF LOW ORDERS AND LIGHT PRESSURE ON THE MOTION OF NEAR-EARTH SPACE OBJECTS

A. Aleksandrova and I. Tomilova

National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: aleksann@sibmail.com

**Abstract.** In this paper we consider the collaborative influence of secular resonances and light pressure on the long-term orbital evolution of objects in the region of near-Earth space with semi-major axes from 15,000 to 45,000 km. This area of the NES includes the zones of MEO (medium Earth orbits) and GEO (geostationary orbits), which are of particular interest, since most of the spacecraft in operation, as well as space debris, are located in these zones. Each of the objects has been considered at the following values of sail area (area-to-mass ratio): 0.001; 1; 10 m<sup>2</sup>/kg. Special attention is given to those secular resonances, whose influence is evident primarily in the increase of the eccentricity of near-Earth space object orbit.

**Keywords:** Spacecraft, light pressure, secular resonances.

В последнее время возрос интерес к проблеме влияния вековых резонансов на орбитальную эволюцию околоземных объектов [1, 2]. Как показано в [3] вековые резонансы представляют собой явление весьма распространенное в околоземном космическом пространстве и оказывают заметное влияние на долговременную орбитальную эволюцию околоземных объектов [4]. Они способны кардинально менять орбиты объектов, а также вызывать хаотичность в движении объектов при наложении нескольких вековых резонансов различных типов, а также при наложении этих резонансов на орбитальные (тессеральные) резонансы, если среди них есть хотя бы один неустойчивый.

Световое давление также является фактором, который способен кардинально менять орбитальную эволюцию объектов [5, 6], в связи с этим было проведено исследование особенностей совместного влияния вековых резонансов низких порядков и светового давления на движение околоземных космических объектов. Для исследования были выбраны модельные объекты, основные орбитальные параметры которых варьировались в следующем диапазоне: наклонение от 0° до 90° (с шагом 5°), большая полуось от 15000 до 45000 км (с шагом 200 км). Начальный эксцентриситет орбит полагался равным 0.001. Каждый объект рассматривался при следующих значениях  $\gamma$ : 0.001; 1; 10 м<sup>2</sup>/кг. Моделирование движения объектов было вы-

полнено при помощи «Численной модели движения систем ИСЗ» [7], реализованной в среде параллельных вычислений и дополненной «Программой для исследования хаотичности движения объектов». Моделирование проводилось на интервале времени 100 лет, при этом учитывались возмущения от Луны, Солнца и несферичности геопотенциала до 8 порядка и степени. Для выявления вековых резонансов использовалась методика, предложенная в [3] и дополненная анализом связанных с вековыми резонансами критических аргументов [8]. Анализ эволюции критического аргумента позволяет определить, является ли действие данного векового резонанса устойчивым.

Особое внимание в исследовании было уделено тем вековым резонансам, влияние которых проявляется, прежде всего, в возрастании эксцентриситета орбиты околоземных космических объектов:  $\dot{\omega} \approx 0$  (резонанс Лидова–Козаи) и  $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{SM}) + 2\dot{\omega} \approx 0$ , а также  $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_S) + 2\dot{\omega} \pm 2\dot{\omega}'_S \approx 0$ , который фактически равен предыдущему из-за малости  $\dot{\omega}'_S$  ( $\dot{\Omega}$ ,  $\dot{\omega}$ ,  $\dot{\Omega}'_{SM}$ ,  $\dot{\omega}'_S$  – вековые частоты в движении спутника и возмущающих тел).

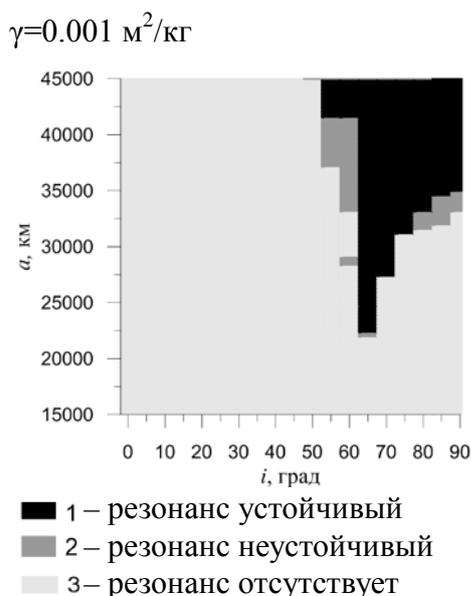


Рис. 1. Распределение различных типов резонанса  $\dot{\omega} \approx 0$  в околоземном орбитальном пространстве

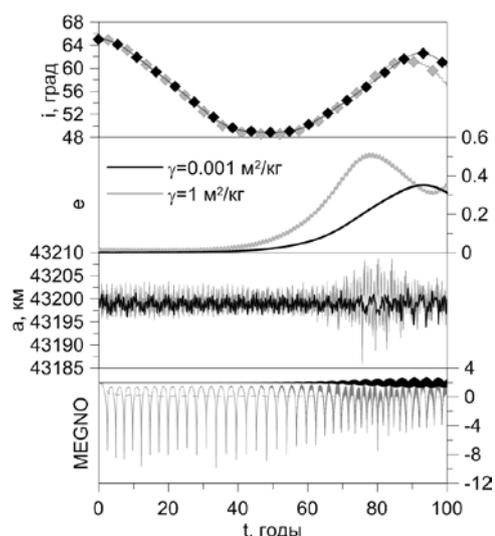


Рис. 2. Орбитальная динамика объекта при наличии устойчивого векового резонанса Лидова–Козаи и  $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{SM}) + 2\dot{\omega} \approx 0$

На рис. 1 показано наличие резонанса Лидова–Козаи в рассматриваемом диапазоне больших полуосей при значении парусности ( $0.001 \text{ м}^2/\text{кг}$ ), оно совпадает с распределением без учета светового давления. В случае  $\gamma = 1$  и  $10 \text{ м}^2/\text{кг}$  происходит перераспределение типа резонанса в части устойчивости, при этом границы остаются практически неизменными. Что касается

резонанса  $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{SM}) + 2\dot{\omega} \approx 0$ , для него также характерно нахождение в области с большой полуосью больше 30000 км и наклоном больше  $50^\circ$ . Орбиты с наибольшим ростом эксцентриситета на рассматриваемом интервале времени также приходится на данную область околоземного пространства. На рис. 2 показан пример орбитальной динамики объекта при наличии устойчивого векового резонанса Лидова–Козаи и  $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{SM}) + 2\dot{\omega} \approx 0$ . Световое давление служит фактором ускоряющим рост эксцентриситета.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-60097 мол\_a\_дк.

### Литература

1. *Chao C., Gick R.* Long term evolution of navigation satellite orbits // *Adv.Space Res.* 2004. Vol. 34. P. 1221–1226.
2. *Rossi A.* Resonant dynamics of Medium Earth Orbits: space debris // *Celest.Mech. Dyn. Astr.* 2008. Vol. 100. P. 267–286.
3. *Бордовицына Т.В., Томилова И.В.* Исследование распространенности вековых резонансов в околоземном орбитальном пространстве // *Изв. вузов. Физика.* 2013. Т. 56. № 10/2. С. 150–158.
4. *Александрова А.Г., Томилова И.В., Бордовицына Т.В.* Анализ влияния вековых резонансов на динамическую эволюцию околоземных объектов, движущихся по почти круговым орбитам в области супер-ГЕО // *Изв. вузов. Физика.* 2014. Т. 57. № 10/2. С. 95–102
5. *Кузнецов Э.Д.* О влиянии светового давления на орбитальную эволюцию геосинхронных спутников // *Астрон. вест.* 2011. Т. 45. № 5. С. 444–457.
6. *Александрова А.Г., Бордовицына Т.В., Чувашов И.Н.* MEGNO-анализ влияния светового давления на орбитальную эволюцию объектов зоны ГЕО // *Изв. вузов. Физика.* 2011. Т. 54. № 6/2. С. 47–54.
7. *Александрова А.Г., Бордовицына Т.В., Чувашов И.Н.* Численное моделирование в задачах динамики околоземных объектов // *Изв. вузов. Физика.* 2017. Т. 60. № 1. С. 69–76.
8. *Александрова А.Г., Томилова И.В.* Прикладной программный комплекс для выявления и исследования резонансов // *Изв. вузов. Физика.* 2016. Т. 59. № 10/2. С. 63–69.

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «EROS» ДЛЯ ПОИСКА УСЛОВИЙ НАБЛЮДЕНИЙ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ АСТЕРОИДОВ

**В.С. Блинова, Т.Ю. Галушина**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: vera.blinova.1996@gmail.com

**Аннотация.** Для дальнейшего уточнения орбит требуются наблюдения, т. е. нужно знать, когда и где астероиды можно наблюдать. С целью упростить и автоматизировать этапы подготовки к позиционным наблюдениям в Томске разрабатывается программный комплекс «EROS» (от англ. «Ephemeris Researches and Observation Services»). С его помощью выполняется вычисление условий видимости конкретных объектов. Было

выбрано 38 потенциально опасных астероидов, которые будут проходить через сферу тяготения Земли в ближайшие 200 лет. Все эти объекты были исследованы для Пулковской, Коуровской и Симеизской обсерваторий на период с 16.11.2017 до 16.11.2067, а также и в даты прохождения через сферу тяготения Земли. В результате были получены даты, когда астероид впервые показывается в поле зрения обсерватории и его звездная величина меньше либо равна максимально наблюдаемой (18.0), если такое случается, а также звездные величины наблюдаемых в дни прохождения через сферу тяготения Земли объектов в указанных пунктах наблюдения. Полученные результаты можно применить для составления программы наблюдений.

**Ключевые слова:** астероиды, потенциально опасные астероиды, условия видимости, сфера тяготения Земли.

## APPLICATION OF SOFTWARE «EROS» FOR SEARCH OF OBSERVATION CONDITIONS OF POTENTIALLY HAZARDOUS ASTEROIDS

V. Blinova and T. Galushina

National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: vera.blinova.1996@gmail.com

**Abstract:** Further orbit improvement requires observations, i.e. we need to know when and where asteroids can be observed. A software "EROS" (Ephemeris Researches and Observation Services) is being developed in Tomsk to simplify and automate the stages of preparation for positional observations. Using it we calculate the visibility conditions of specific objects. We chose 38 potentially hazardous objects that will pass through the gravity sphere of the Earth in the next 200 years. All these objects were investigated for the Pulkovo, Kourovskaya, and Crimea-Simeiz observatories for the period from 16.11.2017 to 16.11.2067 and also on the dates of passage through the gravity sphere of the Earth. As a result we obtained dates when the object first appears in the observatory's field of view and its magnitude is less than or equal 18.0. Also the magnitudes observed in the days of passing through the gravity sphere of the Earth are given for these asteroids. The obtained results can be used for drawing up the program of observations.

**Keywords:** Asteroids, potentially hazardous asteroids, observation conditions, the gravity sphere of the Earth.

В связи с актуальностью проблемы астероидной опасности, необходимо знать орбиты потенциально опасных астероидов как можно точнее, а для дальнейшего уточнения орбит требуются наблюдения, т.е. нужно знать, когда и где объекты можно наблюдать.

С целью упростить и автоматизировать этапы подготовки к позиционным наблюдениям в Томске разрабатывается программный комплекс «EROS» (от англ. «Ephemeris Researches and Observation Services») [1].

В перечень выполняемых «EROS» задач входят: вычисление продолжительности наблюдательной ночи по дате наблюдений, расчет эфемерид, выдача списка астероидов, пригодных для наблюдений на заданную наблюдательную ночь, вычисление условий видимости конкретного объекта

(задача поиска). С его помощью и проводился поиск ответа на вопрос: когда и где интересующие нас объекты наблюдаемы.

Было выбрано 38 потенциально опасных астероидов, которые будут проходить через сферу тяготения Земли в ближайшие 200 лет: 99942 Arophis, 153201 2000 WO107, 153814 2001 WN5, 456938 2007 YV56, 2002 TY59, 2006 QV89, 2007 TX22, 2007 UD6, 2007 UW1, 2008 DB, 2008 EZ7, 2008 EL68, 2008 GY21, 2008 VB4, 2009 BF58, 2011 CH22, 2011 JA, 2012 HG2, 2012 TC4, 2012 UE34, 2013 GM3, 2013 YJ48, 2014 HB177, 2014 HY198, 2015 DQ224, 2015 EX, 2015 YC2, 2016 DV1, 2016 CB248, 2016 HF3, 2016 NK22, 2016 NL39, 2016 RD34, 2016 TH, 2016 VB1, 2016 WY, 2017 DG16, 2017 DR34. Все эти объекты были исследованы для Пулковской, Коуровской и Симеизской обсерваторий на период с 16.11.2017 до 16.11.2067, а также и в даты прохождения через сферу тяготения Земли, полученные для каждого объекта с помощью программного комплекса ИДА [2].

*Таблица 1. Ближайшие даты наблюдений*

Астероид	Пулковская		Симеизская		Коуровская	
	Дата	Зв. вел.	Дата	Зв. вел.	Дата	Зв. вел.
99942	02.03.2021	15.7	16.01.2021	18.0	26.02.2021	15.7
153201	27.11.2020	16.5	26.11.2020	17.5	26.11.2020	17.5
153814	09.09.2019	17.9	29.04.2019	17.9	31.05.2019	18.0
456938	15.06.2027	18.0	15.06.2027	18.0	15.06.2027	18.0
2006 QV89	01.09.2019	18.0	02.09.2019	18.0	01.09.2019	17.8
2008 EL68	15.02.2065	17.2	15.02.2065	17.2	15.02.2065	17.4
2008 GY21	10.04.2018	16.9	10.04.2018	16.9	10.04.2018	16.8
2008 VB4	–		03.11.2033	15.7	–	
2009 BF58	21.01.2022	15.7	21.01.2022	15.6	21.01.2022	15.2
2012 HG2	09.02.2047	17.9	09.02.2047	17.9	09.02.2047	17.9
2012 UE34	08.04.2041	14.6	08.04.2041	14.9	08.04.2041	14.5
2013 GM3	–		12.04.2026	17.9	–	
2014 HB177	04.05.2034	17.6	04.05.2034	17.8	04.05.2034	17.8
2015 YC2	17.01.2053	17.9	17.01.2053	17.9	17.01.2053	17.9
2016 DV1	28.02.2021	17.8	28.02.2021	17.8	28.02.2021	17.9

*Таблица 2. Момент прохождения через сферу тяготения Земли*

Астероид	Дата	Пулковская	Симеизская	Коуровская
99942	13.04.2029	3.7	4.1	–
2002 TY59	03.10.2138	16.7	16.7	16.8
2006 QV89	09.09.2019	–	13.6	–
2007 UD6	18.10.2048	17.0	17.0	16.3
2008 EL68	16.02.2065	14.9	14.9	14.4
2008 GY21	10.04.2018	16.9	16.9	16.8
2008 VB4	03.11.2033	–	15.7	–
2009 BF58	21.01.2022	15.7	15.6	15.2
2011 CH22	04.02.2074	15.8	15.7	15.8

2011 JA	26.04.2145	–	14.8	–
2012 HG2	13.02.2047	12.3	13.0	12.7
2012 UE34	08.04.2041	14.9	15.1	14.8
2013 GM3	14.04.2026	–	15.2	–
2013 YJ48	25.12.2181	17.6	17.6	17.6
2015 EX	09.03.2101	14.8	14.8	14.7
2015 YC2	23.01.2053	13.4	12.5	12.4
2016 DV1	03.03.2021	14.0	14.1	13.9
2016 RD34	05.09.2047	16.7	16.3	15.6
2017 DG16	23.02.2017	17.5	17.5	–
2017 DR34	25.02.2017	17.6	17.5	17.4

В табл. 1 представлены объекты, для которых были найдены даты, когда астероид впервые показывается в поле зрения обсерватории и его звездная величина меньше либо равна максимально наблюдаемой (18.0). Из выбранных объектов 25 не будут наблюдаться на выбранных обсерваториях в ближайшие 50 лет, либо, не попав в область видимости, либо по причине слишком большой звездной величины.

В табл. 2 представлены астероиды, которые наблюдаются в указанные даты прохождения через сферу тяготения Земли и звездные величины объекта для различных пунктов наблюдения, для этих дат характерно то, что объекты имеют большую яркость, чем обычно. 18 объектов в указанные даты не наблюдаются ни на одной из обсерваторий.

В заключении нужно сказать, что полученные результаты можно впоследствии применить для составления программы наблюдений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-02-02868.

### Литература

1. *Логина М.О., Скрипниченко П.В., Галушина Т.Ю.* Астрометрическая поддержка позиционных наблюдений в программном комплексе EROS // Труды ТГУ. 2015. Т. 296. 17–19 ноября 2014 г., Томск. С. 133–136.
2. *Летнер О.Н., Галушина Т.Ю.* Выявление вековых резонансов в динамике нумерованных астероидов, тесно сближающихся с Землей // Настоящий сборник.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ТЕЛА ПРИЗМАТИЧЕСКОЙ ФОРМЫ СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ

**В.И. Булдакова, Н.В. Савкина**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия

E-mail: [disoyer@gmail.com](mailto:disoyer@gmail.com)

**Аннотация.** Исследование изменений аэродинамических характеристик тел, движущихся в воздухе, и их влияния на параметры движения является одной из основных задач газодинамики. Наиболее точные результаты будут получены при проведении на-

174

турных экспериментов, однако такая проверка не всегда возможна. В подобных случаях используют численное моделирование. В данной статье исследован процесс обтекания тела призматической формы сверхзвуковым потоком с использованием пакета ANSYS Fluent. Рассмотрен пространственный случай при скорости набегающего потока  $M=2,06$  и  $M=4,04$  а также при углах атаки равных  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\alpha = 4^\circ$  и  $\alpha = 8^\circ$  в нормальных условиях окружающей среды. Течение газа описывалось системой осредненных уравнений Навье-Стокса. Перед расчетом аэродинамических характеристик был проведен анализ сеточной сходимости для трех моделей турбулентности (Спаларт–Алмареса, k-ε и SST) и проверка итерационной сходимости с целью выявления наиболее подходящей для данного случая модели. Исследование состояло в определении аэродинамических коэффициентов лобового сопротивления, подъемной силы и опрокидывающего момента. Было проведено сравнение результатов расчета, с экспериментальными данными, полученными в НИИ «Геодезия» г. Красноармейск. Относительное рассогласование коэффициентов с экспериментальными данными составляет не более 8–9%. Результаты данных вычислений графически представлены в виде поля скоростей, температур и давлений, а также в виде графиков изменения аэродинамических характеристик в зависимости от количества итераций и графиков итерационной сходимости процесса расчета.

**Ключевые слова:** баллистика, вычислительная газодинамика, Ansys Fluent.

## COMPUTATIONAL MODELING OF SUPERSONIC FLOWS OVER PRISMATIC BODY

V. Buldakova and N. Savkina

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: disoyer@gmail.com

**Abstract.** The research of aerodynamic characteristics of bodies moving in the fluid and how it can affect the motion variables is considered to be one of the prior problems in fluid dynamics. The most accurate calculations can be obtained through full-scale experiments. However, this verification is not always available. Computational methods are used in these cases. This article investigates the supersonic flows over prismatic body with the use of Ansys Fluent. The 3-D case with the flow velocities of  $M=2.06$  и  $M=4.04$  and angle of attack  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\alpha = 4^\circ$  и  $\alpha = 8^\circ$  in normal conditions was examined. The fluid flow was described with the Reynolds-averaged Navier–Stokes equations. Before the calculation of aerodynamic characteristics, the analysis of mesh convergence for three turbulence models (Spalart–Allmares, k-ε and SST) and the verification of iteration convergence were carried out in order to educe the most appropriate model for this exact case. The research was determined to calculate aerodynamic drag coefficient, lift force coefficient and stalling torque coefficient. The attained calculations were compared to experimental results from Research Institution in Krasnoarmeysk. The fractional error can reach 8–9%. The results are graphically shown as pressure, velocity, temperature distribution and graphics of aerodynamic coefficients change based on the number of iterations and graphics of iteration convergence.

**Keywords:** ballistics, computational fluid dynamics, Ansys Fluent.

Целью данного исследования является моделирование обтекания треугольной призмы длиной 21 мм сверхзвуковым потоком в установившемся

движении при скорости  $M=2.06$  и  $M=4.04$ , а также анализ влияния угла атаки на профиль обтекания.

Различными методами были построены три сетки для проверки сеточной сходимости по величине коэффициента лобового сопротивления. Подбрав сетку с оптимальным количеством элементов, производится расчет коэффициента лобового сопротивления с использованием трех различных моделей турбулентности: SA, k-E и SST при нормальных условиях. Полученные результаты сравниваются с заранее известными данными, полученными в результате проведения экспериментов, что позволяет выявить наиболее точную модель турбулентности для использования в дальнейших вычислениях. Результаты показали, что использование моделей, основанных на нескольких уравнениях переноса, минимизирует ошибки и погрешности, а также дает хорошую точность расчета. Таким образом, в последующих расчетах используется модель SST, содержащая четыре уравнения переноса.

Далее исследуются обтекания призмы при углах атаки  $\alpha=0^\circ$ ,  $\alpha=4^\circ$  и  $\alpha=8^\circ$  в нормальных условиях окружающей среды. Результаты расчетов для скоростей набегающего потока  $M=2.06$  и  $M=4.04$  и указанных углах атаки представлены в численном и графическом виде. Проведено сравнение расчетных данных с экспериментальными данными.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ДЛИНЫ ТЕЛА НА АЭРОДИНАМИКУ

**Н.Р. Гимаева**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: natalia.gimaeva@inbox.ru

**Аннотация.** Создание надежных методик расчета аэродинамических характеристик летательных аппаратов важно для решения ряда практических задач управления движением.

Ракетно-космическая промышленность – одна из наиболее сложных и наукоемких отраслей машиностроения. Разработка ракетно-космической техники характеризуется высокой наукоемкостью, значительной трудоемкостью, длительными сроками разработки и проведения испытаний. Поэтому в данной области промышленности широкое распространение в решении задач авиационной и космической техники приобрел метод математического моделирования. Численная модель, описываемая уравнениями Навье–Стокса, учитывает эффекты сжимаемости, вязкости, теплопроводности газа и реализуется в пакете вычислительных программ Ansys Fluent, позволяющем решать задачи гидрогазодинамики. В качестве объекта исследования была выбрана прямоугольная призма. Возможности численного моделирования аэродинамики призмы иллюстрируются полями плотностей и давлений при обтекании потоком воздуха.

**Ключевые слова:** внешняя баллистика, аэродинамический коэффициент лобового сопротивления, сверхзвуковой режим обтекания.

# RESEARCH OF THE INFLUENCE OF CHANGES IN BODY LENGTH ON AERODYNAMICS

N. Gimayeva

National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: natalia.gimaeva@inbox.ru

**Abstract.** Creation of reliable methods for calculating the aerodynamic characteristics of aircraft, important for solving a number of practical problems of controlling the motion of the bodies under study. The research is aimed at solving the problem of the dynamic interaction of a real gas with a moving body. In this paper we consider the problem of calculating the nonlinear aerodynamic characteristics of a rectangular prism. The most complete among the numerical models is the model described by the Navier–Stokes equations, which makes it possible to take into account the compressibility and viscosity, using SST model of turbulence. The influence of the change in the length of the investigated body on the aerodynamic characteristics is studied. At the same time, the numerical approaches employed in this paper have been validated against the available experimental data.

**Keywords:** external ballistics, the aerodynamic drag coefficient, supersonic flow regime.

Геометрия обтекаемого тела достаточно проста, миделево сечение представляет собой квадрат, со стороной 14 мм. Длина тела меняется в диапазоне от 21 до 105 мм. Режим течения воздуха всюду считается турбулентным, диапазон чисел Маха от 0.9 до 4.04. Необходимо определить аэродинамические коэффициенты лобового сопротивления. Обтекание рассчитывается при следующих условиях: давление  $p = 1$  атм, температура  $T = 20$  °С, плотность воздуха  $= 1.2054$  кг/м<sup>3</sup> и турбулентная интенсивность 5 %.

Задача решается при следующих допущениях:

– режим течения воздуха турбулентный. Для описания турбулентного характера движения воздуха используются осредненные уравнения сжимаемой вязкой жидкости и гипотеза вихревой вязкости;

– пренебрегаем массовыми силами.

Течение сплошной среды (газа) описывается системой осредненных уравнений Навье–Стокса, в состав которой входят уравнение неразрывности и уравнения движения с учетом SST модели турбулентности.

В данной Таблице представлены поля распределения давления и плотности при числах маха 2.06 и 4.04, при этом длина тела изменялась от 21 до 105 мм. При обтекании тела сверхзвуковым потоком газа возникают ударные волны (скачки уплотнения). На картинках четко виден этот скачок уплотнения. Давление максимальной величины наблюдается в головной части фигуры. Максимальная плотность также наблюдается во фронтальной плоскости тела.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИЛУЧШИХ КОНФИГУРАЦИЙ ОРБИТ И ДАТЫ ЗАПУСКА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

**Е.Ю. Дурнева, Н.А. Попандопуло, М.А. Баньщикова**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: elena\_durneva96@mail.ru

**Аннотация.** В данной работе перед нами стояла задача спрогнозировать ситуации пролетов каждого из КА (Метеор-МП, Зонд) над наземной фотометрической сетью авроральных приборов, в частности, в г. Апатиты и выявить пересечения областей видимости полей зрения орбитальных имаджеров и наземных изображающих камер на разных высотах, а также найти наилучшую конфигурацию орбит КА (Метеор-МП, Зонд), дату и время запуска КА. Основываясь на полученных результатах, мы установили, что наилучшим временем запуска КА является весна и осень. Наша работа показала, что при начальной дате запуска КА 17.09.25 максимальное количество пересечений в полярных зонах приходится на 14:45. Далее варьировались угловые элементы орбиты: аргумент перицентра, долгота восходящего узла и средняя аномалия в пределах от  $-15$  до  $15$  градусов с шагом  $1$  градус. В результате исследования была выявлена наилучшая конфигурация орбит при следующих значениях: аргумент перицентра равна  $-9$  градусов, долгота восходящего узла равна  $-9$  градусов, средняя аномалия равна  $3$  градуса. При варьировании долготы восходящего узла с шагом  $1$  градус от  $0$  до  $360$  градусов выявлено, что наилучший вариант при долготе восходящего узла приблизительно  $0$  и  $180$  градусов.

**Ключевые слова:** космические аппараты, приполярные зоны, Метеор-МП.

## DETERMINATION OF THE BEST ORBITAL CONFIGURATIONS AND LAUNCH DATES OF SPACE VEHICLES

**E. Durneva, N. Popandopulo and M. Banshchikova**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: elena\_durneva96@mail.ru

**Abstract.** In this paper, we focus on the task of predicting the situation of the passages of each spacecraft (Meteor-MP, Zond) over the ground photometric network of auroral devices, in particular, in Apatity, and to identify the intersections of the fields of view of the orbital imagers and ground image cameras at different heights, and also to find the best configuration of the orbits of the spacecrafts (Meteor-MP, Probe), the date and time of launching the spacecraft. Based on the results, we find that the best time to launch the spacecraft is both spring and autumn. Our work shows that at the initial launch date of the spacecraft on 17.09.2025 the maximum number of intersections in the polar zones is at 14:45. Further, we vary the angular elements of the orbit: the pericenter's argument, the longitude of the ascending node, and the mean anomaly ranging from  $-15$  to  $15$  degrees in  $1$ -degree increments. As a result of the research, we reveal the best configuration of orbits with the following values: the pericentre argument is  $-9$  degrees, the longitude of the ascending node is  $-9$  degrees, and the mean anomaly

ly is 3 degrees. By varying the longitude of the ascending node in 1-degree increments from 0 to 360 degrees, we determine that the best option for the longitude is about 0 and 180 degrees.

**Keywords:** space vehicles, circumpolar zones, Meteor-MP.

Человечество сделало огромный прорыв в области техники и космонавтики и необходимость в создании и использовании космических аппаратов становится более востребованной, чем когда-либо. Это напрямую связано с одним из главных предназначений ИСЗ, введенных на орбиты вокруг Земли, – решением научных и прикладных задач.

В настоящее время совместно с ИКИ РАН, ЦАО, ТГУ проектируется космический эксперимент, связанный с одновременным запуском космических аппаратов (КА) Метеор-МП и Зонд и решением ряда астрономических и геофизических задач в приполярных зонах. Нашей целью является изучение динамики движения данных искусственных спутников Земли и их ситуационного анализа.

Необходимо спрогнозировать ситуации пролетов каждого из данных КА над наземной фотометрической сетью авроральных приборов и выявить пересечения областей видимости полей зрения орбитальных имаджеров (с орбит КА) и наземных изображающих камер, на разных высотах, а также найти наилучшую конфигурацию орбит КА (Метеор-МП, Зонд), дату и время запуска КА.

По расположению орбит в пространстве спутники являются полярными, так как имеют наклонение порядка 90–100 градусов. По геометрическому характеру движения орбиты относятся к классу круговых или близких к круговым. Высота над поверхностью Земли для таких спутников мало меняется в процессе полета. Состояние движения спутников на разных высотах определяется различными возмущающими силами. В качестве начальных параметров для дифференциальных уравнений движения были взяты следующие Кеплеровы элементы орбиты, а именно: большая полуось Метеора-МП составляет 7372 км, период обращения вокруг Земли составляет 105 минут, Метеор имеет почти нулевой эксцентриситет, наклонение составляет 90 градусов, высота над поверхностью Земли сравнительно мала – 820 км. Элементы орбиты Зонда очень схожи с элементами Метеора: большая полуось – 7030 км, период обращения вокруг Земли – 100 минут, высота над поверхностью Земли – 650 км. Зонд является солнечно-синхронным спутником. Угловые элементы (аргумент перицентра, долгота восходящего узла, средняя аномалия) КА были выбраны равными нулю.

В данной работе мы моделировали движение искусственного спутника Земли с учетом возмущений только от второй зональной гармоники. Система дифференциальных уравнений движения центра масс спутников решалась классическим методом Рунге–Кутты 4-го порядка. Ошибка численного интегрирования на конце интервала времени составила 0.00005 км, что говорит о хорошей согласованности метода и модели. Ин-

тегрирование выполнялось с шагом 10 секунд на годовом интервале времени с интервалом выдачи результатов 1 сутки с 01.01.2025 г. по 31.12.2025 г. в 00:00.

Мы также предполагаем, что геофизические приборы на КА направлены вдоль вектора нормали (вектор между центрами масс спутника и Земли) и их поле зрения составляет 30 градусов. Для учета вхождения КА в тень Земли использовалась, так называемая, функция тени  $\Phi$ . Для вычисления площади пересечения областей видимости КА использовалась формула нахождения площади пересечения двух окружностей. В данной работе расстоянием между центрами окружностей являлось расстояние между подспутниковыми точками космических аппаратов.

Основываясь на полученные результаты, наилучшим временем запуска КА является весна и осень, в частности 17.09.2005 г. Наша работа показала, что при начальной дате запуска КА 17.09.25 г., с изменением шага на 15 минут, максимальное количество пересечений в полярных зонах приходится на 14:45. Следовательно, 17.09.25 г. в 14:45 наблюдается наибольшее количество пересечений зон видимости имаджеров, а именно 44 раза, на теневой части орбиты над полярными зонами. Далее варьировались угловые элементы орбиты: аргумент перицентра, долгота восходящего узла и средняя аномалия в пределах от  $-15$  до  $15$  градусов с шагом 1 градус с целью нахождения наилучшей конфигурации орбит для определения максимально возможных пересечений областей видимости КА Метеор-МП на неосвещенной стороне орбиты. В результате исследования была выявлена наилучшая конфигурация орбит при следующих значениях: аргумент перицентра равна  $-9$  градусов, долгота восходящего узла равна  $-9$  градусов, средняя аномалия равна  $3$  градуса. При варьировании долготы восходящего узла с шагом 1 градус от  $0$  до  $360$  градусов выявлено, что наилучший вариант при долготе восходящего узла приблизительно  $0$  и  $180$  градусов.

## **ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭФФЕКТА КОАНДА ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ МИНОМЁТНОГО ВЫСТРЕЛА В КАНАЛЕ СТВОЛА**

**А.А. Квашнёв, Р.И. Егоров, К.Е. Милевский, А.В. Гуськов**

Новосибирский государственный технический университет, Россия  
E-mail: [kvashnyov.2015@stud.nstu.ru](mailto:kvashnyov.2015@stud.nstu.ru)

**Аннотация.** Рассматривается возможность использования эффекта Коанда для стабилизации миномётного выстрела в канале ствола и во время полёта. Приводятся теоретические выкладки о природе эффекта Коанда и примеры использования данного эффекта, известные на данный момент, в других областях. Приводится теоретическое основание возможного использования эффекта Коанда для улучшения поведения ми

номётного выстрела в канале ствола миномёта. Желаемая стабилизация достигается путём создания ламинарных потоков воздуха в желобах нанесённых на корпус миномётного выстрела.

**Ключевые слов:** миномётный выстрел, эффект Коанда, миномёт.

## THEORETICAL POSSIBILITY OF USING THE COANDA'S EFFECT TO STABILIZE A MORTAR SHOT IN THE BARREL CHANNEL

A. Kvashnev, R. Egorov, K. Milevsky and A. Guskov

Novosibirsk State Technical University, Russian Federation

E-mail: [kvashnyov.2015@stud.nstu.ru](mailto:kvashnyov.2015@stud.nstu.ru)

**Abstract.** The possibility of using the Coanda's effect to stabilize a mortar shot in the barrel channel and during the flight is considered. Theoretical calculations are given on the nature of the Coanda's effect and examples of the use of this effect, known at the moment, in other areas. The theoretical basis for the possible use of the Coanda's effect for improving the behavior of a mortar shot in the mortar canal channel is given. The desired stabilization is achieved by creating a laminar flow of air in the gutters of mortar shells fired on the body.

**Keywords:** Mortar shot, Coanda's effect, mortar.

Как известно, одним из основных недостатков миномётного выстрела является его невысокая кучность. Это вызвано тем, что миномёты, в большей своей массе, это не нарезное орудие, поэтому миномётный выстрел в канале гладкого ствола дестабилизируется. [1] Для решения этой проблемы мы предлагаем прибегнуть к помощи эффекта Коанда. Эффект Коанда – физическое явление, названное в честь румынского учёного Anri Coanda (во французском произношении Коандá, откуда и название эффекта), который в 1932 г. обнаружил, что струя жидкости, вытекающая из сопла, стремится отклониться по направлению к стенке и при определенных условиях прилипает к ней. Это объясняется тем, что боковая стенка препятствует свободному поступлению воздуха с одной стороны струи, создавая вихрь в зоне пониженного давления. Аналогично и поведение струи газа.

На данный момент, эффект Коанда малоизучен, хотя и часто встречается в повседневной жизни, например, чай проливается, когда его переливают из одного стакана в другой, или когда струя из носика чайника при небольшом наклоне норовит отклониться от вертикали и прилипает к носику с внешней стороны. Также на сегодняшний день известно [2] использование эффекта Коанда в устройстве кондиционеров (струя холодного воздуха «прилипает» к потолку для лучшего обдува больших помещений), конструкции клиновоздушных двигателей и в болидах Formula 1. Редкость в использовании эффекта Коанда обуславливается тем, что стабильный эффект возникает лишь при строго определённом соотношении щели и размера сопла [3].

Наши исследования основываются на 82-мм миномётном выстреле О-832Д. Миномётный выстрел во время движения внутри канала ствола подвержен потокам встречного воздуха, которые огибают снаряд-мину. Наша цель заключалась в том, чтобы заставить эти потоки воздуха «прилипнуть» к корпусу снаряда-мины. Для этого в корпусе создаются небольшие желоба с полукруглым поперечным сечением, начинающиеся возле центрирующего утолщения миномётного снаряда. Эти желоба должны быть выполнены таким образом, что их размер и размер канала ствола создают то самое определённое соотношение, необходимое для создания стабильного эффекта Коанда. По этим желобам воздух, прижатый эффектом Коанда, будет проходить через весь корпус снаряда-мины до его хвостовой части, тем самым дополнительно стабилизируя его. Необходимо создать ламинарный поток воздуха в желобах, это стоит учитывать при выборе размера поперечного сечения.

Теоретически, эффект Коанда способен увеличить кучность миномётного выстрела, причём этот метод можно использовать не только для мины О-832Д, но и для любой другой мины для гладкоствольного миномёта, потому что снаряд в нарезном стволе испытывает большие нагрузки и изменения в его корпусе могут привести к разрушению снаряда прямо внутри ствола.

### Литература

1. Гуськов А.В., Милевский К.Е., Сотенко А.В. Внешняя баллистика : учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. 188 с.
2. Ганич Г.А., Гущина Н.А., Жулев Ю.Г. Эффект Коанда при выдуве струй из прямоугольных сопел под углом к плоской поверхности // Учёные записки цаги. Т. 20. 1994. № 3–4. С. 49.
3. Семиненко А.С., Шумский А.С., Долгаль А.В. Применение эффекта коанда. Ч. 1. Авиация. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2012. № 1. С. 56.

## **ЧИСЛЕННОЕ ИНТЕГРИРОВАНИЕ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ В БОРТОВОЙ МОДЕЛИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ГЛОНАСС ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ПОЛУТЕНЕВЫХ И ТЕНЕВЫХ УЧАСТКОВ ОРБИТЫ**

**В.В. Кинзерский, Т.А. Марарескул**

АО "Информационные спутниковые системы им. академика М.Ф. Решетнева", Россия  
E-mail: kinzerskivv@iss-reshetnev.ru

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования влияния изменения шага интегрирования уравнений движения бортовой модели космического аппарата ГЛОНАСС при прохождении полутеневых и теневых участков орбиты. Бортовая мо-

182

дель движения представляет собой программный комплекс, работающий на космическом аппарате, для расчета эфемерид. Он позволяет прогнозировать движение космического аппарата. Данное исследование проводилось из-за того, что на теневых участках орбиты происходит отклонение орбиты космического аппарата от номинальной орбиты.

**Ключевые слова:** искусственные спутники Земли, бортовая модель движения, теневой участок орбиты.

## NUMERICAL INTEGRATION OF EQUATIONS OF MOTION ON THE ON-BOARD MODEL OF THE GLONASS SATELLITE DURING THE PASSAGE HALF-SHADOW AND SHADOW AREAS OF THE ORBIT

V. Kinzersky and T. Marareskul

JSR "Academician M.F. Reshetnev "Information satellite systems", Russian Federation  
E-mail: kinzerskivv@iss-reshetnev.ru

**Abstract.** The present paper describes the results of research of step of integrating on the on-board model of motion of the GLONASS satellite during the passage half-shadow and shadow areas of the orbit. On-board model of motion is satellite-based program complex for calculation ephemeris. Complex allows to predict the motion of the satellite. This research was carried out because of the fact that in the shadow areas of the orbit there is a deviation of the true orbit from the nominal orbit.

**Keywords:** artificial earth satellites, on-board model of motion, shadow area of orbit.

Бортовая модель движения [1] была разработана впервые в начале двухтысячных годов для космических аппаратов серии ГЛОНАСС с целью реализации на борту режима размножения эфемерид. До этого использовался только режим ретрансляции, при котором массив эфемерид (и частотно-временных поправок) рассчитывался в наземном комплексе управления и закладывался на борт космического аппарата в виде таблиц.

Переход к режиму размножения эфемеридно-временной информации на борту позволил существенно снизить объем специальной информации, закладываемый на борт космического аппарата, а также уменьшить продолжительность сеансов связи.

Бортовая модель движения космического аппарата характеризуется следующим составом учитываемых возмущений:

1. от гравитационного поля Земли (статическая модель);
2. от гравитационного притяжения Луны и Солнца;
3. от радиационного давления Солнца.

Бортовая модель расчета параметров вращения Земли учитывает линейное изменение координат полюса и Всемирного времени с наложением годовой и полугодовой периодик (для Всемирного времени и Чандлеровской составляющей).

Координаты Луны и Солнца, а также параметры нутации Земли представлены в виде коэффициентов полиномов Чебышева, которые закладываются с Земли.

Для интегрирования дифференциальных уравнений движения космического аппарата используется метод интегрирования Адамса 7-го порядка. Интегрирование осуществляется в неособенных элементах с переменным шагом интегрирования.

Для повышения точности интегрирования было проведено исследование влияния уменьшения шага интегрирования при прохождении полутеневых участков орбиты.

В качестве эталонной использовалась орбита, вычисленная с помощью бортовой модели движения с постоянным шагом 8 с как на освещенных, так и на теневых участках орбиты.

Интервал интегрирования брался равным 1 суткам, который включает в себя освещенный, теневой и полутеневой участок орбиты.

В качестве опытных были взяты три орбиты, вычисленные с помощью бортовой модели движения с шагами 16, 32, 64 с при прохождении полутеневых и теневых участков орбиты, 512 с - на освещенных участках орбиты

Результаты исследования представлены в таблице.

Шаг интегрирования на освещенном участке орбиты, с	Шаг интегрирования в полутени и тени, с	Максимальный модуль радиус-вектора отклонения опытной орбиты от эталонной, мм
512	64	25
512	32	0.3
512	16	0.14

Как видно из таблицы, применяемое в настоящее время на КА серии ГЛОНАСС значение шага интегрирования при прохождении полутени, равное 64 с, приводит к погрешности прогноза эфемерид на уровне 25 мм. При заданном уровне погрешности БМД перспективных КА в 1 см, эта величина является недопустимо большой.

Отклонение опытной орбиты от эталонной 0.1 и 0.3 мм при шаге интегрирования на интервале полутени 16 и 32 с соответственно составляет 1 и 3 % от общего бюджета погрешности и может считаться приемлемым в обоих случаях. Окончательный выбор шага интегрирования для уменьшения погрешности эфемерид, обусловленной схемой прохождения теневых участков при интегрировании уравнений движения, целесообразно осуществлять с учетом фактических оценок быстродействия алгоритмов БМД в условиях реализации в бортовой вычислительной машине перспективных КА серии ГЛОНАСС.

## Литература

1. *Современные* и перспективные информационные ГНСС-технологии в задачах высокоточной навигации / под ред. В.А. Бартенева, М.Н. Красильщикова. М.: Физматлит, 2014. С. 179–191.

### ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНО ВЫДУВАЕМОЙ РЕАКТИВНОЙ ГАЗОВОЙ СТРУИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СВЕРХЗВУКОВОГО ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

**В.А. Кисловский, В.И. Звегинцев**

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
Сибирского отделения Российской академии наук, Россия  
E-mail: kislovsky\_v@mail.ru

**Аннотация.** Исследована физическая картина обтекания при выдуве газовой струи и получены оценки влияния выдува на аэродинамические характеристики летательного аппарата осесимметричной конфигурации при числе Маха набегающего потока  $M=3$  и угле атаки  $\alpha = 0^\circ$ . Численные расчеты обтекания выполнялись, как трехмерная стационарная задача. Использовались осредненные уравнений Навье–Стокса и SST  $k-\omega$  модели турбулентности и получены следующие результаты.

**Ключевые слова:** сверхзвуковая скорость, осесимметричный летательный аппарат, выдув газовой струи, аэродинамические характеристики.

### PARAMETRIC STUDY OF A TRANSVERSELY BLOWN REACTIVE GAS JET TO CONTROL THE MOTION OF A SUPERSONIC AXISYMMETRIC VEHICLE

**V. Kislowskiy and V. Zvegintcev**

Institute of Theoretical and Applied Mechanics S.A. Khristianovich of the Siberian Branch of  
the Russian Academy of Sciences, Russian Federation  
E-mail: kislovsky\_v@mail.ru

**Abstract.** The physical picture of the flow during blowing of a gas jet is studied and estimates of the effect of blowing on the aerodynamic characteristics of an vehicle of an axisymmetric configuration are obtained for a Mach number of the oncoming stream  $M = 3$  and an angle of attack  $\alpha = 0^\circ$ . Numerical simulations of flow were performed as a three-dimensional stationary problem. The averaged Navier–Stokes equations and the SST  $k-\omega$  turbulence model were used, and the following results were obtained.

The effect of the location of the blowing hole and its size on the magnitude of the component of the lift force resulting from the redistribution of pressure is investigated. It was found that increasing the pressure of the blowing hole enhances the effect of pressure redistribution. Also, this effect enhances the increase in the density of the free stream while maintaining the

value of the depth of penetration of the jet into the free stream. To confirm the results obtained, a comparison was made between numerical and experimental simulations. The performed comparisons showed a good degree of convergence of numerical simulation with experiment.

**Keywords:** supersonic velocity, axisymmetric vehicle, gas jet blowing, aerodynamic characteristics.

Проведено исследование влияние расположения отверстия выдува и его размера на величину образующейся в результате перераспределения давления составляющей подъемной силы. Было выявлено, что увеличение давления на срезе отверстия выдува усиливает эффект перераспределения давления. Также этот эффект усиливает увеличение плотности набегающего потока при сохранении значения коэффициента глубины проникновения струи в набегающий поток. Для подтверждения полученных результатов, было проведено сравнение численного и экспериментального моделирования. Проведенные сравнения показали хорошую степень сходимости численного моделирования с экспериментом.

Газоструйные системы управления является мало распространенным способом корректировки траектории полета летательного аппарата. Однако, системы управления такого рода обладают рядом преимуществ. Во-первых, они могут достаточно эффективно работать на любой высоте. Во-вторых, использование выдува газовой струи, в качестве управляющего воздействия, имеет меньшее время отклика после начала или окончания работы органов управления. Данный фактор увеличивает гибкость работы системы управления и улучшает маневренность летательного аппарата. В-третьих, вовремя полета, когда система управления не работает, органы управления не создают дополнительного сопротивления. К недостаткам относится, ограниченная продолжительность работы газоструйной системы управления, связанная с необходимостью использования источника рабочего тела, например газогенератора, также не возможность достаточно точно предсказать взаимодействие выдуваемой струи с набегающим вдоль корпуса обтекаемой конфигурации потоком и образующейся на этом корпусе силы. Для улучшения понимания формирования сил в результате выдува поперечной реактивной струи с боковой поверхности осесимметричного летательного аппарата, была проведена данная работа. Исследование в этом направлении могут стать основой для создания новых систем управления сверхзвуковых летательных аппаратов или для усовершенствования уже имеющихся.

Исследования в данной работе проводились, путем численного моделирования и экспериментальных исследований. Численное моделирование проводилось в программном пакете ANSYS Fluent. Расчеты обтекания выполнялись на основе осредненных уравнений Навье–Стокса и SST модели турбулентности. На внешних границах расчетной области задавались параметры невозмущенного набегающего потока. На выходной границе – ус-

ловия с заданием статического давления и температуры торможения набегающего потока, на стенках – условия прилипания и отсутствие теплообмена. Задача являлась трехмерной, стационарной. Сетка строилась с экспоненциальным сгущением к телу. Общее число узлов расчетной сетки во всей расчетной области составлял порядка  $2,5 \cdot 10^6$ .

Исследуемая модельная конфигурация, представляла собой, осесимметричное тело. Конфигурация корпуса – это цилиндрическое тело вращения с носовой частью, которая имеет коническую форму с углом полураствора  $\varphi = 24^\circ$ . Удлинение головного обтекателя  $L_{нос}/D=1,4$ . Удлинение корпуса  $L/D=10$ . Струя выдувалась в положительном направлении оси  $OY$ .

Рассматривалось изменение составляющей коэффициента подъемной силы, появляющейся вследствие перераспределения давления, от расположения отверстия выдува вдоль продольной оси модели. Расположение отверстия выдува вблизи начала цилиндрической части приводит к формированию большой зоны повышенного давления и малой зоны более интенсивной части области пониженного давления по сравнению с расположением отверстия выдува ниже по потоку. Такого рода разница в картинах образования областей давления в результате выдува, может быть связана со скачком уплотнения, также находящимся вблизи начала цилиндрической части корпуса. В дальнейшем, при перемещении отверстия выдува к задней кромке, усилия, действующие на модель в результате перераспределения давления, изменяются в соответствии с уменьшением площади за отверстием, в которой располагается зона пониженного давления.

По своей структуре течения, взаимодействие набегающего потока с выдуваемой поперечно струей схоже с обтеканием цилиндрического препятствия эквивалентной формы. Таким образом, проведя численное моделирование с изменением диаметра отверстия выдува, был получен ожидаемый результат. То есть, изменение диаметра отверстия выдува втрое, приводит примерно к трехкратному изменению усилия, вызванного перераспределением давления.

Также изменение степени нерасчетности выдуваемой струи приводит к пропорциональному изменению рассматриваемой составляющей подъемной силы. Однако, при увеличении плотности набегающего потока и сохранении неизменным коэффициента проникновения струи в поток, качественная картина обтекания не меняется, при этом сила от перераспределения давления увеличивается соответственно этому изменению.

Для валидации полученных результатов были проведены экспериментальные исследования. Эксперименты проведены в сверхзвуковой аэродинамической трубе кратковременного действия «Транзит-М». Основными измерениями было определение силовых нагрузок действующих на модель, для этого использовались аэродинамические весы тензометрического типа. Полученные экспериментальным путем данные были сравнены с результатами численного моделирования и получено расхождение результатов

на 2.5–3%. Исходя из этого, можно утверждать о хорошей степени сходимости численного расчета с экспериментом.

Таким образом, было определено влияние положения отверстия выдува и его размера на образование силы от перераспределения давления в результате взаимодействия выдуваемой струи и набегающего потока. Также было выявлено, что увеличение давления на срезе отверстия выдува приводит к линейному увеличению значения образующейся силы, аналогично, как и увеличение плотности набегающего потока. Достоверность результатов численного моделирования была подтверждена экспериментальными результатами.

## ИЗУЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «ГОНЕЦ-М» № 37152

**И.К. Коловский, В.Н. Подолякин, Д.Н. Шмаков**

Акционерное общество «Информационные спутниковые системы»  
им. академика М.Ф. Решетнёва», Россия  
E-mail: kolovigor@mail.ru

**Аннотация.** Рассматриваются параметры орбиты КА «Гонец-М». Выделяются особенности в изменении оскулирующих параметров орбиты. Раскрывается понятие устойчивой орбиты – «замороженная орбита». Приведены значения параметров орбиты эксцентриситета и аргумента перигея, характеризующие подобные орбиты. Оценивается значимость применения полученного результата.

**Ключевые слова:** космический аппарат, параметры орбиты, эксцентриситет, аргумент перигея, баллистика.

## THE INVESTIGATION OF THE SUSTAINABILITY OF THE ORBITAL PARAMETERS OF THE SPACECRAFT «GONETS-M» № 37152

**I. Kolovsky, V. Podolyakin and D. Shmakov**

JSR "Academician M.F. Reshetnev "Information satellite systems", Russian Federation  
E-mail: kolovigor@mail.ru

**Abstract:** The spacecraft's «Gonets-M» orbital parameters are considered. The focus of this work is to the change in orbital parameters. The present research concentrated on the conception of a «frozen orbit», show values of the parameter eccentricity and argument of perigee that spell out such orbits. Research estimates a significance of the putting into practice.

**Keywords:** Spacecraft, orbital parameters, the eccentricity, the argument of perigee, ballistics.

Известно, что полярное сжатие Земли вызывает вращение линии апсид [1]. Однако, после рассмотрения параметров орбиты КА «Гонец-М» № 37152 было отмечено, что линия апсид орбиты КА ведет себя устойчи-

во, практически сохраняет свое положение. Несмотря на то, что наклонение плоскости орбиты отличается от критического значения (критическое наклонение равно  $63,43^\circ$  и  $116,57^\circ$  [2]).

Выяснилось, что после проведения коррекции приведения КА «Гонец-М» № 37152 попал на целевую орбиту с высотой 1500 км и наклонением  $82,5^\circ$  с особыми закономерностями изменений параметров орбиты – «замороженная орбита».

«Замороженная орбита» – это устойчивая орбита, у которой средние элементы, конкретно, эксцентриситет  $e$  и аргумент перигея  $w$ , в течение длительного промежутка времени могут принимать почти постоянные или заключенные в ограниченном диапазоне значения [3].

Поэтому при анализе движения КА обратим свое особое внимание на параметры  $e$ ,  $w$ .

По данным измерений текущих навигационных параметров (ИТНП) выяснилось, что до коррекции приведения  $w$  изменялся в диапазоне  $0^\circ$ - $360^\circ$ , т.е. изменялся вековым образом. А  $e$  изменялся в диапазоне 0.0006-0.0020.

В таблице приведены параметры  $e$ ,  $w$ ,  $i$ , полученные после обработки ИТНП, после коррекция приведения КА № 37152.

#### Результаты ИТНП КА № 37152

№	Дата	$e$	$w$ , °	$i$ , °
A1	23.09.2013	0.0010023	68.787	82.457
A2	03.01.2014	0.0011684	67.363	82.460
A3	13.04.2014	0.0011057	74.418	82.464
A4	26.10.2014	0.0012070	70.481	82.466
A5	23.02.2015	0.0011086	74.355	82.454
A6	14.07.2015	0.0009923	71.760	82.460
A7	14.11.2015	0.0011317	63.852	82.460
A8	06.03.2016	0.0011733	73.388	82.457

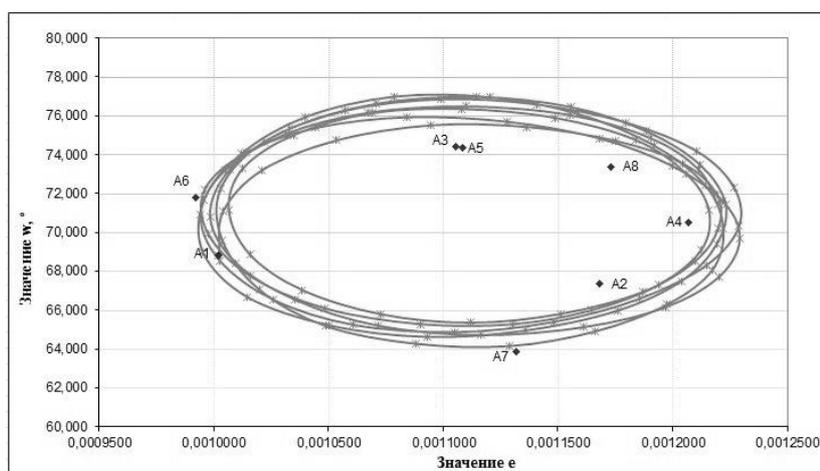


Рис. 1. Изменение параметров  $e$ ,  $w$  на орбите КА с 23.09.2013 года

После коррекции приведения, начиная с 23.09.2013 в точках А1...А8, поведение рассматриваемых элементов орбитального движения изменилось. И самое главное, исчезла вековая составляющая в изменении аргумента перигея.

Если взять значения параметров  $e$  и  $w$  орбиты КА на интервале 3 года после коррекции приведения (см. табл. 1) и прогнозированные значения  $e$  и  $w$ , полученные с учетом влияния Солнца, Луны и сопротивления атмосферы, на том же интервале времени, и поместив эти значения на один график (см. рис. 1), то видно, что значения хорошо согласуются.

Из табл. 1 и рис. 1 видно, что на «замороженной орбите» параметры  $w$  и  $e$  меняются в следующих промежутках

$$\begin{aligned} 60.0^\circ \leq w \leq 80.0^\circ \\ 0,0010 \leq e \leq 0,0013 \end{aligned} \quad (1)$$

Примем неравенства (1) как условие нахождения КА на «замороженной орбите».

Представленная устойчивая «замороженная орбита» может быть использована для решения прикладных задач с использованием геодезических КА или спутников ДЗЗ.

#### Литература

1. Чернявский Г.М., Бартенев В.А. Орбиты спутников связи. М.: Связь, 1978. 240 с.
2. Эльясберг П.Е. Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. 2-е изд.. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. 544 с.
3. Orbital Mechanics, Third Edition. Edited by Vladimir A. Chobotov. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002. P. 259–263.

## МЕГНО-АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВЫСОКИХ ОБЛАСТЕЙ ОКОЛОЗЕМНОГО ОРБИТАЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА

**Д.С. Красавин, И.Н. Чувашов, Т.В. Бордовицына**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: iosfixed@gmail.com

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования динамической структуры высоких областей околоземного орбитального пространства от 120 тыс. км по большой полуоси до 330 тыс. км. Рассматриваемая область касается сферы Хилла для Луны. Выявлены области с хаотическим движением объектов и показано, что хаотичность является следствием гомоклинических и гетероклинических наложений вековых резонансов.

**Ключевые слова:** динамическая структура, околоземное орбитальное пространство, высокие области. резонансные структуры.

## MEGNO-ANALYSIS OF THE DYNAMIC STRUCTURE OF HIGH REGIONS OF NEAR-EARTH ORBITAL SPACE

**D. Krasavin, I. Chuvashov and T. Bordovitsyna**

National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: iosfixed@gmail.com

**Abstract.** The results of the study of the dynamic structure of high regions of near-earth orbital space from 120 thousand km to 330 thousand km along the major semi-axis are presented. This region concerns the Hill sphere for the Moon. Areas with chaotic movement of objects are revealed and it is shown that randomness is a consequence of homoclinic and heteroclinic overlays of secular resonances.

**Keywords:** Near-Earth orbital space, high regions, resonant structures.

Настоящая публикация является продолжением работ [1, 2] по исследованию динамических структур околоземных орбитальных пространств с использованием методик, подробно опубликованных в работах [3, 4]. В статьях [1, 2] приведены результаты по исследованию динамической структуры области МЕО (Medium Earth Orbits). В данной работе представлены результаты анализа динамической структуры высокоорбитальной части околоземного пространства с диапазоном больших полуосей от 1200000 км до 330000 км, то есть рассматривается область, непосредственно примыкающая к сфере Хилла для Луны. Численное моделирование осуществлялось с шагом 200 км по большой полуоси  $5^\circ$  по наклонению. Для всех выбранных таким способом 19416 модельных объектов была построена долговременная орбитальная эволюция с помощью программного комплекса «Численная модель движения систем ИСЗ» на столетнем интервале времени, а также получены оценки параметров MEGNO, позволяющие судить о наличии хаотичности в движении объектов. Для каждой модельной орбиты были построены графики зависимости от времени всех вековых апсидально-нодальных резонансных соотношений и соответствующих им критических аргументов.

На рис. 1 представлены данные о хаотизации объектов, движущихся в рассматриваемой области пространства. Начиная с орбит, имеющих большие полуоси 240000 км, и до конца диапазона движение всех объектов хаотично.

Анализ распространенности вековых резонансов показал, что все апсидально-нодальные резонансы низких порядков, перечисленные в [2], присутствуют в данной области пространства. Их действие распространяется слоями по большой полуоси и наклонению. Причем, чем больше наклоне-

ние, тем больше резонансов действуют на движение объекта одновременно. Среди них встречаются как устойчивые резонансы, так и неустойчивые, у которых критический аргумент неоднократно меняет характер изменения с либрационного на циркуляционный и обратно. Движение таких объектов является нерегулярным, а в динамике имеют место долгопериодические колебания эксцентриситета и наклона с большими амплитудами и стремительная хаотизация.

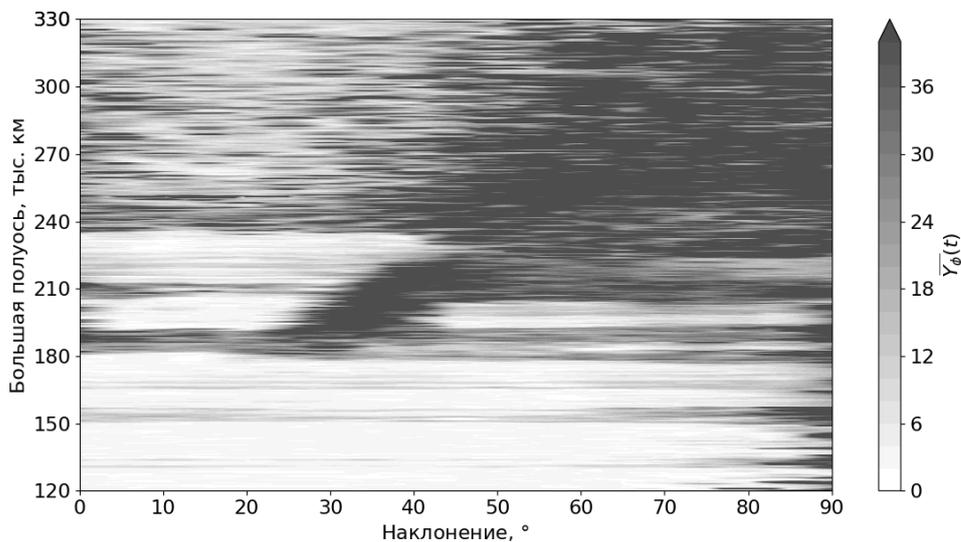


Рис. 1. MEGNO-карта фазовой плоскости  $\{a, i\}$  рассматриваемой области орбитального пространства

Наиболее хаотичными являются приполярные орбиты с наклонами  $80^\circ$  и  $90^\circ$  градусов. Однако сплошная хаотизация движения объектов, начиная с 240000 км по большой полуоси, как нам представляется, связана с регулярными тесными сближениями объектов с Луной. Как показано в работе [5] на примере движения астероидов тесные сближения малых тел с более массивным возмущающим телом, как правило, приводят к хаотизации движения.

### Литература

1. *Bordovitsyna T.V., Tomilova I.V., Chuvashov I.N.* The effect of secular resonances on the long-term orbital evolution of uncontrollable objects on satellite radio navigation systems in the MEO region // *Sol. Syst. Res.* 2012. Vol. 46. Is. 5. P. 329–340.
2. *Томилова И.В., Бордовицына Т.В.* Особенности структуры резонансных возмущений неуправляемых объектов навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Влияние на орбитальную эволюцию // *Изв. вузов. Физика*, 2017. Т. 60. № 4. С. 119–125.
3. *Бордовицына Т.В., Томилова И.В.* Особенности структуры вековых резонансов в динамике околоземных космических объектов // *Изв. вузов. Физика*, 2016. Т. 59. № 3. С. 41–48.

4. *Бордовицына Т.В., Александрова А.Г., Чувашов И.Н.* Комплекс алгоритмов и программ для исследования хаотичности в динамике искусственных спутников Земли // Изв. вузов. Физика. 2010. Т. 53. № 8/2. С. 14–21.

5. *Летнер О.Н.* Оценка времени предсказуемости движения астероидов, сближающихся с Землей // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 6/3. С. 226–228.

## **ХАРАКТЕРИСТИКИ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ФРАГМЕНТОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА ПО ДАННЫМ ОПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ В ИНАСАН В 2016-2017 ГГ.**

**П.А. Левкина**

Институт астрономии Российской академии наук, Россия  
E-mail: ayvazovskaya@inasan.ru

**Аннотация.** В обсерватории на пике Терскол (Россия, Кабардино-Балкария) ведутся регулярные оптические наблюдения космического мусора в геостационарной области с помощью телескопа Zeiss-2000. Телескоп Zeiss-2000 с двухметровой апертурой является крупнейшим инструментом, регулярно используемым для исследований космического мусора вблизи геостационарной орбиты.

Одной из основных задач работ в рамках международной программы «Астрономия в Приэльбрусье» является обнаружение и определение характеристик малоразмерных фрагментов космического мусора, труднодоступных для наблюдений на других телескопах. В фотометрические ночи на Zeiss-2000 обнаруживаются 4–5 ранее не наблюдавшихся фрагментов от 17-й до 21-й звёздной величины. В данной работе приводятся параметры орбит и физические характеристики некоторых малоразмерных фрагментов космического мусора, наблюдавшихся в Терскольской обсерватории в 2016–2017 гг., в том числе объектов с большим отношением площади к массе и либрационных объектов вблизи устойчивой точки  $75^\circ$  в.д.

**Ключевые слова:** космический мусор, оптические наблюдения, большое отношение площади к массе, либрационное движение.

## **CHARACTERISTICS OF SMALL-SIZED SPACE DEBRIS FRAGMENTS USING OPTICAL OBSERVATIONS OF INASAN IN 2016-2017**

**P. Levkina**

Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation  
E-mail: ayvazovskaya@inasan.ru

**Abstract.** The telescope Zeiss-2000 with a two-meter aperture of Terskol observatory is the largest optical instrument regularly used to space debris in the geostationary region investigations.

One of the main purposes in «Astronomy in the Elbrus region» international program's boundaries is the detection and characterization of small fragments of debris, difficult to approach for smaller telescopes. During observations at photometric nights as usually we are

detecting 4-5 unknown fragments 17-21 star magnitude. In this article we present orbital parameters and physical characteristics of several small-sized fragments of the space debris detected in Terskol observatory in 2016-2017, including objects with a high area-to-mass ratio, and librational objects near the stable point  $75^\circ\text{E}$ .

**Keywords:** space debris, optical observations, area-to-mass ratio, librational motion.

В 2016–2017 гг. на комплексе телескопа Zeiss-2000 обсерватории на пи-ке Терскол было проведено семь наблюдательных сеансов. Были получены наблюдения искусственных объектов техногенного происхождения на геосинхронной орбите. Возможности телескопа с двухметровой апертурой позволяют обнаруживать и сопровождать объекты размерами в 10 см и менее в геостационарной области. Zeiss-2000 является крупнейшим инструментом, регулярно используемым для исследований космического мусора на высоких орбитах.

Основные характеристики CCD-камеры на Zeiss-2000: апертура – 2 м, фокальное расстояние – 16 м, порог обнаружения на ГСО – 22-я звёздная величина.

В рамках исследования околоземного космического пространства на комплексе телескопа Zeiss-2000 решаются следующие задачи: обнаружение и определение характеристик малоразмерных высокоорбитальных фрагментов космического мусора, труднодоступных телескопам с меньшей апертурой; исследование орбитальных и физических свойств космических объектов, движущихся в гравитационном поле Земли; уточнение моделей движения космических объектов и космического мусора.

В фотометрические ночи на Zeiss-2000 обнаруживаются 4–5 ранее не наблюдавшихся фрагментов от 17-й до 21-й звёздной величины. Объекты, обнаруженные в ходе наблюдений в 2016–2017 гг., имеют большие амплитуды изменения блеска. Практически для всех новых объектов характерно большое численное значение отношения площади миделева сечения к массе (больше  $0.005 \text{ м}^2/\text{кг}$ ). В числе обнаруженных как минимум один объект является последствием запуска разгонного блока «Фрегат».

Космические аппараты на геосинхронных орбитах Земли испытывают на себе сложный комплекс возмущений, влекущих за собой изменение орбитальных параметров. Теория движения для крупных объектов хорошо разработана, и их движение хорошо прогнозируется. Озабоченность вызывают малоразмерные фрагменты космического мусора. Они, в отличие от крупных объектов, подвержены трудно прогнозируемым не гравитационным возмущениям, которые плохо изучены. Нами по шестилетним оптическим наблюдениям выявлена переменность отношения средней площади миделева сечения к массе объекта ( $A/m$ ) малоразмерного фрагмента космического мусора и разработана модель вариаций этого параметра. Знание таких особенностей параметров движения позволяет в несколько раз улучшить точность прогноза орбит космического мусора. Для разработки таких моделей движения требуются длительные однородные наблюдения.

В докладе представлены примеры исследования движения геосинхронных объектов вблизи точки  $75^\circ$  в.д. и опасных малоразмерных фрагментов космического мусора по данным регулярных наблюдений в обсерватории на пике Терскол.

## **ВЫЯВЛЕНИЕ ВЕКОВЫХ РЕЗОНАНСОВ В ДИНАМИКЕ НУМЕРОВАННЫХ АСТЕРОИДОВ, ТЕСНО СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ**

**О.Н. Летнер, Т.Ю. Галушина**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: oksana.letner@gmail.com

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования динамики нумерованных АСЗ (астероидов, сближающихся с Землей), проходящих через сферу тяготения Земли (256000 км от геоцентра) в ближайшие 200 лет. Основной целью данной работы было выявление вековых резонансов и изучение взаимного влияния резонансных соотношений и тесных сближений. Для достижения поставленной цели для исследуемых АСЗ численно была построена орбитальная эволюция на интервале времени 400 лет, и выявлены все сближения астероидов с большими планетами. Так как к проявлению хаотичности в движении АСЗ могут привести не только тесные и/или многократные сближения с планетами, но и наличие хотя бы одного неустойчивого резонанса, мы проследили их вековую резонансную динамику. Оценка хаотичности орбит АСЗ проводилась путем анализа поведения усредненного параметра MEGNO (Mean Exponential Growth factor of Nearby Orbits). Оказалось, что все вековые резонансы для этих АСЗ являются устойчивыми, а к проявлению хаотичности в движении астероидов приводят их тесные и/или многократные сближения с большими планетами.

**Ключевые слова:** динамика астероидов, вековые резонансы, оценка хаотичности.

## **IDENTIFICATION OF SECULAR RESONANCES IN THE DYNAMICS OF NUMBERED ASTEROIDS CLOSELY APPROACHING WITH THE EARTH**

**O.I. Letner and T. Galushina**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: oksana.letner@gmail.com

**Abstract:** The paper presents the research results of the dynamics of numbered NEAs (Near-Earth asteroids) passing through the Earth's gravity sphere (256,000 km from the geocenter) in the next 200 years. The main purpose of this paper is to identify the secular resonances and to study the mutual influence of resonant relations and close approaches. To achieve this purpose the NEAs orbital evolution over a time interval of 400 years was numerically constructed and all approaches of asteroids to large planets were identified. Since not only close and/or multiple approaches to the planets but also at least one unstable

resonance can lead to the manifestation of chaoticity in the NEAs' motion, we traced their secular resonant dynamics. The evaluation of chaoticity of the NEAs' orbits was estimated by analyzing the behavior of the averaged parameter MEGNO (Mean Exponential Growth Factor of Orbits). It turned out that all the secular resonances for these NEAs are stable, and close and/or multiple approaches to the major planets lead to the chaoticity manifestation in the asteroid motion.

**Keywords:** asteroid dynamics, secular resonances, chaoticity evaluation.

Данная работа посвящена исследованию динамики нумерованных АСЗ (астероидов, сближающихся с Землей), проходящих через сферу тяготения Земли (256000 км от геоцентра) в ближайшие 200 лет. А именно, выявлению в их движении резонансов, обусловленных соотношениями между скоростями прецессий орбит астероида и планеты (так называемых, вековых резонансов). Эта задача является актуальной при исследовании динамики АСЗ, так как к проявлению хаотичности в движении АСЗ могут привести не только тесные и/или многократные сближения с планетами, но и наличие хотя бы одного неустойчивого резонанса.

На этапе выявления нумерованных астероидов нами были численно проинтегрированы уравнения движения всех АСЗ, известных на февраль 2017 года с начальными данными из каталога Е. Боуэлла [1]. В модель сил были включены возмущения от всех больших планет, Плутона, Луны, Цереры, Паллады, Весты и сжатия Земли. Численные исследования выполнялись с помощью программного комплекса ИДА, разработанного сотрудниками НИИ ПММ ТГУ, в том числе авторами данной работы [2].

Проведенное исследование позволило выявить четыре нумерованных астероида (99942 Apophis, 153201 2000 WO107, 153814 2001 WN5, 456938 2007 YV56), имеющих тесные сближения с Землей на расстояние меньше 256000 км от геоцентра. В табл. 1 приведены данные о прохождении исследуемых астероидов через сферу тяготения Земли. Здесь  $T$  – календарная дата,  $d$  – расстояние до геоцентра.

Таблица 1. Данные о прохождении АСЗ через сферу тяготения Земли

АСЗ	$T$	$d$ , км
99942 Apophis	13.04.2029	38120.3
153201 2000 WO107	01.12.2140	243182.1
153814 2001 WN5	26.06.2028	248897.6
456938 2007 YV56	02.01.2101	237199.2

Для АСЗ из табл. 1 была построена орбитальная эволюция на интервале времени около 400 лет, выявлены все сближения астероидов с планетами и вековые резонансы с планетами внутренней группы, а также получены оценки хаотичности их орбит с помощью усредненного параметра MEGNO (Mean Exponential Growth factor of Nearby Orbits) [3]. В качестве характеристик векового резонанса были рассмотрены резонансный аргумент и его первая про-

изводная по времени (так называемое резонансное соотношение). Для каждого астероида был рассмотрен весь спектр апсидально-нодальных резонансов до 2-го порядка включительно.

Проведенное исследование показало, что нумерованные астероиды 99942 Aopphis, 153201 2000 WO107, 153814 2001 WN5, 456938 2007 YV56 не только проходят через сферу тяготения Земли в ближайшие 200 лет, но и имеют тесные и/или многократные сближения с большими планетами. Результат оценки хаотичности орбит АСЗ с помощью параметра MEGNO показал, что такие сближения астероидов с планетами земной группы приводят к проявлению хаотичности в движении АСЗ.

Для всех АСЗ наблюдается схожая картина с точки зрения наличия вековых резонансов с планетами внутренней группы. Резонансные аргументы для всех соотношений либрируют на рассматриваемом интервале времени, что позволяет сделать вывод об устойчивости вековых резонансов. Прохождение АСЗ через сферу тяготения Земли приводит к скачкообразному изменению центров либрации некоторых резонансных соотношений и почти всех критических аргументов, при этом устойчивость резонансов сохраняется.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-02-02868.

#### Литература

1. *Bowell E., Muinonen K., Wasserman L.H.* A public-domain asteroid data base. In *Asteroids, Comets, Meteors*, Kluwer, Dordrecht, Netherlands. 1994. P. 477–481.
2. *Быкова Л.Е., Галушина Т.Ю., Батулин А.П.* Прикладной программный комплекс «ИДА» для исследования динамики астероидов // *Изв. вузов. Физика*. 2012. № 10/2. С. 89–96.
3. *Cincotta P.M., Girdano C.M., and Simo C.*, 2003. Phase space structure of multi-dimensional systems by means of the mean exponential growth factor of nearby orbits, *Physica D: Nonlinear Phenomena* 182(3–4), 151–178.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕЛА СЛОЖНОЙ ФОРМЫ ПРИ ОБТЕКАНИИ СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ

**В.В. Мацкевич, В.В. Фарапонов, Е.А. Маслов, А.В. Чупашев**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: akinfeev1402@mail.ru

**Аннотация.** Основным параметром, определяющим изменение скорости движения тела, является коэффициент силы лобового сопротивления. Для его нахождения эксперименты проводились на аэродинамической установке. Достоверность экспериментальных данных может быть обоснована правильностью работы регистрирующей аппаратуры и сравнением измеренных данных с работами других авторов.

Для оперативного контроля работы датчиков давления спроектирован и реализован стенд. Проведена тарировка датчиков давления, получены результаты регрессионных

зависимостей для блока с пятью тензомодулями абсолютного давления ТДМ2-А и датчика давления в форкамере ДМ 5007 А-ДИ У2. Получены результаты регрессионной зависимости для тензометрических весов.

Исследовалось сверхзвуковое обтекание модели в виде конуса, с параллельным применением визуализации процесса. Представлены результаты экспериментального определения коэффициента силы лобового сопротивления этой модели, в диапазоне чисел  $M = (2...5)$ . Данные результаты хорошо согласуются с результатами других авторов.

Определён коэффициент сопротивления для тела сложной формы, при числе  $M=5$ . Для использования стандартной зависимости необходимо учитывать соответствующий коэффициент формы.

**Ключевые слова:** аэродинамическая установка, сверхзвуковой поток, коэффициент силы лобового сопротивления.

## EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE DRAG COEFFICIENT OF A COMPLEX-SHAPED BODY IN SUPERSONIC FLOW

V. Matskevich, V. Faraponov, E. Maslov and A. Chupashev

National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: akinfeev1402@mail.ru

**Abstract.** The main parameter that determines the change in the speed of movement of the body is the drag coefficient. To find it, the experiments were carried out on an aerodynamic installation. The reliability of the experimental data can be justified by the correct operation of the recording equipment and by comparing the measured data with the work of other authors.

For the operational control of the pressure sensors, a stand was designed and implemented. The pressure sensors were calibrated, the results of regression relationships were obtained for the block with five strain gauge modules of absolute pressure TDM2-A and a pressure sensor in the stagnation chamber DM 5007A-DIU2. And also the results of regression relationship for strain gauge balance are obtained.

Supersonic flow around the model in the form of a cone was studied, with parallel application of the process visualization. The results of the experimental determination of the drag coefficient of this model are presented in the range of numbers  $M = (2...5)$ . These results are in good agreement with the results of other authors.

The drag coefficient for a complex-shape body is determined, for a number  $M=5$ . To use the standard dependency, the corresponding form factor must be taken into account.

**Keywords:** aerodynamic installation, supersonic flow, drag coefficient.

Для создания новых сверхзвуковых летательных аппаратов необходимо глубокое знание процессов, имеющих место при обтекании их в натуральных условиях. Путь к этим знаниям идёт через создание аэродинамических труб, в которых возможно воспроизведение условий, адекватных натурным. Одной из важнейших является задача определения основных характеристик процесса, к числу которых относится коэффициент сопротивления тела сложной формы при обтекании сверхзвуковым потоком. Определение значений коэффициента сопротивления в диапазоне чисел Маха об-

текающего потока  $M \gg 1$  в условиях натуральных испытаний двигательных установок связано с большими материальными затратами. Более целесообразно для получения объективной экспериментальной информации проводить исследования на модельных двигательных установках. Различают баллистический и аэродинамический методы аэрофизического эксперимента. Аэродинамический метод более прост и доступен в реализации.

Цель работы – экспериментальное определение коэффициента сопротивления тела аэродинамическим методом.

Эксперименты по определению коэффициента сопротивления тела сложной формы при обтекании сверхзвуковым потоком проводились на аэродинамической установке. Для создания сверхзвукового потока в аэродинамической установке использовались стальные осесимметричные профилированные сопла с диаметром выходного сечения 100 мм.

Для измерения давления используется блок с пятью тензомодулями абсолютного давления ТДМ2-А и датчик давления в форкамере ДМ 5007 А-ДИ У2. В процессе проведения испытаний на аэродинамической установке датчики давления подвергаются кратковременным импульсным воздействиям. Это приводит к механическим деформациям датчиков и, следовательно, может приводить к недопустимым погрешностям измерений. В связи с этим возникает необходимость градуировки датчиков перед каждой серией опытов. Для обеспечения необходимой точности измерений был разработан и смонтирован градуировочный стенд.

Для измерения аэродинамических сил (продольной силы  $X$ , подъемной силы  $Y$  и момента тангажа  $M_z$ ) установка оснащена аэродинамическими весами. Данные весы представляют собой конструкцию, основой которой, является тензометрический динамометрический блок, оборудованный чувствительными тензоэлементами. Работоспособность тензометрических весов также подтверждена их градуировкой. Основная погрешность весов не превышает 2%.

Исследовалось сверхзвуковое обтекание модели в виде острого конуса с половинным углом при вершине равным  $15^\circ$ , с параллельным применением визуализации процесса, которая помогает найти правильный интервал для определения коэффициента лобового сопротивления. Угол атаки набегающего потока равен  $\alpha=0^\circ$ . Методом физического моделирования получен коэффициент сопротивления конуса в диапазоне чисел Маха (2÷5). Задача о сверхзвуковом обтекании заострённого конуса занимает особое место в аэродинамике тел вращения.

После получения достоверных результатов при исследовании модели в виде конуса, были проведены эксперименты для тела сложной формы. Для числа Маха равного 5, получено значение коэффициента сопротивления 0.355. Полученное значение коэффициента сопротивления лежит выше зависимости закона 1958 года. Для использования стандартной зависимости необходимо учитывать соответствующий коэффициент формы.

В ходе работы был спроектирован и реализован стенд для контроля работы используемых датчиков давления, с помощью которого были получены результаты регрессионных зависимостей для блока с пятью тензодулями абсолютного давления ТДМ2-А и датчика давления в форкамере ДМ 5007 А-ДИ У2. Получены результаты регрессионной зависимости для тензометрических весов. Результаты определения коэффициента лобового сопротивления модели в виде конуса, с параллельным применением визуализации процесса обтекания, показали хорошее согласование с результатами других авторов. Определён коэффициент сопротивления модели сложной формы, при  $M=5$ .

## **БАЛЛИСТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ УСКОРЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ТЕЛ ДО ТРАНСЗВУКОВЫХ И СВЕРХЗВУКОВЫХ СКОРОСТЕЙ**

**А.Ю. Мельников, В.И. Звегинцев**

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
Сибирского отделения Российской академии наук, Россия  
E-mail: akcil@mail.ru

**Аннотация.** Работа направлена на разработку конструкции одноступенчатой легкогазовой баллистической установки, предназначенной для разгона тел. Создана одномерная квазистационарная теоретическая модель расчета скорости ускоряемого тела, позволяющая проводить простые инженерные расчеты. Проведены экспериментальные исследования по метанию снарядов весом до 120 г. Получено хорошее согласование экспериментальных данных и аналитических расчетов. Предложен путь увеличения скорости метания - за счет использования, в качестве толкающего газа, гелия.

**Ключевые слова:** легкогазовая баллистическая установка, ускорение тела, сверхзвуковая скорость.

## **BALLISTIC FACILITY FOR ACCELERATING HEAVY BODIES TO TRANSONIC AND SUPERSONIC SPEEDS**

**A. Melnikov and V. Zvegintsev**

Institute of Theoretical and Applied Mechanics S.A. Khristianovich of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation  
E-mail: akcil@mail.ru

**Abstract.** The work is aimed at developing the design of a single-stage light-gas ballistic gun designed to accelerate bodies weighing up to 1 kg and speeds of. A one-dimensional quasi-stationary theoretical model of calculating the velocity of an accelerated body has been created, which makes it possible to carry out simple engineering calculations. Experimental research was conducted on throwing shells weighing up to 120 g. Good agreement between experimental data and analytical calculations was obtained. A way to increase the throwing speed is suggested, due to the use of helium as a pushing gas.

**Keywords:** light-gas ballistic gun, acceleration of the body, supersonic speed.

Развитие аэрокосмической и ракетной отраслей связано с увеличением скоростей полета и требует изучения быстропротекающих процессов, таких как взаимодействие движущегося тела с преградой, а также изучение свободнолетающих тел при скоростях порядка нескольких километров и даже десятков километров в секунду [1]. К таким направлениям исследований относятся, например, движение космических аппаратов в различных газовых средах, взаимодействие космических аппаратов с метеорными телами и т.п. Для исследования подобных процессов широко применяются баллистические установки. Разнообразие областей применения и большая распространенность метательных систем делает актуальным направление повышения эффективности такого рода установок [2].

Существующие методы ускорения тел от дозвуковых до гиперзвуковых скоростей достаточно разнообразны, как по принципу работы, так и по массам ускоряемых тел. Однако, применение взрывчатых веществ (ВВ) накладывает ограничения по безопасности таких систем и необходимости лицензирования. В большинстве же применяемых легкогазовых баллистических установках, массы метаемых снарядов не превышает десятка грамм [3]. В связи с такими обстоятельствами актуализируется задача – создание баллистической установки для метания тяжелых тел с большими скоростями, без использования ВВ, используя лишь энергию сжатого газа. Данный подход позволяет использовать установку в лабораторных условиях.

#### **Легкогазовая установка**

В простейшем случае одноступенчатая легкогазовая баллистическая установка представляет собой, с заглушенным одним концом, канал, в котором метаемый снаряд разгоняется за счет давления толкающего газа.

Была разработана и изготовлена одноступенчатая легкогазовая установка, основанная на конструкции газовой пушки. Особенность предложенной конструкции заключается в использовании ствола большого удлинения (до  $L/D=500$ ), что позволяет ускорить достаточно тяжелые тела, с точки зрения легкогазовых установок.

Установка состоит из ресивера, в который подается сжатый газ. Поддон с метаемым телом устанавливается в баллистический ствол и закрепляется при помощи специального удерживающего устройства. Удерживающий механизм представляет собой отрезок трубы, имеющий пазы для подвижных кулачков, в которые упирается поддон с метаемым телом, установленных между специальными поворотными фланцами. Баллистический ствол выполнен из хонингованной трубы внутренним диаметром 0.05 м ( $Ra=0.3$ ) и длиной 5 м. На конце ствола устанавливается специальный отсекающий механизм, на котором сделаны продольные пазы для отведения струи газа и установлен фланец с выходным диаметром 25 мм, позволяющий пропускать только метаемое тело. За отсекающим механизмом устанавливается рамочный хронограф, дающий возможность регистрировать скорости метаемого тела с разрешением до 3000 м/с и погрешностью до 1 м/с. Поддон выполнен в виде ци-

линдра на конце которого, установлена резиновая манжета, осуществляющая герметизацию ствола. В поддоне установлен метаемый металлический снаряд.

### Аналитический расчет

Для оценки создаваемых скоростей была создана одномерная квазистационарная теоретическая модель расчета. Модель расчета основана на газодинамических соотношениях и решается задача истечения газа из ресивера через отверстие заданного диаметра. Считается, что усилие давления передается ускоряемому телу без потерь и движение по стволу осуществляется некоторое время, зависящее от длины ствола.

Одним из путей увеличения скорости метания [4] является использование легкого газа (гелий) в качестве толкающего газа. Данный подход был реализован в аналитической модели и показал, что при длине ствола 25 м, аналогичных параметрах ускоряемого тела (как и в случае с воздухом) и объемах ресивера, получаемые скорости метания будут достигать 1300 м/с.

### Сравнение теоретических и экспериментальных данных

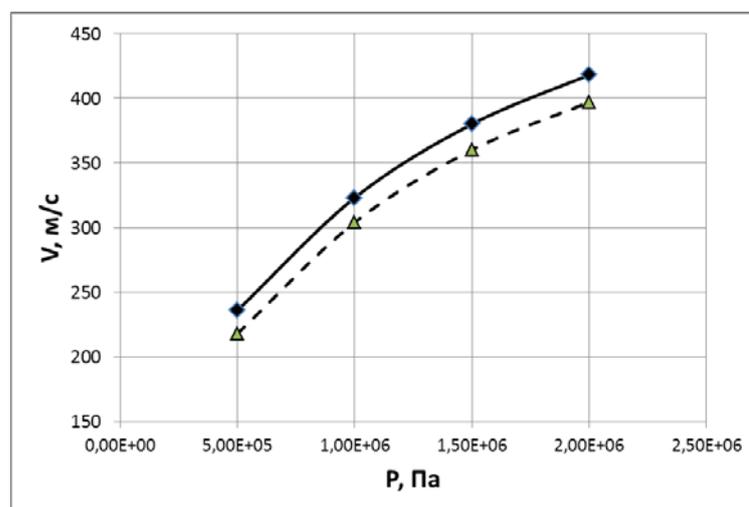


Рис. 1. Зависимость скорости полета снаряда от давления в ресивере

Полученные экспериментальные данные скорости метаемого тела при различных начальных давления в ресивере, дали возможность провести зависимость между давлением и получаемой скоростью полета тела. Во всех экспериментах масса тела варьировалась от 105 до 120 г. На рис. 1 показана зависимость скорости полета тела от давления в ресивере. Сплошной линией показано распределение скорости при аналитическом решении. Пунктирной линией показано распределение экспериментально полученных скоростей.

Из графика видно, что при давлении в ресивере 0.5 МПа скорость составила 218 м/с, а при давлении 2 МПа – 397 м/с. Аналитический расчет показал скорости 236 м/с и 418 м/с соответственно. Результаты, полученные аналитическим методом, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Зна-

чения, полученные в аналитическом расчете, показали большую величину, так как в аналитическом расчете отсутствует учет сил трения.

### **Заключение**

Предложена конструкция одноступенчатой легкогазовой баллистической установки, позволяющей ускорять тела массой не более 1 кг до скоростей 1200 м/с. Изготовлен макетный образец установки и проведены отладочные испытания. Отсутствие необходимости использования взрывчатых веществ позволяет использовать установку в лабораторных условиях.

Создана одномерная квазистационарная теоретическая модель расчета скорости ускоряемого тела, позволяющая проводить простые инженерные расчеты. Проведены экспериментальные исследования по метанию снарядов весом до 120 г. Получено хорошее согласование экспериментальных данных и аналитических расчетов. Предложен путь увеличения скорости метания – за счет использования, в качестве толкающего газа, гелия.

### **Литература**

1. *Теоретические* и экспериментальные исследования гиперзвуковых течений при обтекании тел и в следах: сб. статей / под ред. Г.Г. Черного, С.Ю. Чернявского. М.: Изд-во МГУ, 1978.

2. *Златин Н.А., Красильщиков А.П., Мишин Г.И., Попов Н.Н.* Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. М.: Наука, 1974. 344 с.

3. *Голубятников А.Н., Леонтьев Н.Е., Пилюгин Н.Н.* Методы повышения эффективности легкогазовых баллистических установок / *Успехи механики*. 2003. Т. 2, №2. С. 97–125.

4. *Пилюгин Н.Н., Леонтьев Н.Е.* Возможности повышения скорости метания тел в баллистических установках. М.: Институт механики МГУ, 1999, препринт, № 52–99. 58 с.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ УСТРОЙСТВА СИНХРОНИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ РАМОК (ЭМИР) В КАНАЛЕ УСКОРИТЕЛЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

**А.А. Механич**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия

E-mail: [kireeva\\_aa@mail.ru](mailto:kireeva_aa@mail.ru)

**Аннотация.** Устройства синхронизации и управления являются необходимым элементом высокоскоростных ускорителей твердых тел с комбинированными способами их разгона, например [1, 2]. В работе представлены результаты математического моделирования процесса синхронизации выстрела в рельсовом ускорителе с электромеханическим устройством начального ускорения сборки нескольких последовательно метаемых тел.

**Ключевые слова:** метаемое тело, измерительная рамка, момент пролета, формирование управляющего сигнала.

# THE MODELLING OF FUNCTIONING SYNCHRONIZATION DEVICES BASED ON THE ELECTROMAGNETIC MEASUREMENT FRAME (EMMF) IN THE CHANNEL OF THE ACCELERATOR OF SOLID BODIES

**A. Mekhanich**

National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: [kireeva\\_aa@mail.ru](mailto:kireeva_aa@mail.ru)

**Abstract.** The devices of synchronization and control are a necessary element of high speed accelerators of solid bodies with combined methods of their acceleration, for example [1, 2]. The paper presents the results of mathematical modeling of synchronization process of the shooting in the rail accelerator with an electromechanical device of initial acceleration of assemblies of several consistently throwing bodies.

**Keywords:** throwing body, measuring frame, the moment of flight, generation of a control signal.

Устройство синхронизации состоит из двух однорамочных индукционных датчиков мгновенной скорости внутри канала баллистической уста-

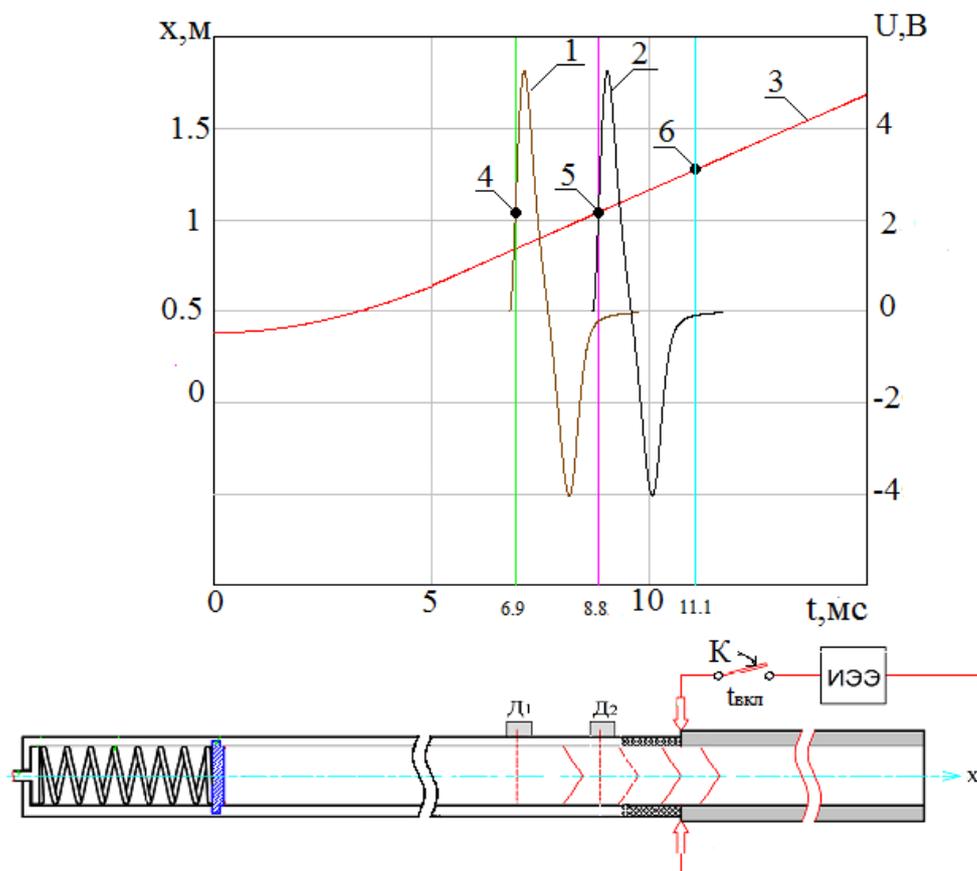


Рис. 1 Динамика процесса синхронизации:

1 – сигнал первого датчика; 2 – сигнал второго датчика; 3 – движение метаемого тела;  
4 – время срабатывания первого датчика  $Д_1$ ; 5 – время срабатывания второго датчика  $Д_2$

новки. Такой датчик может применяться в качестве синхронизирующего устройства повышенной точности для управления различными блоками дополнительного внутриканального и внеканального ускорения модели. Основным элементом датчика является электромагнитная измерительная рамка «ЭМИР» [3]. При прохождении метаемого тела через такой датчик по заданному уровню индуцируемого в датчике напряжения фиксируется время пролета. По средней скорости модели между измерительными рамками рассчитывается время подачи синхронизирующего импульса, обеспечивающего включение следующей ступени разгона модели при ее прохождении заданного сечения разгонного канала. В качестве примера работы данного устройства синхронизации рассматривается рельсовый ускоритель с подачей сборки последовательно ускоряемых тел (стек) с помощью электромеханического пружинного устройства [4]. Это устройство разгоняет стек до необходимой скорости. Перед входом в рельсовый ускоритель сборка движется по инерции с постоянной скоростью.

На рис. 1 приведены результаты расчета работы устройства синхронизации в рассматриваемом ускорителе. Измерительные рамки находятся в режиме постоянной готовности и начинают генерировать сигнал при вхождении маркера стека в зону чувствительности датчика, размер которой зависит от параметров рамки и маркера, а также от скорости движения стека. По сигналу с первого датчика (кривая 1) определяется момент пролета  $t_4$  стеклом данного измерительного сечения канала. Значение  $t_4$  определяется по заранее заданному уровню сигнала с измерительной рамки (в расчете он равен 2 В). В этот момент запускается таймер, а по сигналу со второго датчика  $t_5$  (кривая 2) определяется средняя скорость движения стека между рамками по известному расстоянию между ними  $l_{12}$ . Это значение используется для определения времени срабатывания  $t_6$  ключа К, подключающего к рельсовому ускорителю источник электрической энергии (ИЭЭ)  $t_6 = t_5 + (t_5 - t_4) \cdot (x_0 - x(\text{Д}2)) / l_{12} - \Delta t$ , где  $x_0$  – заданное положение стека в момент включения электрической цепи,  $x(\text{Д}2)$  – положение второго датчика, а  $\Delta t$  – время срабатывания ключа. В расчетах использованы параметры датчиков из [1]. Скорость движения стека – 105 м/с.

Таким образом, моделируемое устройство синхронизации на основе электромагнитных измерительных рамок может применяться для управления различными блоками дополнительного внутриканального и внеканального ускорения модели, а также для запуска измерительной аппаратуры быстропротекающих процессов.

### Литература

1. Жаровцев В.В., Синяев С.В. Математическая модель выстрела из легкогазовой системы с электродинамически ускоряемым поршнем // Современные методы проекти-

рования и обработка ракетно – артиллерийского вооружения. Саров ВНИИ ЭФ, 2000. С. 117–121.

2. *Биматов В.И., Жалнин Е.В, Христенко Ю.Ф.* Многоступенчатые легкогазовые установки на альтернативных источниках энергии // *Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики*. НИИ прикладной математики и механики ТГУ, 2011, С. 134–135.

3. *Синяев С.В., Киреева А.А.* Однорамочный индукционный датчик мгновенной скорости модели в канале баллистической установки // *Изв. вузов. Физика*. Т. 56, № 6/3. 2013. С. 69–71.

4. *Механич А.А., Синяев С.В.* Электромеханическое устройство предварительного разгона сборки последовательно метаемых тел (стека) для рельсового скорострельного ускорителя (настоящий сборник докладов).

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СТУПЕНИ СЖАТИЯ ЛЕГКОГО ГАЗА

**О.Н. Морозова, С.В. Синяев**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия

E-mail: morozova\_olga15@mail.ru

**Аннотация.** Предложено электромеханическое устройство сжатия легкого газа, которое может быть использовано в легкогазовой баллистической установке (ЛГУ). В рассматриваемом устройстве энергия пороховых газов в ступени разгона поршня заменяется на энергию первоначально упруго сжатой пружины, разгоняющей поршень при растяжении ее витков. Для эффективного ускорения поршня энергия сжатой пружины дополняется электрической энергией конденсаторной батареи, за счет которой электромагнитная сила дополнительно растягивает витки бифилярной пружины, передний торец которой сжимает легкий газ. Методами математического моделирования проведены параметрические исследования режимов работы модельной ЛГУ с электромеханической ступенью сжатия легкого газа. Показаны преимущества использования электромагнитной силы на стадии форсирования поршня и в процессе ускорения модели.

**Ключевые слова:** пружина, электромагнитное сжатие, легкий газ, параметрический анализ.

## MATHEMATICAL MODELING OF WORK AN ELECTROMECHANICAL STAGE COMPRESSING A LIGHT GAS

**O. Morozova and S. Sinyayev**

National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: morozova\_olga15@mail.ru

**Abstract.** Electromechanical device for a first stage in a light-gas gun is proposed. In the considered system energy of powder gases in a stage of acceleration of the piston is replaced

of energy of compressed the spring, accelerating the piston at a stretching of its spring coil. It is proposed to use an electromagnetic force that will additionally stretch the coils of the spring, the front end, which compresses the light gas. For this, a bifilar spring is used which have multi directional currents in the neighboring coils of the spring. Electric current through the coils of the spring is generated when the capacitor bank is discharged.

The results of parametric analyses behavior of a model in two-stage light-gas gun with electromechanical compression of light gas are presented. The advantages of using the electromagnetic force at the stage of forcing the piston and in the process of accelerating the model are shown.

**Keywords:** spring, electromagnetic compression, light gas, parametric analysis.

Применение пороховой ступени в легкогазовых баллистических установках (ЛГУ) ограничено необходимостью обеспечения специальных условий хранения порохов с соответствующим лицензированием. Известны альтернативные схемы первой ступени ЛГУ, в которых не используются пороховые заряды [1, 2].

В работе предлагается заменить энергию пороховых газов в ступени разгона поршня на энергию сжатой пружины, дополнив ее электрической энергией конденсаторной батареи. Электродинамическое растяжение витков осуществляется в так называемых бифилярных пружинах с противоположно направленными токами в соседних витках. Общая схема двухступенчатой ЛГУ с электродинамической ступенью сжатия легкого газа приведена на рис. 1.

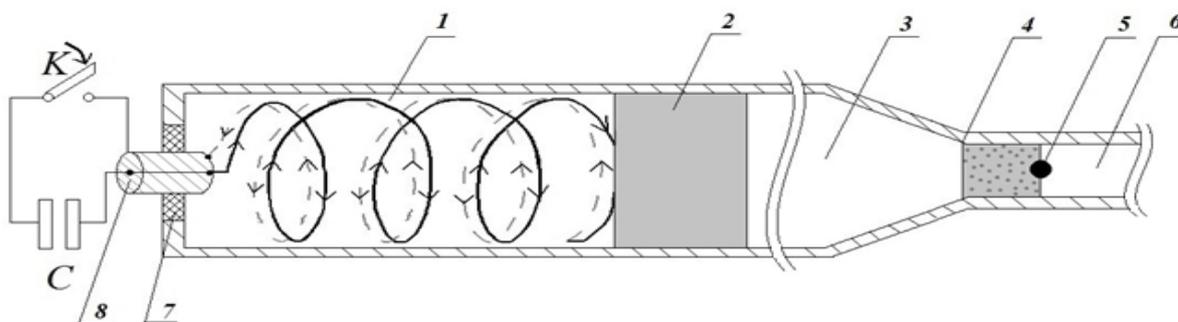


Рис. 1. ЛГУ с электродинамической ступенью сжатия легкого газа:  
*K* – ключ; *1* – пружина; *2* – поршень; *3* – камера сжатия легкого газа; *4* – диафрагма;  
*5* – модель; *6* – пусковая труба; *7* – изолятор; *8* – коаксиальный токоввод к пружине

Математическая модель работы установки построена при следующих предположениях: электромагнитное взаимодействие осуществляется только между соседними витками пружины с противоположно направленными токами; растяжение пружины происходит равномерно; процесс сжатия легкого газа является изоэнтропическим, его плотность зависит только от времени. Моделируются следующие стадии процесса: разряд конденсаторной батареи через пружину до момента форсирования поршня  $t_f$ ; сжатие легкого газа поршнем до момента форсирования модели  $t_{fm}$ ; разгон модели. На рис. 2 построены графики скоростей модели с учетом электромаг-

нитной силы и при чисто «пружинном» варианте ступени сжатия легкого газа при следующих основных параметрах ЛГУ: количество витков в пружине – 20, масса пружины – 1 кг, ее длина в ненагруженном состоянии – 950 мм, длина камеры сжатия легкого газа (водорода) – 1000 мм, ее диаметр – 50 мм, масса поршня – 50 г, начальное давление – 50 бар, емкость конденсаторной батареи – 40 мФ, начальное напряжение на конденсаторной батарее – 5 кВ, диаметр канала – 16 мм, масса модели – 10 г.

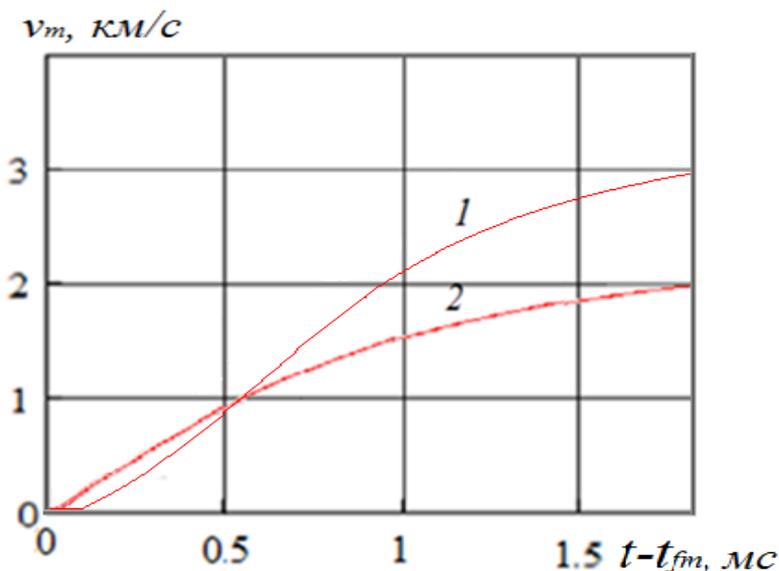


Рис. 2. Скорости модели:  
1 – электромеханическая ступень; 2 – «пружинная»

Ускорение модели с помощью электромагнитного воздействия обеспечивает форсирование поршня, кинетическая энергия модели увеличивается более чем в 2 раза. Расчеты показывают, что электромеханическая ступень сжатия при необходимости может заменить пороховую ступень в ЛГУ.

### Литература

1. Жаровцев В.В. Математическая модель выстрела из легкогазовой системы с электродинамически ускоряемым поршнем / В.В. Жаровцев, С.В. Синяев // Современные методы проектирования и отработка ракетно-артиллерийского вооружения. Саров: ВНИИ ЭФ, 2000. С. 117–121.
2. Биматов В.И. Многоступенчатые легкогазовые установки на альтернативных источниках энергии / В.И. Биматов, Е.В. Жалнин, Ю.Ф. Христенко // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики. НИИ прикладной математики и механики ТГУ, 2011. С. 134–135.

# РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИИ АКТИВНО-РЕАКТИВНОГО СНАРЯДА ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ФОРМЫ НА ВСЕМ УЧАСТКЕ ПОЛЕТА

**М.Д. Орешина**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: gogomopi@gmail.com

**Аннотация.** Статья посвящена расчету параметров траектории активно-реактивного снаряда осесимметричной формы на всем участке полета, который вносит развитие в проекты баллистических расчетов. Была разработана программа, производящая расчет траектории активно-реактивного снаряда осесимметричной формы. В данной программе используются стандартные законы изменения аэродинамических характеристик при расчете движения активно-реактивного снаряда.

**Ключевые слова:** активно-реактивный снаряд, расчет параметров траектории.

## THE CALCULATION OF THE TRAJECTORY PARAMETERS OF THE ACTIVE-REACTIVE SHELL AXISYMMETRIC SHAPE FOR ALL PHASE OF FLIGHT

**M. Oreshina**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: gogomopi@gmail.com

**Abstract.** The article is devoted to the calculation of the trajectory parameters of the active-reactive shell of the axisymmetric form on the flight phase, which makes the development of projects of ballistic calculations. Program was developed, which produces the calculation of the trajectory of the active-reactive shell axisymmetric shape. This program uses the standard laws of change of the aerodynamic characteristics in the calculation of the movement of the active-reactive shell.

**Keywords:** active-reactive shell, calculation of the trajectory parameters.

Разработана программа, позволяющая произвести расчеты траектории активно-реактивного снаряда, в среде программирования Delphi7. Осуществляет расчет АРСа с несколькими активными частями. Для расчета траектории используются стандартные законы изменения характеристик.

Данная программа с заданной точностью может рассчитать параметры траектории осесимметричного активно-реактивного снаряда. Для описания траектории используется упрощенная математическая модель, описанная Р.Е. Соркиным. Модель построена на основе введения комплексных углов атаки и угловой скорости. Данная система уравнений позволяет производить расчет параметров траектории активно-реактивного неуправляемого снаряда с оперением и без оперения соответственно.

Поставленная задача была решена в среде программирования Borland Delphi 7. Это среда разработки разнообразных программных приложений, которая одновременно является компилятором и редактором. В поставленной программе была учтена важнейшая деталь-интерфейс программы, а именно удобство и легкость в управлении.

Для вычисления параметров траекторий АРСа в математической модели используются: стандартная атмосфера, стандартный закон сопротивления 1943 года, зависимость аэродинамического коэффициента опрокидывающего момента от числа Маха  $KM(M)$ , остальные аэродинамические коэффициенты имеют постоянное значение.

В программе предусмотрена возможность вычисления элементов траектории АРСов с несколькими двигателями. После окончания работы двигателей есть возможность провести расчет дальнейшей траектории снаряда до попадания в цель.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕТОДА ЭВЕРХАРТА НА ПРИМЕРЕ ВОЗМУЩЕННОЙ ЗАДАЧИ ДВУХ ТЕЛ**

**Е.А. Переворочаева, Т.Ю. Галушина**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия

E-mail: katya.perevorochaeva@mail.ru

**Аннотация.** Существует большое число методов численного интегрирования, с помощью которых исследуют орбиты астероидов. Одним из таких методов является метод Эверхарта, разработанный Э. Эверхартом специально для численного исследования орбит. В дальнейшем В.А. Авдюшевым интегратор Эверхарта был модифицирован и назван интегратором Гаусса-Эверхарта. Основной идеей этой работы является сравнение эффективности двух интеграторов: Эверхарта и Гаусса-Эверхарта. А также исследованы их параметры число итераций (NI) и порядок системы (NCLASS), и выяснено как они влияют на эффективность интеграторов. Для достижения поставленных целей использовались: интегратор Эверхарта, интегратор Гаусса-Эверхарта, и четыре объекта Солнечной системы с различными значениями эксцентриситета (9262) Bordovitsyna, (3200) Phaethon, (465402) 2008 HW1, (99942) Aporhis. Решив поставленные задачи, были получены соответствующие результаты, по которым можно однозначно определить, что интегратор Гаусса-Эверхарта заметно эффективнее, чем интегратор Эверхарта. Следует также отметить, что увеличение числа итераций (NI) неблагоприятно влияет на эффективность интегратора, то есть эффективность уменьшается. После сравнения результатов интегрирования уравнений первого и второго порядков интегратора Эверхарта, можем отметить, что интегратор Эверхарта более эффективен для уравнений второго порядка. Интегратор Гаусса-Эверхарта содержит параметр локальных ошибок (ERR), с помощью которого лучше всего выбирать шаг интегрирования только по скоростям, но исключительно для объектов, орбита которых близка к круговой.

**Ключевые слова:** интегратор Эверхарта, интегратор Гаусса-Эверхарта, астероиды, возмущенная задача двух тел.

# THE EFFICIENCY RESEARCH OF VARIOUS PARAMETERS' APPLICATION OF EVERHART METHOD ON THE EXAMPLE OF PERTURBED TWO-BODY PROBLEM

**E. Perevorochaeva and T. Galushina**

National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: [katya.perevorochaeva@mail.ru](mailto:katya.perevorochaeva@mail.ru)

**Abstract:** There are many methods of numerical integration, which allows researching the asteroid orbits. One of such methods is the method of Everhart, developed by E. Everhart especially for numerical investigation of orbits. Later V.A. Avdyushev modified the integrator of Everhart and named it the integrator of Gauss–Everhart. The main idea of this work is to compare the efficiency of two integrators: Everhart and Gauss–Everhart. Also their parameters an iteration number (NI) and a system order (NCLASS) are investigated and it is determined how they influences on the efficiency of integrators. To achieve the set goals we used: the integrator of Everhart, the integrator of Gauss–Everhart and four objects of the Solar system with different eccentricity values (9262) Bordovitsyna, (3200) Phaethon, (465402) 2008 HW1, (99942) Apophis. Having solved the problems, corresponding results were obtained, from which it can be unequivocally determined that the integrator of Gauss–Everhart is much more efficient than the integrator of Everhart. It should also be noted that an increase of the iterations number adversely affects the integrator efficiency, i.e., the efficiency decreases. After comparing the results of integrating the equations of the first and second orders by the integrator of Everhart we can note that the integrator of Everhart is more efficient for equations of the second order. The integrator of Gauss–Everhart contains the parameter of local errors (ERR), which intended to choose the integration step only by coordinates or speeds. The research shown then it is more efficient to choose step only by speed but only for objects with almost circular orbit.

**Keywords:** integrator of Everhart, integrator of Gauss–Everhart, asteroids, perturbed two-body problem.

Существует большое число методов численного интегрирования, с помощью которых исследуют орбиты астероидов и других небесных тел. Одним из таких методов является метод Эверхарта [1], разработанный в 1973 году Э. Эверхартом специально для численного исследования орбит. После того как Эверхарт обобщил этот интегратор для численного решения любых обыкновенных дифференциальных уравнений первого и второго порядка, то область его применения расширилась. И в настоящее время интегратор Эверхарта (RADA27) остается популярным в области небесной механики. На основе этого интегратора В.А. Авдюшевым разработана модифицированная версия, которая получила название Гаусса–Эверхарта (GAUSS\_32) [2].

В данной работе и поставлены следующие задачи: изучить интеграторы Эверхарта и Гаусса–Эверхарта 15 порядка, исследовать их эффективность; проанализировать, как влияет на эффективность интегратора увеличение числа итераций (NI); выяснить влияет ли порядок системы дифференциальных уравнений (NCLASS) на эффективность интегратора Эверхарта; определить, какой метод выбора шага эффективнее в интеграторе Гаусса–

Эверхарта. Для достижения поставленных целей были рассмотрены орбиты четырех объектов Солнечной системы с различной динамикой (9262) Bordovitsyna, (3200) Phaethon, (465402) 2008 HW1, (99942) Apophis (таблица 1). В табл. 1 [3] для выбранных астероидов представлены значения эксцентриситета  $e$ , большой полуоси  $a$ , наклона плоскости орбиты к эклиптике  $i$ , долготы восходящего узла  $\Omega$ , аргумента перицентра  $\omega$  и периода  $P$ . Основным параметром, по которому выбраны астероиды, является эксцентриситет  $e$ .

Таблица 1. Орбитальные характеристики объектов

Объекты	(9262) Bordovitsyna	(3200) Phaethon	(465402) 2008 HW1	(99942) Apophis
$t_0$	2458000.5	2458000.5	2458000.5	2458000.5
$e$	0.13934906	0.88993652	0.96059301	0.19150633
$a$ , а.е.	2.58614695	1.27119865	2.58499657	0.92261689
$i$ , °	15.820772	22.253210	10.547258	3.336813
$\Omega$ , °	5.979003	265.230699	128.449535	204.059544
$\omega$ , °	1.348114	322.173601	249.727248	126.687367
$P$ , сут.	1519.10	523.50	1518.10	323.70

Интеграторы Эверхарта и Гаусса–Эверхарта тестировались на примере решения дифференциальных уравнений первого и второго порядка возмущенной задачи двух тел на 100 оборотов.

Сравнивая интеграторы Эверхарта и Гаусса–Эверхарта между собой, получены результаты интегрирования для выбранных астероидов, из которых видно, что эффективность интегратора Гаусса–Эверхарта заметна даже для астероида главного пояса Bordovitsyna, который движется по почти круговой орбите. А для объекта 2008 HW1 с экстремальным эксцентриситетом эффективность заметна больше. Следует обратить внимание на тот факт, что если увеличивать число итераций (NI), то это приведет к увеличению времени работы программы, т.е. эффективность интегратора уменьшится. В интеграторе Эверхарта существует параметр NCLASS – класс системы, по которому определяется, какая система дифференциальных уравнений используется при интегрировании. Интегратор Гаусса–Эверхарта тестировался на системе дифференциальных уравнений первого порядка, а интегратор Эверхарта на системах первого и второго порядка. Сравнивая результаты интегрирования уравнений первого и второго порядка интегратором Эверхарта, можно сказать, что интегратор Эверхарта для уравнений второго порядка заметно эффективнее, чем первого порядка. И сравнив между собой интеграторы первых порядков Эверхарта и Гаусса–Эверхарта, получим, что модифицированный интегратор Гаусса–Эверхарта будет иметь большую эффективность, чем интегратор Эверхарта. В интеграторе Гаусса–Эверхарта вы-

бор шага происходит с помощью массива допустимых локальных ошибок (ERR), по которому можно выбрать шаг или только по координатам, или только по компонентам скорости, или по всем уравнениям. По полученным результатам можно сказать, что интегратор Гаусса–Эверхарта будет иметь некоторый незначительный выигрыш в эффективности, если шаг интегрирования выбирать только по скоростям. Но это касается только тех объектов, у орбита которых близка к круговой. А для объектов с экстремальным эксцентриситетом лучше выбирать шаг интегрирования только по координатам.

Таким образом, из полученных результатов сделан вывод, что модифицированная версия интегратора по сравнению с классической версией имеет заметный выигрыш в эффективности. Можно также утверждать, что число итераций (NI) и класс системы (NCLASS) влияют на эффективность интеграторов. Интегратор Гаусса–Эверхарта содержит параметр локальных ошибок (ERR), с помощью которого лучше всего выбирать шаг интегрирования только по компонентам скорости, но только исключительно для объектов, орбита которых близка к круговой.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-02-02868.

#### Литература

1. *Everhart E.A.* Implicit Single-Sequence Methods for Integrating Orbits // *Cel. Mech.* 1974. Vol. 10. P. 35–55.
2. *Авдюшев В.А.* Численное моделирование орбит небесных тел. Томск. Издательский Дом Томского Государственного университета. 2015. С. 151–161.
3. *Bowell E., Muinonen K., Wasserman L.H.* A public-domain asteroid data base. In *Asteroids, Comets, Meteors*, Kluwer, Dordrecht, Netherlands. 1994. P. 477–481/

## АНАЛИЗ ИЗНОСА ГЛАДКОСТВОЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ МАЛОГО КАЛИБРА

**А.Д. Сидоров, Н.М. Саморокова**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: alex\_sid92@mail.ru

**Аннотация.** В работе зафиксирован и проанализирован качественный и количественный износ гладкоствольных лабораторных установок калибром 30, 35 и 40 мм вследствие проведения баллистических испытаний разных схем и условий заряжания. Описан способ измерения износа установки. Рассмотрены основные причины износа гладкоствольных лабораторных установок. Для проведения корректного сравнения результатов износа установок разных калибров были рассмотрены серии последовательных экспериментов с равным количеством опытов. Определен участок гладкоствольной установки, подвергаемый максимальному износу на всех рассмотренных калибрах. Результаты представлены в виде графика и таблицы.

**Ключевые слова:** гладкоствольная установка, малый калибр, износ, измерение.

# ANALYSIS OF THE WEAR OF A SMALL-BORE SMOOTH-BORE LABORATORY BALLISTIC INSTALLATION

A. Sidorov and N. Samokorova

National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: alex\_sid92@mail.ru

**Abstract.** In the work, quality and quantity wear of smoothbore laboratory installations with a caliber of 30, 35 and 40 mm was recorded and analyzed due to ballistic tests of different schemes and charging conditions. A method for measuring wear of a plant is described. The main causes of wear of smoothbore laboratory facilities are considered. To carry out a correct comparison of the wear results of different calibers, series of consecutive experiments with an equal number of experiments were considered. The site of the smooth-bore installation, subjected to maximum wear on all the calibers examined, was determined. The results are presented in the form of a graph and a table.

**Keywords:** smoothbore installation, small caliber, wear resistance, measurement.

Ствол в процессе стрельбы постепенно изнашивается и перестает удовлетворять тактико-техническим требованиям. Одним из критериев износа ствола является увеличение диаметра его канала. Основные причины износа: трение ведущих устройств метаемых элементов о внутреннюю поверхность, воздействие высоких давлений и температур продуктов сгорания на внутреннюю поверхность при выстреле [1]. Особую актуальность проблема износа канала ствола приобретает при переходе на новые нетрадиционные схемы выстрела с использованием новых перспективных топлив.

Ниже рассмотрен износ гладкоствольных установок, калибром 30, 35 и 40 мм с казенной стороны на расстоянии до 190 мм, на которых было проведено по 31 опыту различных схем заряжания: классическая и нетрадиционная (с использованием присоединенного заряда). Максимальное давление в камере сгорания регистрировалось при помощи пьезоэлектрического датчика давления. Внутренний диаметр канала ствола измерялся при помощи механического микрометрического нутромера типа TESA IMICRO, являющегося трехконтактным средством измерений [2]. Точность прибора 0.005 мм. Изменения внутреннего диаметра канала ствола за серию опытов представлены на рис. 1. Анализ износа представлен в таблице.

В начале ствола находится стыковочный узел с камерой заряжания длиной  $l=93$  мм (рис. 2). Здесь толщина стенок минимальная: она уменьшается с увеличением диаметра ствола. Предполагалось, что максимальный износ будет в самом узком и слабозащищенном участке стыковочного узла. Однако, проведение расчетов опытов по модели, разработанной в НИИ ПММ ТГУ [3] показало, что наибольшее давление при выстреле развивается вблизи казенного среза ствола, что подтверждают результаты измерений (рис. 1). По величине это давление может превышать максимальное давление в камере сгорания и предел по давлению для оружейной стали. Поэтому

му при больших нагрузках следует использовать стволы с повышенными эксплуатационными характеристиками.

Таблица. Анализ износа

Калибр ствола $d_1$ , мм	Среднее максимальное давление в камере $P_{max}$ , МПа	Наименьшая толщина ствола $h$ , мм	Стыковочный узел		Ствол	
			Максимальное изменение внутреннего диаметра $D_{max}$ , мм	Среднее изменение внутреннего диаметра $D_{ср}$ , мм	Максимальное изменение внутреннего диаметра $D_{max}$ , мм	Среднее изменение внутреннего диаметра $D_{ср}$ , мм
30	289	16	0.08	0.04	0.02	0.02
30	449	16	0.10	0.07	0.05	0.04
35	216	13.5	0.05	0.03	0.02	0.02
40	341	11	0.15	0.07	0.02	0.01

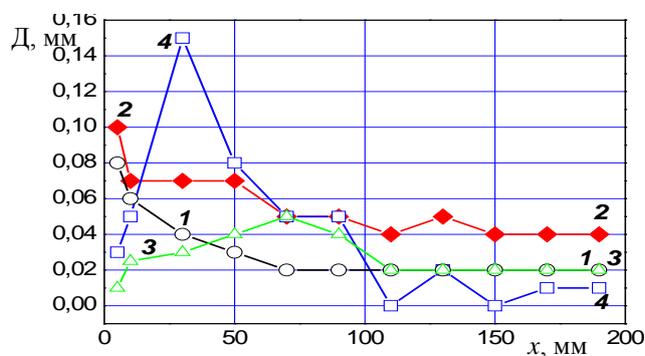


Рис. 1. Изменения внутреннего диаметра канала ствола за серию опытов

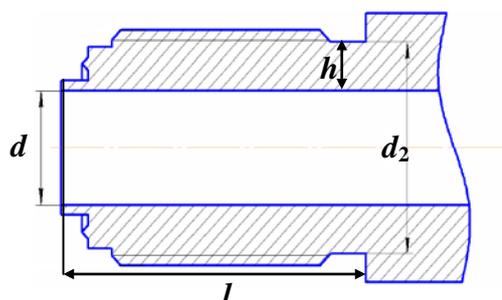


Рис. 2. Чертеж казенной части ствола  $l$  – 30 мм; 2 – 30 мм, 3 – 35 мм, 4 – 40 мм

По данным таблицы видно, что при одинаковом настреле стыковочный узел большего калибра с наименьшей толщиной стенки изнашивается быстрее даже при более низком уровне максимального давления. Однако, максимальный износ самого ствола происходит при более высоком уровне максимального давления. Если же сравнивать износ стволов одного калибра, то по всей длине он оказался пропорциональным уровню максимального давления (кривые 1 и 2 рис. 1).

В статье использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта № 8.2.05.2017, в рамках Программы повышения конкурентоспособности ТГУ.

### Литература

1 Дьячковский А.С. Исследование износа канала ствола лабораторной баллистической установки / А.С. Дьячковский, Н.М. Саморокова, А.Д. Сидоров // Труды Томского государственного университета, Сер. физ.-мат. 2016. Т. 298. С. 47–50.

2. TESA Нутромер IMICRO, цена деления шкалы 0.005 мм, измерит. поверхности из закаленной стали [Электронный ресурс] / Hahn+Kolb Gruppe. Электрон. дан. М., 2017.

URL: <http://hahn-kolb.ru/katalog/izmeritel-nyu-instrument/sredstva-izmereniya-ruchnye/nutromery/27160> (дата обращения: 06.11.2017).

3 *Ищенко А.* Математическая модель и программный комплекс для теоретического исследования внутрибаллистических процессов в ствольных системах / А. Ищенко, В. Касимов. Томск: Издательский дом Томского государственного университета, 2015. 72 с.

## **ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБТЕКАНИЯ ТЕЛА СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ ПРИ НАЛИЧИИ ЛОКАЛЬНОГО ВДУВА ГАЗА В ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ**

**Н.П. Скибина, В.В. Фарапонов, Н.В. Савкина, Е.А. Маслов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: [uss.skibina@gmail.com](mailto:uss.skibina@gmail.com)

**Аннотация:** Целью настоящей работы является экспериментально-теоретическое исследование влияния локального вдува газа в пограничный слой при обтекании осесимметричной модели в диапазоне чисел Маха  $M=(2\div 5)$ . Эксперименты по определению коэффициента сопротивления осесимметричного тела при обтекании сверхзвуковым потоком проводились на импульсной аэродинамической установке, длительность работы которой в зависимости от условий испытаний составляет  $(1.0\div 3.0)$  с. На основании численных расчетов, проведенных с помощью программного пакета Ansys Fluent, получены данные о распределении термогазодинамических параметров и значения коэффициента лобового сопротивления модели при обтекании сверхзвуковым потоком с учетом локального вдува газа. Качественное сравнение картин обтекания моделей без вдува, со вдувом через одного отверстия и через два симметрично расположенных отверстия показало существенное влияние локального вдува на динамику пограничного слоя и формирование конуса Маха.

**Ключевые слова:** аэродинамика, локальный вдув газа, математическое моделирование, коэффициент лобового сопротивления.

## **NUMERICAL CALCULATION OF AERODYNAMIC AND GAS-DYNAMIC PARAMETERS OF A SUPERSONIC FLOW AROUND A BODY WITH LOCAL INJECTION INTO THE BOUNDARY LAYER**

**N. Skibina, V. Faraponov, N. Savkina and E. Maslov**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: [uss.skibina@gmail.com](mailto:uss.skibina@gmail.com)

**Abstract:** The purpose of the paper is an experimental-theoretical study of the effect of local gas injection into the boundary layer in the flow around axisymmetric model in the range of Mach numbers  $M=(2\div 5)$ . Experiments to determine the aerodynamic drag coefficient of an axisymmetric body in supersonic flow around were carried out on a pulsed wind-tunnel,

in which the operating time, depending on the test conditions, is (1.0÷3.0) s. On the basis of numerical calculation using software package Ansys Fluent the distribution of the thermogas dynamic parameters and the values of the drag coefficient of the model for supersonic flow around body with local gas injection are obtained. A qualitative comparison flow patterns of models without injection, with injection through one aperture and with injection through two symmetrically located apertures is showed a significant influence of a local injection on the dynamics of the boundary layer and Mach cone formation.

**Keywords:** aerodynamic; local gas injection; mathematical modeling; aerodynamic drag coefficient.

Маневренность сверхзвукового летательного аппарата на траектории полета может быть осуществлена с помощью локального вдува газа с поверхности в пограничный слой. При этом на этапе проектирования возникает необходимость решения задачи определения основных параметров и структуры потока в пограничном слое в зависимости от условий вдува.

Целью настоящей работы является экспериментально-теоретическое исследование влияния локального вдува газа в пограничный слой при обтекании осесимметричной модели в диапазоне чисел Маха  $M=(2\div5)$ .

Эксперименты по определению коэффициента сопротивления осесимметричного тела при обтекании сверхзвуковым потоком проводились на импульсной аэродинамической установке. Диапазон реализуемых режимов обтекания: числа  $M=(2\div5)$ ; давление торможения на срезе сопла диффузора, формирующего сверхзвуковой поток,  $P_0=(0.15\div0.3)$  МПа при статическом давлении  $P=(0.03\div0.07)$  МПа; температура торможения набегающего воздушного потока  $T_0=(17.5\div250)$  °С. Длительность работы импульсной аэродинамической установки в зависимости от условий испытаний составляет (1.0÷3.0) с.

Испытаниям на аэродинамической установке подвергались модели в виде конуса с углом полураствора  $15^\circ$ . Вдув газа в пограничный слой осуществлялся через отборные отверстия.

Для определения значения коэффициента сопротивления в экспериментах с помощью тензометрических весов непрерывно измерялась сила, действующая на поверхность модели при обтекании модели в диапазоне чисел Маха  $M=(2\div5)$ . В качестве контроль-теста в экспериментальных исследованиях использовались результаты испытаний при обтекании конуса без вдува в рассматриваемом диапазоне чисел Маха. Сравнение полученных результатов с данными других авторов показало удовлетворительное согласие – максимальное отличие составило  $<15\%$ . Структура и динамика течения, характерные особенности формирования пограничного слоя и взаимодействия потоков в пограничном слое при наличии вдува были получены методом теневой визуализации. Сравнение картин обтекания конуса без вдува и при локальном вдуве через одно отверстие показало качественное отличие взаимодействующего сверхзвукового воздушного потока с поверхностью конуса. При обтекании конуса с локальным вдувом

через одно отверстие наблюдается отличие углов между формирующимся конусом Маха и поверхностью модели. При локальном вдуве через одно отверстие конус Маха асимметричен.

Поля температуры и давления при обтекании конуса сверхзвуковым потоком с учетом локального вдува газа в пограничный слой определялись на основании численного моделирования процесса. Термогазодинамические характеристики течения получены с помощью пакета программ Ansys Fluent. Течение сплошной среды (газа) моделировалось системой уравнений Навье-Стокса турбулентного течения вязкого сжимаемого газа. В качестве модели турбулентности была использована SST-модель (модель сдвиговых напряжений Ментера), основанная на гипотезе вихревой вязкости. Численная реализация решения осуществлялась на неструктурированной сетке с различным сеточным разрешением.

На основании численных исследований получены данные о распределении температуры и давления при обтекании конуса сверхзвуковым потоком,  $M=(2\div 5)$ , с учетом локального вдува газа в пограничный слой. Анализ полученных результатов показал влияние вдува на распределение температуры в пограничном слое. Распределение температуры носит существенно немонотонный характер: наиболее высокая температура – от вершины конуса до отборного отверстия, резкое уменьшение температуры на участке вдува, монотонное увеличение температуры – от отборного отверстия до основания конуса.

Анализ экспериментальных и численных результатов показал их соответствие по основным особенностям структуры течения в рассматриваемых условиях: формирование конуса Маха, динамическое возмущение течения в области вдува, формирование отрывного течения с поверхности у основания конуса.

На основании результатов экспериментально-теоретического исследования влияния локального вдува газа в пограничный слой при обтекании осесимметричной модели в диапазоне чисел Маха  $M=(2\div 5)$  определены основные термогазодинамические характеристики течения.

Качественный анализ полученных результатов при обтекании конуса со вдувом и без вдува показал существенное влияние вдува на динамику пограничного слоя и формирование конуса Маха.

## Литература

1. Maslov E.A., Klochikhin V.V., Zharova I.K. Experimental research of supersonic flow around simulating rocket-ramjet, MATEC Web of Conferences 23,01026 (2015)
2. Козлов Е.А., Жарова И.К., Маслов Е.А., Фарапонов В.В., Савкина Н.В. Структура течения при обтекании осесимметричных тел с локальным вдувом // Материалы XX Юбилейной Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2017), 24–31 мая 2017 г., Алушта. М.: Изд-во МАИ, 2017. С. 469–470.

3. Звубков. А.И., Глаголев А.И., Панов Ю.А. Истечение газовых струй в сверхзвуковой поток из отверстия в боковой поверхности тела // Вестник Московского университета. 1968. №5. С. 66–72.

## **ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ЗАДАНИЯ ДОВЕРИТЕЛЬНОЙ ОБЛАСТИ НА ВЕЛИЧИНУ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ СТОЛКНОВЕНИЯ АСТЕРОИДА С ЗЕМЛЕЙ**

**О.М. Сюсина**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: kleo77@sibmail.com

**Аннотация.** Вероятность столкновения исследуемого объекта обычно оценивают как отношение числа точек доверительной области (виртуальных астероидов), которые в процессе эволюции сталкиваются с Землей, к общему числу точек, определяющих эту область. В данной работе на примере фиктивного астероида, который неминуемо должен столкнуться с Землей, исследована достоверность оценки вероятности этого столкновения при различных способах задания доверительных областей.

**Ключевые слова:** астероид, вероятность столкновения, доверительные области.

## **THE INFLUENCE OF THE METHOD OF THE CONSTRUCTION OF THE CONFIDENCE REGION ON THE VALUE OF THE PROBABILITY OF ASTEROID COLLISION WITH THE EARTH**

**O. Syusina**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: kleo77@sibmail.com

**Abstract.** Probability of possible asteroid collision with planet is estimated as the ratio of the number of collision points of the confidence area to the total number of points defining this region. On example of fictitious asteroid, which inevitably should come into collision with Earth, reliability of such estimations is investigated for various method of the construction of the confidence region.

**Keywords:** asteroid, collision probability, confidence region.

Вероятность столкновения исследуемого объекта обычно оценивают как отношение числа точек доверительной области (виртуальных астероидов), которые в процессе эволюции сталкиваются с Землей, к общему числу точек, определяющих эту область [1]. Виртуальный астероид будет столкновительным, если при движении по своей орбите попадает в сферу действия Земли и оказывается от нее на прицельном расстоянии, равным так называемому радиусу захвата. Очевидно, что при меньших значениях прицельного расстояния столкновение неизбежно.

В рамках данного исследования нами был рассмотрен фиктивный астероид со следующими параметрами

$$\begin{aligned}
 t_0 &= 2455647.46557825\text{JD} \\
 a &= 0.77687 \text{ a.e.} \quad e = 0.685103 \quad i = 159^\circ.234 \\
 \omega &= 18^\circ.715 \quad \Omega = 187^\circ.188 \quad M_0 = 275^\circ.352
 \end{aligned}$$

При данных начальных параметрах астероид в момент времени  $t = 2456150.0\text{JD}$  точно проходит через центр Земли. Измерения для данного объекта моделировались равномерно распределенными относительно начального момента времени. Длина мерного интервала составила 120 суток, количество наблюдений равнялось 55. На основе моделируемых наблюдений была получена оценка начальных параметров фиктивного астероида и построена его начальная доверительная область в виде множества точек (виртуальных астероидов). При построении начальных доверительных областей было рассмотрено три способа: в виде множества точек, распределенных по всему объему доверительной области, в виде точек, заполняющих только ее граничную поверхность и в виде точек, равномерно расположенных вдоль большой оси доверительного эллипсоида [2, 3]. Каждый вид доверительной области содержал выборку из 10000 точек. Затем эта область отображалась на ряд моментов времени с интервалом  $\Delta t = 0.0001$  суток, охватывающих известный момент соударения. Число моментов этого ряда подбиралось таким образом, чтобы учесть попадание в сферу радиуса захвата всех виртуальных астероидов. Данная задача решалась порядка одного миллиона раз: каждый раз с новой выборкой наблюдений. На

В табл. 1 приведены результаты исследования по определению вероятности столкновения данного фиктивного астероида для нескольких выборок моделированных наблюдений. В первом столбце приведена величина  $k$ , определяемая при линейном подходе построения доверительных областей с помощью соотношения (1)

$$(\hat{\mathbf{q}} - \mathbf{q}_t)^T [\mathbf{R}^T(\mathbf{q}_t) \mathbf{W} \mathbf{R}(\mathbf{q}_t)] (\hat{\mathbf{q}} - \mathbf{q}_t) = \sigma_0^2 k^2, \quad (1)$$

где  $\mathbf{q}_t$  и  $\sigma_0$  – вектор «точных» значений параметров орбиты объекта и задаваемая нами в модельных задачах среднеквадратическая ошибка наблюдений;  $\hat{\mathbf{q}}$  – оценка начальных параметров;  $\mathbf{W}$  – весовая матрица;  $\mathbf{R}(\mathbf{q}) = \partial \mathbf{d}(\mathbf{q}) / \partial \mathbf{q}$  – матрица частных производных; символ  $T$  означает операцию транспонирования. Во втором – четвертом столбцах таблицы приведено количество столкновительных точек из 10000 для различных способов построения начальных доверительных областей:  $n_1$  – для множества точек, распределенных по всему объему доверительной области,  $n_2$  –

в виде точек, заполняющих только ее граничную поверхность и  $n_2$  – в виде точек, равномерно расположенных вдоль большой оси доверительного эллипсоида.

Таблица. Оценка числа столкновительных точек

$k$	$n_1$	$n_2$	$n_3$
0.49	147	57	38
0.99	168	73	40
1.96	99	56	40
2.70	101	74	43
3.50	69	84	44
4.11	22	42	37
5.24	5	53	38
5.55	0	10	42
5.85	3	27	41
6.25	0	30	41
7.09	1	35	42

Как видно из таблицы, в случае построения начальных доверительных областей в виде множества точек, распределенных по всему объему области, при некотором значении параметра может получиться нулевая вероятность столкновения, хотя это не так на самом деле. Это происходит из-за того, что все столкновительные точки находятся на границе доверительной области. Соответственно, применение для оценки вероятности столкновения доверительной области, построенной по граничной поверхности, более предпочтительно.

Также была посчитана вероятность столкновения для ряда реальных объектов, имевших когда-то сближения с Землей на расстояние меньше 0.0003 а.е. [4] и для ряда объектов, у которых прогнозируются тесные сближения с Землей в ближайшие 33 года [5]. Столкновительные орбиты были обнаружены у объектов 2014 LY21 ( $n_1=0$ ,  $n_2=14$ ), 2008 UM1 ( $n_1=0$ ,  $n_2=14$ ), 2004 FU164 ( $n_1=70$ ,  $n_2=164$ ).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 16-32-00191 мол\_а.

### Литература

1. *Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра* // под ред. Б.М. Шустова, Л.В. Рыхловой. М.: Физматлит, 2010. 384 с.
2. *Сюсина О.М., Черницов А.М., Тамаров В.А.* Построение доверительных областей в задаче вероятностного исследования движения малых тел Солнечной системы // *Астрон. вестн.* 2012. Т. 46. № 3. С. 209–222/
3. *Сюсина О.М., Черницов А.М., Тамаров В.А.* К вопросу оценивания вероятности столкновения с землей астероидов, наблюдавшихся в одной оппозиции // *Изв/ вузов. Физика.* 2016. Т. 59, № 10/2. С. 108–114.

## MEGNO-АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ОКОЛОЛУННОГО ОРБИТАЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА

**И.В. Томилова, В.А. Авдюшев, Т.В. Бордовицына**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: irisha\_tom@mail.ru

**Аннотация.** Представлены результаты исследования динамической структуры окололунного орбитального пространства, ограниченного 15 лунными радиусами. Путем численного моделирования исследована динамика 5180 объектов, орбиты которых равномерно распределены в окололунном орбитальном пространстве в диапазоне больших полуосей от 2000 км до 25000 км с наклонениями  $0^\circ - 180^\circ$ . Построена MEGNO-карта данной области с шагом 0.1 радиуса Луны по большой полуоси и 5 градусов по наклонению. Выявлены области с хаотическим движением объектов и показано, что хаотичность является следствием наложений устойчивых и неустойчивых вековых резонансов. Показано также, что главной особенностью динамики объектов является рост эксцентриситета. Это приводит к тому, что значительная часть объектов покидает окололунное пространство.

**Ключевые слова:** Искусственные спутники Луны, орбитальная эволюция, MEGNO-анализ, вековые резонансы

## MEGNO-ANALYSIS OF THE DYNAMIC STRUCTURE OF THE NEAR-MOON ORBITAL SPACE

**I.V. Tomilova , V.A. Avdushev, T.V. Bordovitsyna**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: irisha\_tom@mail.ru

**Abstract:** The results of the study of the dynamic structure of the near-moon orbital space, limited by 15 lunar radii, are presented. Dynamics of 5180 objects is investigated by numerical modeling. The orbits of these objects are evenly distributed in the near-earth orbital space in the range of the large semiaxes from 2000 km to 25000 km with inclinations  $0^\circ - 180^\circ$ . MEGNO- map of this area has been built with a step of 0.1 the radius of the moon along the major semi-axis and 5 degrees in inclination. Areas with chaotic movement of objects have been revealed and it has been shown that randomness is a consequence of imposing of stable and unstable secular resonances. It is shown that the main feature of object dynamics is the growth of eccentricity. This leads to the fact that a significant part of the objects leaves the near-moon space

**Keywords:** Artificial lunar satellite, the orbital evolution, MEGNO-analysis, secular resonances.

В работе представлены результаты исследования динамической структуры окололунного орбитального пространства, ограниченного 15 лунными радиусами.

Исследование орбитальной эволюции искусственных спутников Луны проводилось при помощи численного моделирования с учетом гравитационных возмущений от притяжения Земли и Солнца. Для исследования были выбраны модельные объекты с большими полуосями от 1.1 до 15 радиусов Луны (с шагом  $0.1 R_L$ ) и наклонениями от 0 до 180 градусов (с шагом 5 градусов). Моделирование проводилось на десятилетнем интервале времени.

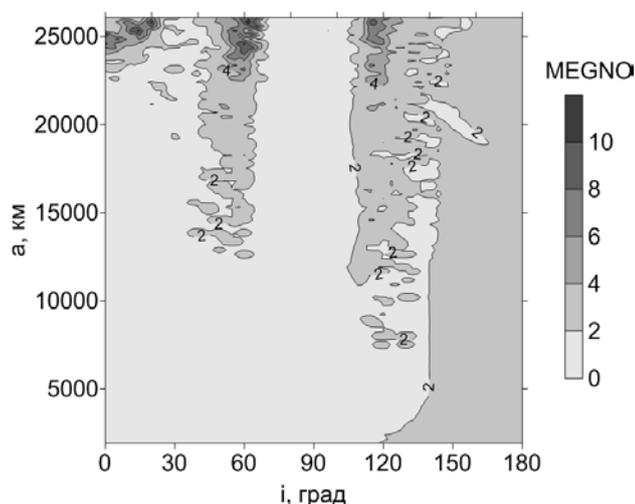


Рис. 1. MEGNO-карта окололунного орбитального пространства в сечении фазовой плоскостью  $\{a, i\}$

Для оценки хаотичности движения использовался параметр MEGNO (среднее экспоненциальное расхождение близких орбит) [1], который представляет собой дважды взвешенную по времени интегральную форму ляпуновского характеристического числа. Этот параметр обладает важным свойством. Эволюция параметра во времени позволяет выявить различный характер орбит. Так, например, известно, что для квазипериодических (регулярных) орбит этот параметр осциллирует около 2. Более того, как показано в [1], для квазипериодических орбит он всегда равен 2, а для устойчивых орбит типа гармонического осциллятора равен нулю.

По результатам исследования построена MEGNO-карта данной области (рис. 1). Выявлены области с хаотическим движением объектов.

Анализ данных о резонансной структуре орбитальной эволюции 5180 модельных объектов, показал, что движение значительной части окололунных объектов не отличается стабильностью. Вследствие роста эксцентриситета 1468 объектов (28%) падает на Луну, а 33 объекта (0,64%) покидают окололунное пространство. Причиной возникновения хаотичности и роста эксцентриситета, является наложение различных вековых апсидально-нодальных резонансов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-02-02868.

## Литература

1. *Cincotta P.M., Girdano C.M., Simo C.* Phase space structure of multi-dimensional systems by means of the mean exponential growth factor of nearby orbits // *Physica D.* 2003. V. 182. P. 151–178.

### ПОИСК ДЛЯ ОТРАБОТАВШИХ ОБЪЕКТОВ ГНСС ОРБИТ БЕЗОПАСНЫХ ДЛЯ ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ СПУТНИКОВ С УЧЕТОМ СВЕТОВОГО ДАВЛЕНИЯ

**И.В. Томилова, А.Г. Александрова**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: [aleksann@sibmail.com](mailto:aleksann@sibmail.com)

**Аннотация.** В работе представлены результаты численного эксперимента по поиску для отработавших объектов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) безопасных орбит, не попадающих в орбитальное пространство функционирующих объектов, а также орбит, способных приводить к реальной утилизации объектов путем попадания их в верхние слои атмосферы и последующего сгорания. Численное моделирование выполнено с учетом влияния гравитационных возмущений от гармоник геопотенциала до 10 порядка и степени, Луны, Солнца и светового давления. Исследование динамической эволюции объектов проводилось на интервале времени 100 лет. Показано, что под действием светового давления околоземные объекты могут, как входить в области действия резонансов, так и уходить из них. Кроме того, возможно возрастание эксцентриситета орбиты. В работе исследована возможность использования этих свойств светового давления для утилизации навигационных ИСЗ.

**Ключевые слова:** навигационные системы, вековые резонансы, орбитальная эволюция, световое давление.

### SEARCH FOR END-OF-LIFE GNSS-OBJECTS ORBITS SAFE FOR OPERATING SATELLITES TAKING INTO ACCOUNT THE LIGHT PRESSURE

**I. Tomilova and A. Aleksandrova**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: [aleksann@sibmail.com](mailto:aleksann@sibmail.com), [irisha\\_tom@mail.ru](mailto:irisha_tom@mail.ru)

**Abstract:** The results of a numerical experiment to search safe orbits that do not fall into the orbital space of the functioning objects for the end-of-life objects of global navigation satellite systems (GNSS) and orbits capable of leading to actual utilization of objects by entering them into the upper atmosphere and subsequent combustion are presented in the paper. Numerical simulation has been carried out taking into account the influence of gravitational perturbations from harmonics of geopotential up to 10 orders and degrees, the Moon, the Sun and light pressure. The study of the dynamic evolution of objects has been carried out over a time interval of 100 years. It is shown that near-Earth objects can enter the regions of action of res-

onances and escape from them under the influence of light pressure. In addition, the eccentricity of the orbit can increase. The possibility of using these light pressure properties for the utilization of navigation satellites is investigated.

**Keywords:** navigation systems, secular resonances, orbital evolution, light pressure.

В настоящее время область околоземного космического пространства между высотами  $h = 10$  тыс. км и  $h = 35$  тыс. км (область МЕО – Medium Earth Orbits) активно используется для работы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). В этой области функционируют две системы: ГЛОНАСС (состоит из 24 спутников) и GPS (состоит из 31 спутника). После того, как все эти космические аппараты (КА) исчерпают свои ресурсы и потеряют управление, они продолжают свое движение в качестве космического мусора, подчиняясь законам небесной механики.

В настоящее время отработавшие свой срок службы навигационные ИСЗ принято переводить на орбиты, большие полуоси которых на 500 км больше или 500 км меньше номинальных. Во время работы по проекту СП-1671.2016.3 были рассмотрены орбиты, как в рамках данной стратегии, так и с более существенным понижением высоты полета, а также приведены результаты исследования возможности полной утилизации ГНСС путем увеличения эксцентриситета и одновременного понижения орбиты, и только увеличения эксцентриситета (рис. 1). Подробное исследование орбит функционирования навигационных систем ГЛОНАСС и GPS, было описано в работе [1].

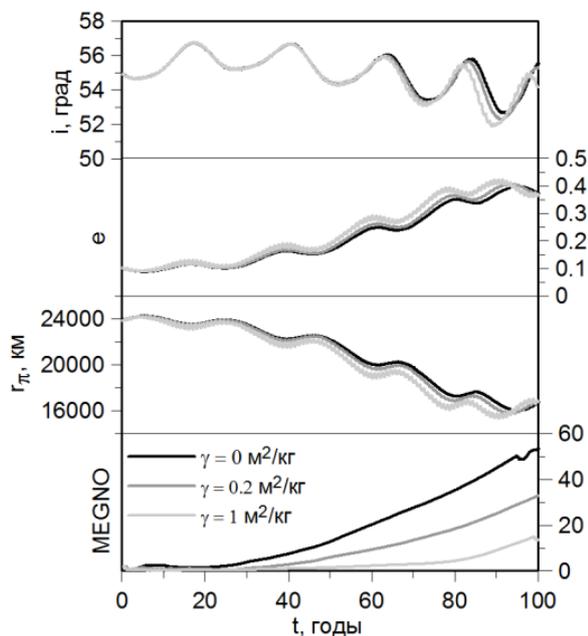


Рис. 1. Эволюция спутника GPS, переведенного после окончания срока службы на орбиту с  $e = 0.1$ , под действием СД различной силы

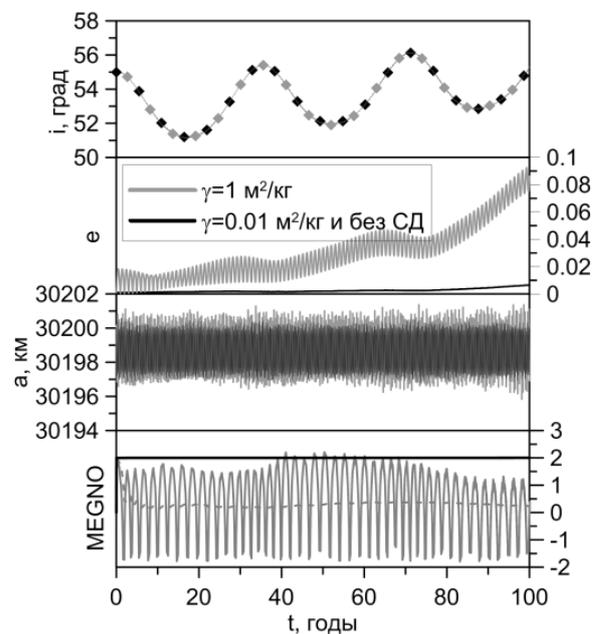


Рис. 2 – Эволюция орбитальных элементов модельного объекта под действием СД различной силы и без СД

Для исследования долговременной орбитальной эволюции объектов на предполагаемых орбитах утилизации и паркинга отработавших объектов ГЛОНАСС и GPS применялось численное моделирование на столетнем интервале времени при помощи программного комплекса «Численная модель движения систем ИСЗ» [2] на кластере «СКИФ Cyberia» НИ ТГУ. В процессе моделирования учитывались возмущения от гармоник геопотенциала до 10 порядка и степени, возмущения от Луны и Солнца. Кроме того, исследование было проведено еще и с учетом светового давления (СД), так как оно оказывает значительное влияние на движение околоземных объектов и, в частности, спутников ГНСС

Исследования в рамках проекта РФФИ № 16-32-60097 показали, что под действием светового давления околоземные объекты могут, как входить в области действия резонансов, так и уходить из них [3, 4], а также происходит усиление некоторых эффектов, например, роста эксцентриситета орбиты (рис. 2). На рис. 2 показано изменение элементов орбиты без учета светового давления и с учетом СД при значениях парусности (отношения площади к массе объекта) 0.001 и 1 м<sup>2</sup>/кг. Здесь при совместном влиянии резонанса  $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{SM}) + 2\dot{\omega} \approx 0$  и СД с увеличением парусности объекта происходит более быстрый рост эксцентриситета. Мы решили воспользоваться данными свойствами для поиска орбит, способных приводить к реальной утилизации объектов путем попадания их в верхние слои атмосферы и последующего сгорания.

Для оценки хаотичности и определения интервала предсказуемости движения использовался MEGNO-анализ орбитальной эволюции объектов [2]. Исследование структуры вековых резонансов проводилось при помощи методики, подробно описанной в [5].

Исследования показали, что сила светового давления является фактором, оказывающим значительное влияние на динамику околоземных космических объектов с парусностью от 0.1 м<sup>2</sup>/кг и приводящим к росту эксцентриситетов их орбит.

Полной утилизации отработавших спутников навигационных систем ГЛОНАСС и GPS путем их сгорания в атмосфере, в силу расположения и особенностей орбитальной эволюции этих объектов [1], можно добиться только увеличением эксцентриситета орбиты. Ускорить данный процесс может увеличение парусности объектов.

Для орбит паркинга наиболее подходящими являются орбиты, которые расположены не менее чем на 1000 км ниже номинальных орбит для ГЛОНАСС и на столько же выше для спутников GPS. Следует отметить, что после перевода спутников GPS на такие орбиты паркинга, спутники уходят из области действия орбитального резонанса 2:1 с вращение Земли, а их движение теряет хаотичность.

Работа выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (СП-1671.2016.3, конкурс СП-2016) и гранта РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-60097 мол\_а\_дк.

## Литература

1. *Бордовицына Т.В., Томилова И.В.* Особенности структуры резонансных возмущений неуправляемых объектов навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Влияние на орбитальную эволюцию // Изв. вузов. Физика, 2017, № 4, С. 119–125.
2. *Александрова А.Г., Бордовицына Т.В., Чувашов И.Н.* Численное моделирование в задачах динамики околоземных объектов // Изв. вузов. Физика. 2017. Т. 60. № 1 С. 69-76.
3. *Александрова А.Г., Томилова И.В.* Исследование особенностей совместного влияния вековых резонансов низких порядков и светового давления на движение околоземных космических объектов // Материалы VII Международной молодежной конференции «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2017» Томск. 27-29 Ноября 2017, С (данный сборник)
4. *Александрова А.Г., Томилова И.В.* Прикладной программный комплекс для выявления и исследования резонансов // Изв. вузов. Физика. 2016. Т. 59. № 10/2. С. 64-69
5. *Бордовицына Т.В., Томилова И.В.* Особенности структуры вековых резонансов динамике околоземных космических объектов// Изв. вузов. Физика. 2016. Т. 59. № 3. С. 41–48.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРБИТ ОБЪЕКТОВ С БОЛЬШОЙ ПАРУСНОСТЬЮ

**И.Н. Чувашов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: chuvashovin@gmail.com

**Аннотация.** В настоящее время в околоземном пространстве известны объекты космического мусора, имеющие отношения площади миделевого сечения к массе (коэффициент парусности) больше  $10 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Световое давление оказывает значительное влияние на движение этих объектов, и прогнозирование на длительные интервалы времени практически невозможно. Объекты с большим коэффициентом парусности представляют опасность для функционирующих космических аппаратов.

**Ключевые слова:** космический мусор, столкновения, искусственные спутники Земли.

## DETERMINATION OF ORBIT OBJECTS WITH HIGH AREA-TO-MASS RATIO

**Iv. Chuvashov**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: chuvashovin@gmail.com

**Abstract.** Currently, in the near-Earth space is known space debris objects with mid-section area to mass ratio (area-to-mass ratio) is higher than  $10 \text{ m}^2/\text{kg}$ . The light pressure has a significant influence on the motion of these objects, and prognosis for long time intervals

practically impossible. Objects with a high area-to-mass ratio produce a risk to operational spacecrafts. In the paper discussed several ways to accelerations of light pressure simulation with the use of positional observations of such objects. In the first method we determined the area-to-mass ratio together with coordinates and velocities. The following two approaches are set object-center coordinate systems different from each other and define three components of the acceleration vector along the axes of these coordinate systems. It is shown that last two methods are better to minimize the mean square error of measurements, but the first approach is not always suitable to find a solution to the inverse problem.

**Keywords:** space debris, collisions, artificial satellites of the Earth.

В настоящее время в околоземном пространстве известны объекты космического мусора, имеющие отношения площади миделевого сечения к массе (коэффициент парусности) больше  $10 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Световое давление оказывает значительное влияние на движение этих объектов, и прогнозирование на длительные интервалы времени практически невозможно. Объекты с большим коэффициентом парусности представляют опасность для функционирующих космических аппаратов.

В работе рассмотрено несколько способов моделирования ускорений от светового давления с использованием позиционных наблюдений таких объектов. В первом способе совместно с координатами и скоростями определяется коэффициент парусности. В последующих двух подходах задаются отличные друг от друга спутникоцентрические системы координат и определяются три компонента вектора ускорения вдоль осей этих систем координат. Показано, что последние два способа лучше минимизируют среднеквадратическую ошибку измерений и хорошо представляют наблюдения, а первый подход не всегда позволяет найти решение обратной задачи.

Работа выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (СП-4301.2016.5-СП-2016).

## **АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ НЕЛЕТАЛЬНОГО ОРУЖИЯ**

**К.Е. Милевский, А.В. Шарков, А.А. Заруев, Д.Ю. Лех,  
С.В. Евтушенко, А.А. Ткачев**

Novosibirsk State Technical University, Russian Federation  
E-mail: anton4shka@gmail.com

**Аннотация.** Рассматриваются варианты снаряжения продуктов (оружия) нелетального действия, предназначенного для эффективного пресечения беспорядков и нейтрализации индивидуальных участников противостояния. В настоящее время актуально применение специальных средств, предназначенных для подавления живой силы условного противника без реальной угрозы для жизни. Тема актуальна, так как участие вооруженных сил в миротворческих операциях породило повышенный спрос на специальные виды боеприпасов и средств вооружения не смертельного действия, которые

могут использоваться для нейтрализации противоборствующих сил в зонах конфликтов для избегания человеческих жертв. В статье рассмотрены разные варианты оружия нелетального действия.

**Ключевые слова:** нелетальное действие, локализация массовых беспорядков.

## **ANALYSIS OF THE PROSPECTS AND DEVELOPMENT OF NON-LETHAL WEAPONS**

Novosibirsk State Technical University, Russian Federation  
E-mail: anton4shka@gmail.com

**К.Е. Milevskiy, А.А. Zaruev, D.Yu. Leh, S.V. Evtushenko, А.В. Sharkov,  
А.А. Tkachev**

**Abstract.** We consider options for equipping non-lethal products designed to effectively suppress disturbances and neutralize individual participants in the confrontation. At present, the use of special means intended to suppress the manpower of the conventional enemy without a real threat to life is topical. The topic is relevant, since the participation of the armed forces in peacekeeping operations has generated an increased demand for special types of munitions and non-lethal weapons that can be used to neutralize opposing forces in conflict zones to avoid human casualties. Different variants of non-lethal weapons are considered in the article.

**Keywords:** non-lethal effect, localization of riots.

**Введение.** Тема актуальна, так как участие вооруженных сил в миротворческих операциях породило повышенный спрос на специальные виды боеприпасов и средств вооружения не смертельного действия, которые могут использоваться для нейтрализации противоборствующих сил в зонах конфликтов для избегания человеческих жертв.

Правоохранительные органы и вооруженные силы в настоящее время заинтересованы в создании средств нелетального воздействия. Их задачами является задержание и ликвидация хорошо вооруженных преступных групп в условиях города, при этом, применяя боевые патроны, могут возникнуть жертвы среди населения.

Отдельной проблемой для правоохранительных органов является возможность использования нелетального оружия при локализации массовых беспорядков, применения не смертельных специальных средств для задержания обычных преступников, подавления протестующих в окнах или автомобилях, дезориентация для задержания отдельных представителей массовых беспорядков на улицах городов или стадионах для успешного пленения.

**Обзор ОНД.** В современных инженерно-технических и антитеррористических средствах защиты объектов, в вооружении служб безопасности и частных охранников, а также в лицензированных средствах для самообороны граждан и в числе создаваемых образцов, и в ведущихся в этом на-

правлении опытно-конструкторских работах можно выделить следующие виды: контактное оружие, оружие для средней дальности действия, оружие для больших дистанций свыше 20 метров.

1. Контактное оружие пленения, используется на дистанциях до 5 метров. К нему относятся блоки транспортировки электроразряда и «электрошокеры» контактные [3–5]. Эффективно против невооруженных объектов в помещениях позволяет дезориентировать объект и совершить пленение. Имеет недостатки: не может быть применено в условиях удаления или физической защищённости биообъектов.

2. Оружие средней дальности действия, это дымовые гранаты, блоки метания гранат, светозумовые гранаты [6–8]. Имеют недостатки: поражают не один требуемый объект, а большую площадь. Объект имеет возможность отбросить гранату с химической смесью обратно к представителям правоохранительных органов; не позволяют поражать объекты в окнах высотных зданий или быстро перемещающихся автомобилях; дальность действия недостаточна для безопасности представителей правоохранительных органов.

3. Боеприпасы для гладкоствольного оружия, позволяющие вести прицельный огонь с достаточной дистанции, к которым относятся резиновые пули, миномётные мины с пластиковыми 32 мм поражающими элементами; пули с химической смесью, которые имеют главный недостаток – опасность повреждения биообъекта, а также не достаточная дезориентация в случае попадания [9–12, 16]. В ходе исследований возможности технического совершенства анализируется патентная информация, запросы потребителей, тенденции совершенствованию данной группы однородной продукции передовыми зарубежными фирмами.

**Перспектива.** В результате этих анализов устанавливается группа продукции, которая принадлежит стандартизации.

Рассматривают последний шестилетний период времени, который называют временем основания прогноза. Первый год (нулевой) берут в качестве исходного для формирования исходного уровня. Подсчитав число патентов, выданных в течение первого (нулевого) года, и приняв его за исходную величину, на основании сравнения полученной величины с числом патентов в каждый из последующих годов делают вывод о перспективности того или иного объекта стандартизации или направления развития техники [13].

Необходимость нелетального оружия начала расти с начала двадцать первого века, что обусловлено различными конфликтами с участием мирного населения. Террористы берут мирных людей в заложники в целях прикрытия своих позиций и самих себя. Применение поражающего оружия стало затруднительно и опасно, ведь могли пострадать невинные люди, например, средний радиус поражения гранат с хлорацетофеноном составляет 5 метров. Тогда правоохранительные органы начали использовать ре-

зиновые пули, которые не убивали, но наносили огромный урон живым объектам, как и террористическим, так и мирным [15]. Спрос на оружие не смертельного действия – так называемое нелетальное - в мире растет по мере активизации террористов. Количество разработок в этой области увеличивается.

**Заключение.** Рекомендуется разрабатывать неконтактные боеприпасы для гладкоствольного оружия для точечной доставки поражающих компонентов к требуемым биообъектам, их дезориентации и дальнейшего успешного пленения, что позволяет полностью избежать любого поражения окружающих объектов [1, 2]. Известно немало случаев, когда бандгруппировки прикрываются мирными жителями. Прямое воздействие традиционными средствами поражения в этом случае невозможно, предотвратить нежелательное развитие событий могут лишь средства, временно выводящие живую силу из строя.

Применение нелетального оружия в противовес агрессивному поведению правонарушителей отражает гуманность и не противоречит международным нормам и соглашениям [14].

#### Литература

1. Патент 2329456, Российская Федерация. Патрон нелетального действия / Ю.Б. Абрамов, Ю.Н. Кириллов Юрий, А.А. Пристягин. № 2006126239/02; заявл. 19.07.2006; опубл.: 20.07.2008, Бюл. № 20. 11 с.
2. Оружие нелетального действия - составная часть системы вооружения будущего вестник академии военных наук № 4(21)/2007 вооружение, военная и специальная техника Генерал-майор В.М. Буренок, начальник ФГУ «46 ЦНИИ Минобороны России», доктор технических наук, профессор, действительный член АВН; В.Ю. Корчак, кандидат технических наук, старший научный сотрудник; С.С. Смирнов.
3. Патент 2284440, Российская Федерация. Электрошокер / К.К. Ким. № 2005109055/02; заявл. 29.03.2005; опубл. 27.09.2006, Бюл. № 27. 5 с.: ил.
4. Патент 2486451, Российская Федерация. Снаряд дистанционного электрошокового оружия и способ его изготовления / Ю.О. Ладыгин. № 2010150899/11; заявл. 14.12.2010; опубл. 27.06.2013, Бюл. № 18. 12 с.
5. Средства поражения и боеприпасы (стр. 826) «Распылители высокого давления»: учебник / А.В. Бабкин, В.А. Велданов, Е.Ф. Грязнов и др.; под общ. ред. В.В. Селиванова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 984 с.: ил.
6. Патент 2376550, Российская Федерация. Боеприпас для создания аэрозольной маскирующей завесы / П.В. Андрейкин, А.В. Зезекало. № 2008117706/02; заявл. 04.05.2008; опубл. 20.12.2009, Бюл. № 35. 7 с.: ил.
7. Патент 2468331, Российская Федерация. Способ постановки протяжённой аэрозольной завесы индивидуальными комплексами / П.Е. Кулешов, Ю.Л. Козирацкий, А.Ю. Козирацкий, Т.М. Хакимов, В.Е. Хроликов, Д.В. Прохоров. № 2010124793/28; заявл. 16.06.2010; опубл. 27.11.2012, Бюл. № 33. 10 с.: ил.
8. Патент 2511562, Российская Федерация. Генератор аэрозоля / М.С. Резников, А.Ш. Мингазов, В.Л. Гинзбург, А.И. Сидоров, О.В. Локшин, М.В. Луценко, В.В. Воробьёв. № 2012130672/11; заявл. 19.07.2012; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 10. 8 с.: ил.
9. Патент РФ № 2506530, «Боеприпас раздражающего действия»;
10. Патент 2481537, Российское Федерация. Патрон для дистанционного электрошокового устройства с частично изолированным токопроводом / А.И. Михайлин, А.М. Сильников, К.С. Кулаков, О.Г. Немтышкин. № 2011132531/11; заявл. 02.08.2011; опубл. 10.02.2013, Бюл. № 4. 4 с.

11. Патент 2477442, Российская Федерация. Снаряд дистанционного электрошокового устройства повышенной устойчивости / А.И. Михайлин, М.В. Сильнико в, А.Г. Халявицкий, С.Л. Кулаков. № 2011132537/11; заявл. 02.08.2011; опубл. 10.03.2013, Бюл. № 7. 4 с.

12. *Савин С.В.* «Полицейский карабин КС-23» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://sayga12.ru/карабин-специальный-кс-23-кс-23м-кс-23к/>. (дата обращения: 20.10.2017).

13. Машиностроение. Энциклопедия / ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. М.: Машиностроение. Стандартизация и сертификация в машиностроении. Т. 1-5 / Г.П. Воронин, Ж.Н. Будённая, И.А. Коровкин и др.; под общ. ред. Г.П. Воронина. 2-е изд., доп. 2002, 672 с., ил.

14. Конвенция о защите гражданского населения во время войны от 12 августа 1949 г. // СДД СССР. Вып. XVI. М. 1957. С. 204-280.

15. *Филипов А.* Случаи нападения с захватом заложников в России в 2008–2016 годах [Электронный ресурс]. РИА Новости. URL: <https://ria.ru/spravka/20160824/1475196692.html> (дата обращения: 12.10.2017).

16. *Андреев В.В., Гуськов А.В., Милевский К.Е., Слесарева Е.Ю.* Теория горения и взрыва: высокоэнергетические материалы: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во Юрайт, 2017. 323 с. Серия : Университеты России.

## КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ДЛЯ РАСЧЕТА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ СНАРЯДА

**А.К. Шахиджанов, В.В. Фарапонов, Н.П. Скибина, Н.В. Савкина**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: [alexeyshahidzhanov@gmail.com](mailto:alexeyshahidzhanov@gmail.com)

**Аннотация.** Настоящая работа посвящена разработке и реализации комплекса программ для расчета основных аэродинамических коэффициентов при обработке экспериментальных данных. Кинематические параметры движения твердого тела на лабораторной трассе могут быть получены из физического, либо численного экспериментов. Комплекс компьютерных программ был написан в среде программирования Delphi 7. Применение комплекса возможно для обработки как физического, так и численного экспериментов. Пример работы приведен для численного эксперимента. После проведения виртуального опыта, проводится визуализация положения тела на трассе, получение требуемых графических зависимостей и, по известным методикам, производится расчет коэффициента силы лобового сопротивления, коэффициентов подъемной силы и опрокидывающего момента.

**Ключевые слова:** аэродинамические коэффициенты; моделирование движения снаряда; баллистический эксперимент.

## SOFTWARE PACKAGE FOR CALCULATING THE AERODYNAMIC COEFFICIENTS OF A ROTATING PROJECTILE

**A. Shahidzhanov, V. Faraponov, N. Skibina and N. Savkina**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: [alexeyshahidzhanov@gmail.com](mailto:alexeyshahidzhanov@gmail.com)

**Abstract.** The present work is devoted to the development and implementation of a complex of programs for calculating the basic aerodynamic coefficients in the processing of ex-  
232

perimental data. The kinematic parameters of the motion of a body on a laboratory path can be obtained from physical or numerical experiments. The complex of computer programs was written in the Delphi 7 programming environment. The application of the complex is possible for processing both physical and numerical experiments. An example of this work is given for a numerical experiment. After conducting a virtual experiment, the body position is visualized on the track, the required graphic dependencies are obtained and, according to known techniques, the drag coefficient, lift factors and tipping torque are calculated.

**Keywords:** aerodynamic coefficients; simulation of projectile motion; ballistic experiment.

Целью настоящей работы является разработка и реализация комплекса программ для расчета основных аэродинамических коэффициентов при обработке экспериментальных данных. Классический баллистический метод может быть использован для определения всех основных аэродинамических характеристик, поскольку аэродинамические силы и моменты определяют траекторию движения снаряда. Например, изменение скорости центра масс позволяет измерить коэффициент лобового сопротивления, изменение поперечных координат центра масс модели при движении по трассе дает возможность найти коэффициент нормальной силы. Изменение углового положения снаряда позволяет судить об устойчивости модели и вычислить коэффициент опрокидывающего момента. Таким образом, регистрируя положение снаряда в пространстве через какие-то промежутки времени и определяя траекторию полета снаряда, можно получить исходную информацию для расчета аэродинамических характеристик. Для этого разработаны специальные методы математической обработки результатов экспериментов. Положения тела в пространстве могут регистрироваться путем измерений по фотографиям координат характерных точек тела и углов, либо обработкой пробоин на листах картона, с регистрацией при этом необходимых элементов движения вращающегося снаряда. Для реализации данной методики нахождения аэродинамических коэффициентов необходимо проводить опыты, которые занимают продолжительное время и требуют вложений материальных средств. На кафедре динамики полета ФТФ ТГУ используется комплекс компьютерных программ, разработанный Н.В. Савкиной в среде программирования Delphi 7. С его помощью возможен расчет параметров траектории пространственного движения осесимметричного тела в воздухе. Фактически, физический эксперимент можно заменить численным. Ранее Н.П. Скибиной был разработан и представлен «Аэродинамический калькулятор», с помощью которого проводилась обработка экспериментов по нахождению аэродинамического коэффициента силы лобового сопротивления. В представленном комплексе добавлены методики определения аэродинамических коэффициентов опрокидывающего момента и подъемной силы. Пример работы комплекса приведен для численного эксперимента. После проведения виртуального опыта проводится визуализация положения тела на трассе, подобно тем про-

боинам на картоне, которые получают при проведении баллистического эксперимента. Для вычисления аэродинамического коэффициента силы лобового сопротивления могут быть использованы 4 метода: метод, на основе закона изменения энергии поступательного движения центра массы снаряда; метод, основанный на интегрировании уравнения движения центра масс снаряда; метод с использованием функций Сиаччи; метод, с использованием регрессии на полиномах Чебышева. Для определения коэффициентов опрокидывающего момента был использован метод д4. Для подъемной силы - методика Пугачева. Виртуальный опыт позволил воспроизвести метание снаряда с необходимыми начальными возмущениями. Были получены необходимые графические зависимости, из которых можно найти все необходимые данные, для вычисления  $f_N$  по формуле [1], и  $K_m$  по формуле [2]. Погрешность полученных значений аэродинамических коэффициентов составляет не более 1 процента.

### Литература

1. Степанов В.П. Внешняя баллистика. Ч. 2. Томск., 2011. 540 с
2. Степанов В.П., Фараонов В.В. Внешняя баллистика. Некоторые вопросы баллистики ствольных систем. Томск.: 2001, 191 с.

## МОДЕРНИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА УТОЧНЕНИЯ ЭФЕМЕРИД НАВИГАЦИОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПО МЕЖСПУТНИКОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ОРТОГОНАЛЬНОГО ВИЗИРОВАНИЯ

Н.С. Цыремпилова, А.К. Гречкосеев, Т.А. Марарескул

АО «Информационные спутниковые системы им. академика М.Ф. Решетнева», Россия  
E-mail: voskhnatally@gmail.com

**Аннотация.** В данной статье рассматривается актуальная на данный момент задача по повышению точности навигационной информации, излучаемой космическими аппаратами. Изложены предложения по модернизации алгоритма уточнения эфемерид навигационных космических аппаратов (НКА) по межспутниковым измерениям. Вводится понятие ортогонального визирования. В статье представлено математическое описание метода. Приведен подробный вывод формул для определения положения ортогонального визирования НКА. Рассматриваются принципы применения метода ортогонального визирования с целью повышения точности расчета эфемеридной информации НКА. Описываются особенности применения метода, в том числе алгоритм поиска оптимальных пар НКА, находящихся в положении ортогонального визирования. Приведены результаты численного эксперимента в виде графиков.

**Ключевые слова:** ортогональное визирование, навигационный космический аппарат, межспутниковые измерения, трансверсаль, эфемеридная информация.

# MODERNIZATION OF THE EPHEMERIS ESTIMATION ALGORITHM OF NAVIGATION SATELLITES BY CROSSLINK SATELLITE MEASUREMENTS IN TERMS OF ORTHOGONAL VIEWING ALGORITHM

N. Tsyrempilova, A. Grechkoseev and T. Marareskul

JSR "Academician M.F. Reshetnev "Information satellite systems", Russian Federation  
E-mail: voskhnataly@gmail.com

**Abstract.** The present paper considers topical problem of the accuracy improving of navigation satellite information. The paper contains proposals for modernization of navigation satellite ephemeris correction algorithm using crosslink satellite measurements. The conception and mathematical description of orthogonal viewing method is introduced. The paper considers principles of orthogonal viewing using in navigation satellites accuracy increasing problems. The paper describes using features of the method and research algorithm of optimal pairs of satellites in orthogonal viewing positions. In the paper you can see numerical results of method using.

**Keywords:** orthogonal viewing, navigation satellite, crosslink satellite measurements, transversal, ephemeris information.

В настоящее время космические навигационные системы стали неотъемлемой частью человеческой деятельности. Повышение точности навигационной информации, излучаемой космическими аппаратами (НКА) является актуальной задачей. Одним из возможных путей ее решения является расчет поправок к опорным эфемеридам с использованием межспутниковых измерений (МСИ) дальностей и информационного обмена между НКА.

В данной работе изложены предложения по модернизации алгоритма уточнения эфемерид навигационных КА по межспутниковым измерениям [1; 2] путем периодического применения метода ортогонального визирования (ОВ) для снижения трансверсальной погрешности. Метод основан на геометрических свойствах орбитальной группировки (ОГ) навигационных систем [1] и функциональной зависимости дальности от параметров движения НКА [3].

Сущность этого метода состоит в уточнении эфемерид НКА в направлении наибольшей неопределенности, то есть в направлении большой полуоси эллипсоида ошибок (вдоль орбиты). При этом используются только те измерения дальности, которые были проведены в особые моменты времени, соответствующие ортогональному положению линии визирования относительно трансверсали реперного НКА. Этим достигается, с одной стороны, снижение влияния ошибок эфемерид реперного НКА, так как его эллипсоид ошибок сориентирован своей малой полуосью в этом направлении, а с другой стороны повышение наблюдаемости вариаций уточняемой эфемериды вдоль орбиты. Таким образом, для ортогонального визирования необходимо следующее условие:

$$\cos \theta_T^{ij} \approx 0.$$

Следовательно, в положении ортогонального визирования невязка не зависит от погрешности эфемерид  $j$ -го КА по трансверсали:

$$\delta D^{ij} = \cos \theta_S^{ij} \cdot S^i + \cos \theta_T^{ij} \cdot T^i + \cos \theta_W^{ij} \cdot W^i + \cos \theta_S^{ij} \cdot S^j + \cos \theta_W^{ij} \cdot W^j$$

Отсюда получается следующее выражение:

$$T^i(t_M) = \frac{\delta D^{ij}}{\cos \theta_T^{ij}} + \delta \varepsilon(t_M, j),$$

где  $\delta \varepsilon(t_M, j) = (\cos \theta_S^{ij} \cdot S^j + \cos \theta_W^{ij} \cdot W^j - \cos \theta_S^{ij} \cdot S^i - \cos \theta_W^{ij} \cdot W^i) / \cos \theta_T^{ij}$ ,  $t_M$  – момент ОБ,  $\delta D^{ij}$  – погрешность измерения взаимной дальности между парой  $(i, j)$  КА,  $\theta_S^{ij}$ ,  $\theta_T^{ij}$ ,  $\theta_W^{ij}$ ,  $\theta_S^{ij}$ ,  $\theta_T^{ij}$ ,  $\theta_W^{ij}$  – углы между линией визирования и радиус-вектором, трансверсалью и бинормалью  $i$ -го и  $j$ -го КА. Основное условие для ОБ:  $\cos \theta_T^{ij} \approx 0$ .

Таким образом, используются только те измерения дальности, которые были проведены в особые моменты времени, соответствующие ортогональному положению линии визирования относительно трансверсали реперного НКА.

Для решения этой задачи должна быть построена модель погрешности эфемерид по трансверсали, работоспособная на интервале в несколько витков. В качестве модели предлагается взять функцию, которая имеет физический смысл ухода КА по трансверсали из-за возмущений в начальных условиях движения и воздействия постоянной тяги по трансверсали

$$T_p(t) = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2 + A \sin \omega(t - t_0) + B \cos \omega(t - t_0),$$

где  $a_0, a_1, a_2, A, B$  – неизвестные коэффициенты,  $t \in [t_0, t_k]$ ,  $t_0, t_k$  – моменты времени, соответствующие первому и последнему положениям ортогонального визирования на мерном интервале.

Неизвестные коэффициенты могут быть найдены по методу наименьших квадратов, как решение системы условных уравнений, составленных для различных моментов ОБ на нескольких последовательных витках.

Для того чтобы достаточно точно определить момент ОБ, необходимо осуществлять поиск положений с мелким шагом. Однако из-за этого значительно понижается скорость расчетов. В связи с этим фактом предлагается использовать переменный шаг. После того, как положение ОБ найдено, шаг поиска снова принимает максимальное значение и продолжается аналогичный процесс поиска следующего положения ОБ.

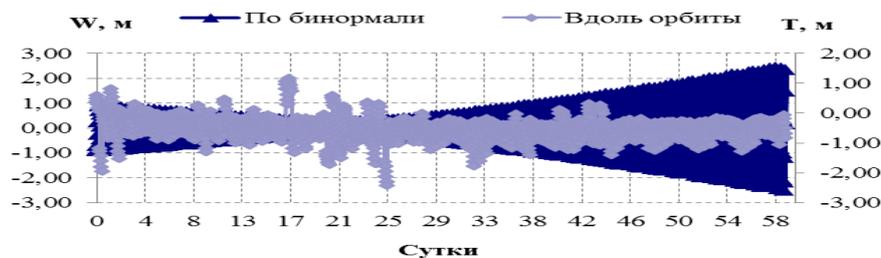


Рис. 1. Погрешности уточнения эфемерид методом ортогонального визирования по бинормали и вдоль орбиты на интервале 60 сут

Достижимый уровень точности коррекции эфемеридной информации по трансверсальной составляющей в рамках этого метода оценивается величиной ошибок по бинормали обоих НКА, между которыми проводятся измерения. Моделирование показало, что эта величина может достигать в среднем 3 м.

Метод прост в реализации и позволяет уточнять эфемеридную информацию по трансверсальному направлению в орбитальной системе координат. Кроме того, результаты его применения в виде оценки величины трансверсальной составляющей погрешности эфемерид могут быть использованы для контроля основного алгоритма в интересах повышения надежности решения задачи уточнения эфемерид НКА по МСИ.

#### Литература

1. Современные и перспективные информационные ГНСС-технологии в задачах высокоточной навигации / под ред. В.А. Бартенева, М.Н. Красильщикова. М.: Физматлит, 2014.
2. Цыремпилова Н.С. Методы уточнения эфемерид созвездия навигационных КА ГЛОНАСС по измерениям дальностей // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56. №6/3. С. 244–246.
3. Бартенев В.А., Гречкосеев А.К. Гарантированная оценка точности коррекции эфемерид ИСЗ по межспутниковым измерениям. М.: Радиотехника, 1998, №9.

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ТЕПЛЕРА В АЭРОФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

**М.А. Угольков, А.Н. Федотов, В.В. Фарапонов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: 7411umm@gmail.com

**Аннотация.** Эксперименты с движущимися телами проводятся на баллистических трассах, которые оснащаются разнообразной регистрационной и измерительной аппаратурой, построенной с элементами электроники, импульсной техники, техники высоких напряжений, оптики и т.д. Данная работа посвящена проблеме оснащения трассы кафедры динамики полета ФТФ устройством визуализации, в основу которого заложен прибор Теплера. Для излучающей и принимающей частей прибора использовали телескопы ТАЛ-100RS. Изготовлен нож Фуко и система синхронизации для импульсного источника света. В ходе проделанной работы предложены два способа получения кар-

тины обтекания тела на баллистической трассе. С использованием данного прибора получены картины обтекания тел, движущихся с околосвуковой скоростью.

**Ключевые слова:** визуализация, метод Теплера, аэробаллистика.

## THE APPLICATION OF THE THEPLER'S METHOD IN AEROPHYSICAL EXPERIMENTS

**M. Ugolkov, A. Fedotov and V. Faraponov**

National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: 7411umm@gmail.com

**Abstract.** Experiments with moving bodies are carried out on ballistic tracks, which are equipped with a variety of recording and measuring equipment, built with elements of electronics, pulse technology, high voltage technology, optics, etc. This article deals with the problem of equipping the ballistic track Department of Flight Dynamics with a visualization device based on the Thepler device. For the radiating and receiving parts of the device Telescopes TAL-100RS were used. A Foucault knife and a synchronization system for a pulsed light source were worked out and used. In the course of the investigation, two methods of obtaining a pattern of flow around body on a ballistic track were proposed. With the use of this device, patterns of flow around bodies moving with transonic velocity were obtained.

**Keywords:** visualizing, Thepler method, aeroballistics.

На кафедре динамики полета смонтирована баллистическая трасса с четырьмя блокирующими устройствами для изучения движения тел со скоростями до 400 м/с.

Была поставлена задача реализовать прибор Теплера для визуализации газодинамического обтекания при движении тела на этой трассе.

Проблема в реализации этого метода на баллистической трассе заключается в том, что исследуемый объект движется с околосвуковой или сверхзвуковой скоростью и для регистрации картины обтекания необходимо иметь в принимающей части прибора фотокамеру с достаточно большой частотой съемки. Например, дорогостоящая камера типа "Phantom" может визуализировать картину обтекания, при использовании постоянного источника света. Но использование столь дорогостоящей аппаратуры в лабораторных работах не эффективно. Есть и другой способ зафиксировать картину обтекания на фотокамере с гораздо меньшей частотой съемки. Используя импульсный источник света, можно добиться экспозиции одна микросекунда. Правда при этом будет получен только один снимок. Для получения такого снимка необходимо чтобы сигнал с одного из блокирующих устройства приходил на микроконтроллер. В микроконтроллере программно задана предварительно вычисленная задержка, включающая импульсный источник света в момент пролета пули в регистрационной зоне.

Для работы прибора Теплера необходим нож Фуко, который был сконструирован и изготовлен.

С использованием сконструированного прибора Теплера получены картины обтекания тел, движущихся с околосвуковой скоростью.

Секция 5  
**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ  
И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ**

---

---

**Session 5  
MATHEMATICAL AND PHYSICAL MODELING  
OF TECHNICAL AND NATURAL SYSTEMS**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ SCS-СИНТЕЗА**

**Р.Ф. Абдулханова, В.Г. Прокофьев**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: [roza-96a@mail.ru](mailto:roza-96a@mail.ru)

**Аннотация.** Предложена модель SCS-синтеза наночастиц металлов и оксидов металлов в для глицин-нитратной смеси. Построена математическая модель синтеза горения в растворе на основе нестационарной модели теплового взрыва по Н.Н. Семенову. Рассчитаны зависимости температуры горения от температуры муфельной печи и коэффициента теплоотдачи. С увеличением температуры печи и коэффициента теплопередачи время синтеза уменьшается. Получено хорошее согласие расчетных и экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** синтез горением в растворах, математическая модель, наноразмерные частицы, численное решение, время синтеза, нитрата никеля.

**MODELLING OF FLAME TEMPERATURE OF SOLUTION  
COMBUSTION SYNTHESIS**

**R. Abdulkhanova and V. Prokop'ev**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: [roza-96a@mail.ru](mailto:roza-96a@mail.ru)

**Abstract.** Nickel, an important hydrogenation catalyst, was successfully synthesized by Solution Combustion Synthesis (SCS) from a gel containing nickel nitrate and glycine at 500, 600, 650 and 700 °C. The combustion temperature of solution combustion reaction plays a significant role in phase formation and physical characteristics of the products and depends on various process parameters. The influence of the furnace's preheating temperature on the catalysts' composition is which indicates that increasing the preheating temperature results in increased nickel concentration in the final SCS product.

Following these observations, an attempt has been made to analytically model (using the Semenov method) and evaluate the influence of preheating temperature on the flame temperature as well as on the physico-chemical characteristics of the products. The numerical model-

ling showed that the system's combustion temperature (both calculated and experimental) is only slightly influenced by Temperature of furnace.

**Keywords:** combustion Solution Synthesis, mathematical model, nanoscale particles, numerical solution, synthesis time, nickel nitrate.

В теории и практике самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) сейчас интересны любые процессы типа горения, которые образуют твердофазные продукты. Одной из разновидностей СВС является синтез горением в растворах (SCS – Combustion Solution Synthesis). В этом методе материалы синтезируются в результате реакции окислительных реагентов с топливом путем растворения в воде, обеспечивая перемешивание на молекулярном уровне. Смесь затем нагревают либо на плите, либо в печи, испаряя воду. При достижении критической температуры, происходит воспламенение. Реакция горения протекает внутри сосуда, с образованием наноразмерных частиц оксидов металла или самого металла. Конечный продукт синтеза – это наноразмерные кристаллические частицы, имеющие большую удельную площадь поверхности и способные адсорбировать большое количество газа. В работе предложена физико-математическая модель процесса. Рассматривается реагирование смеси нитрата никеля с глицином в воде, представляющей собой гелеобразную массу. Смесь помещается в реакционный сосуд, который в свою очередь ставят в муфельную печь при определенной температуре. Математическая модель SCS-синтеза основана на нестационарной модели теплового взрыва по Н.Н. Семенову. При этом предполагается, что смесь однородная, конвективный перенос тепла отсутствует, образование и выход газообразных продуктов учитывается через изменение массы смеси в соответствии с кинетическим уравнением. Математическая модель уравнение теплового баланса и уравнение химической кинетики, для определения глубины превращения. В результате численного решения задачи рассчитаны зависимости времени синтеза от температуры печи и коэффициента теплопередачи. С увеличением температуры печи и коэффициента теплопередачи время синтеза резко уменьшается. Продукты синтеза остывают медленнее при более высокой температуре печи. Наименьшее время синтеза достигается при температуре печи равной 1300 К и составляет 55 секунд. Учет потери массы смеси на испарение и образование газообразных продуктов незначительно. Получено качественное и количественное совпадение с экспериментальными результатами. Рассмотрено решение задачи для системы с двумя параллельными реакциями и рассчитано время синтеза.

# ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПЛАТ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАГРУЗКАХ

**А.В. Азин**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: antonazin@niipmm.tsu.ru

**Аннотация.** В настоящее время электронные приборы и их компоненты становятся все более компактными. Для гарантии их надежной работы нужна разработка новых методов контроля. Наиболее актуально данное направление в производстве радиоэлектронной аппаратуры космической и военной техники.

В работе предложен подход для моделирования напряженно-деформированного состояния электронных плат (ЭП) и ее компонентов. Чтобы учесть все граничные условия и нагрузки, которые испытывает ЭП, необходимо рассмотреть два типа численных моделей: общую и локальную.

Общая модель отображает всю ЭП. Результатом решения является поле перемещений для всех узлов модели. Полученные данные по перемещениям используются в качестве начальных условий для локальной модели. Локальная модель отображает паяные соединения, содержащие дефект. Результатом решения является максимум интенсивности напряжений в каждом из рассмотренных случаев дефектного паяного соединения. Полученные результаты численного моделирования необходимы для оценки несущей способности дефектного паяного соединения и прогнозирования оставшийся срок эксплуатации ЭП в целом.

Оценка долговечности всей конструкции разрабатываемой ЭП является важным моментом в ее изготовлении. Если выявить на этапе проектирования недочеты в расположении компонентов, компания-изготовитель избежит значительные финансовые потери.

**Ключевые слова:** электронная плата, напряженно-деформированное состояние, паяное соединение, дефект.

## EVALUATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE PRINTED CIRCUIT BOARDS UNDER OPERATIONAL LOADS

**A. Azin**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: antonazin@niipmm.tsu.ru

**Abstract.** At present, electronic devices and their components are becoming more compact. To guarantee their reliable operation, the development of new control methods is required. This direction is most actual in the production of equipment for space and military applications.

The approach of modeling the stress-strain state of PCB and its components is proposed. Approach allows you to take into account the boundary conditions and loads. It is necessary to consider two types of numerical models: general and local.

The general model displays the entire PCB. The result of the solution is the displacement field for all model nodes. The obtained data on displacements are used as initial conditions for the local model. The local model displays soldered joints containing a defect. The result of the solution is the maximum stress intensity in each of the cases of the defective soldered joint. The obtained results of numerical simulation are necessary for estimating the bearing capacity of the defective soldered joint and predicting the remaining life of the PCB.

Durability evaluation of the whole designed PCB configuration is a key aspect in its production. If defects in component layout are identified in the design phase, the producer company could avoid significant financial losses.

**Keywords:** printed circuit board, stress-strain state, solder joint, defect.

Совершенствуя технологии для удобства и комфорта жизнедеятельности, человек создает новые виды техники, которые более эргономичны и обладают большим количеством функций по сравнению с предшественниками. Этот процесс ведет к минимизации элементов, созданию новых материалов и электронной компонентной базы. Поскольку электронные приборы и их компоненты становятся все более компактными, для гарантии их надежной работы нужна разработка новых методов контроля. Наиболее актуально данное направление в производстве радиоэлектронной аппаратуры космической и военной техники.

Результаты проведенных исследований указывают на необходимость разработки метода испытания электронных плат (ЭП), позволяющий выявить, локализовать и определить степень опасности латентных дефектов в конструкции ЭП на основе расчетов напряженно-деформированного состояния (НДС) их элементов с учетом сложных реологических свойств материалов и характера вероятных нагрузок.

Нагрузки, которые испытывает ЭП при работе в составе оборудования, могут иметь разную природу. Так, например, для аппаратуры космического аппарата эксплуатационными нагрузками считаются: квазистатические нагрузки с ускорением до  $\pm 25$  g; вибрационные нагрузки в диапазоне частот от 5 Гц до 2000 Гц; ударные нагрузки в диапазоне частот от 35 Гц до 10000 Гц; термоциклирование в диапазоне от минус 55 °С до плюс 125 °С.

В ходе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана концепция поиска и выявления наиболее опасных дефектов в конструкции ЭП при совместном применении методов акустической эмиссии (АЭ) и рентгеновской томографии (РТ) [1, 2]. Применение АЭ позволяет определить область на плате, где развивается опасный дефект; а РТ позволяет уточнить местоположение дефекта и определить его геометрические размеры.

Для прогнозирования ресурса ЭП необходимо провести численный анализ НДС ЭП при эксплуатационных нагрузках. Для того чтобы учесть все граничные условия и нагрузки, которые испытывает паяные соединения компонентов ЭП, необходимо рассмотреть два типа численных моделей: общую и локальную.

Общая модель отображает всю ЭП (рис. 1). Модель содержит: печатную плату, контактные площадки на печатной плате и на подложке микросхемы, подложку, микросхему, массив паяных соединений. На модель накладываются граничные условия – аналогично фиксации ЭП в составе аппаратуры. Результатом решения является поле перемещений для всех узлов модели. Полученные данные по перемещениям будут использоваться в качестве начальных условий для локальной модели.

Локальная модель отображает паяное соединение, содержащее дефект (рис. 2). Модель создается для каждого случая дефектного паяного соединения, обнаруженного при совместном применении методов АЭ и РТ. Модель содержит: печатную плату, контактные площадки, подложку, микросхему, паяное соединение с дефектом. Задаются начальные и граничные условия. Результатом решения является максимум интенсивности напряжений в каждом из рассмотренных случаев дефектного паяного соединения. Полученные результаты численного моделирования используются для оценки несущей способности дефектного паяного соединения. Оставшийся срок эксплуатации ЭП определяется с помощью функции повреждаемости материала В.В. Москвитина [3].

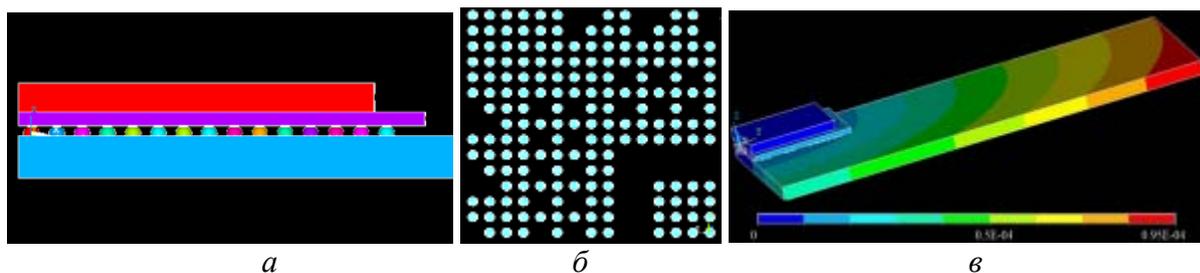


Рис. 1. Общая модель: *а* – общий вид; *б* – массив паяных соединений; *в* – результаты моделирования.

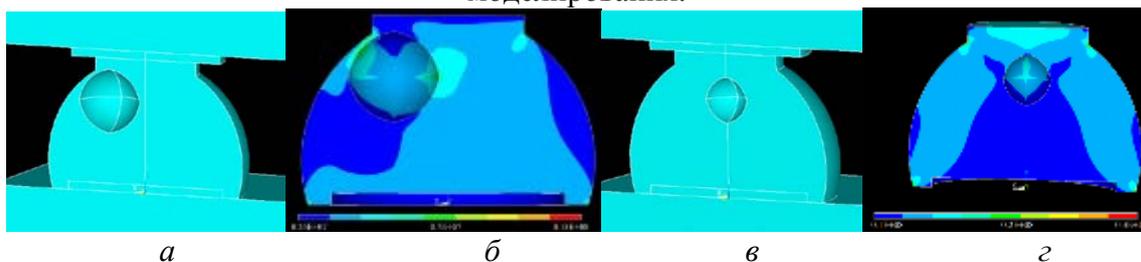


Рис. 2. Локальная модель: *а, б* – первый случай; *в, г* – второй случай дефектного паяного соединения.

По результатам проведенных исследований разработан подход для моделирования НДС ЭП и ее компонентов. Данный подход позволяет оптимизировать процесс моделирования конструкции ЭП и учесть все граничные условия и нагрузки, которые испытывает ЭП при эксплуатации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16–38–00743 мол\_а.

## Литература

1. Azin A. The applicability of acoustic emission method to modeling the endurance of metallic construction elements / A Azin, S V Ponomarev, S Rikkonen, A Karavatskiy, N Maritskiy, S A Ponomarev // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2015. T. 71. 6 p. DOI:10.1088/1757-899X/71/1/012056. URL: [http:// iopscience.iop.org/1757-899X/71/1/](http://iopscience.iop.org/1757-899X/71/1/).

2. Азин А.В. Разработка концепции поиска и выявления наиболее опасных дефектов в конструкции электронных плат при совместном применении методов акустической эмиссии и рентгеновской томографии / А.В. Азин, А.А. Жуков, В.Н. Лейцин, А.С. Нарикович, С.А. Пономарев, С.В. Пономарев: Сборник трудов IX всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», 2016. С. 276–278.

3. Azin A. Durability evaluation method for contact component interconnections in printed circuit boards under thermal loads / A. Azin, Andrey A. Zhukov, S. Ponomarev, S.V. Ponomarev // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1899, no. 060015. URL: <https://doi.org/10.1063/1.5009886>

## ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕННОЙ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ НА КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ЗАМКНУТОЙ ЧАСТИЧНО ПОРИСТОЙ ОБЛАСТИ С ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ

М.С. Астанина, М.А. Шеремет

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: [astanina.marina@bk.ru](mailto:astanina.marina@bk.ru)

**Аннотация.** Проведено численное моделирование естественной конвекции в замкнутой частично пористой полости с тепловыделяющим теплопроводным источником на нижней стенке. Вертикальные стенки полости – адиабатические, горизонтальные стенки поддерживаются при постоянной температуре охлаждения. Область решения задачи заполнена жидкостью, вязкость которой зависит от температуры по экспоненциальному закону. Математическая модель, сформулированная в безразмерных переменных «функция тока – завихренность – температура», разрешена на основе метода конечных разностей. Особое внимание было уделено анализу влияния переменной вязкости на режимы конвективного теплопереноса. Были получены распределения линий тока и изотерм в полости, а также значения среднего числа Нуссельта, средней температуры внутри тепловыделяющего элемента и интенсивности течения внутри полости. Результаты показали, что изменение вязкости может приводить к интенсификации теплопереноса, что способствует лучшему отводу энергии от источника.

**Ключевые слова:** естественная конвекция; пористая среда; тепловыделяющий элемент.

# EFFECT OF FLUID TEMPERATURE-DEPENDENT VISCOSITY ON CONVECTIVE HEAT AND MASS TRANSFER IN A PARTIALLY POROUS ENCLOSURE WITH A HEAT-GENERATING ELEMENT

M. Astanina and M. Sheremet

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: astanina.marina@bk.ru

**Abstract.** Numerical simulation of natural convection in a partially porous enclosure with a heat-generating and heat-conducting source on the bottom wall is carried out. The horizontal walls of the cavity are adiabatic, while the vertical walls are kept at constant temperatures. The solution area of the problem is filled with a fluid whose viscosity depends on the temperature according to an exponential law. The mathematical model is formulated in the dimensionless variables such as "stream function – vorticity – temperature". Specific attention was paid to the analysis of the variable viscosity effect on the convective heat transfer modes. Distributions of the streamlines and isotherms in the cavity, as well as the average Nusselt number, average temperature inside the heater, and the fluid flow rate in the cavity were obtained. The results showed that a change in viscosity can lead to an intensification of the heat transfer that contributes to a better heat removal from the source.

**Keywords:** natural convection; porous layer; heat-generating source.

Конвекция как один из основных механизмов переноса энергии довольно часто встречается в технологических и природных системах. Одним из важнейших направлений является охлаждение элементов радиоэлектронной аппаратуры и электронной техники.

В работе рассмотрен процесс конвективного теплопереноса в замкнутой полости с изотермическими вертикальными и адиабатическими горизонтальными стенками, заполненной ньютоновской теплопроводной жидкостью, вязкость которой зависит от температуры, при наличии теплопроводного тепловыделяющего источника конечных размеров. Исследуемая полость включает пористую вставку конечной толщины.

Уравнения, описывающие гидродинамику и теплоперенос, были сформулированы в безразмерных переменных «функция тока – завихренность – температура» и решены с соответствующими начальными и граничными условиями методом конечных разностей на равномерной сетке.

Рассмотрено влияние зависящей от температуры вязкости жидкости на гидродинамику и теплоперенос, а именно: влияние параметра изменения вязкости в рассматриваемом экспоненциальном законе. Были получены распределения изолиний функции тока и температуры в полости, а также зависимости максимальных значений функции тока в полости, среднего числа Нуссельта и средней температуры внутри тепловыделяющего элемента от определяющих характеристик. Результаты показали, что варьирование параметра изменения вязкости значительно влияет на теплоперенос,

а именно: увеличение данного параметра приводит к усилению течения в полости и лучшему охлаждению источника энергии.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-20141).

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ МЕЗООБЪЕМОВ МРАМОРА**

**А.Ж. Ахметов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия

E-mail: ayan.akhmetov93@gmail.com

**Аннотация.** На основе численного моделирования проведен анализ влияния неоднородной структуры образцов горных пород на примере мрамора на процесс накопления неупругой деформации и рост областей разрушения при механическом нагружении разного типа. Выявлено, что наличие пор и зёрненной структуры мрамора влияют на формирование картины разрушения и локализацию пластических деформации в изучаемых мезообъемах. Полученные результаты согласуются с развиваемыми представлениями о горных породах, как многомасштабных иерархических системах, и могут быть использованы для оценки прочностных свойств мраморов разного типа и других горных пород.

**Ключевые слова:** неупругая деформация, разрушение, модель Друкера – Прагера – Николаевского, мрамор, зерна, численное моделирование.

## **NUMERICAL SIMULATION OF NON-ELASTIC DEFORMATION AND FRACTURE OF THE MARBLE'S MESOVOLUME**

**A. Akhmetov**

National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: ayan.akhmetov93@gmail.com

**Abstract.** On the base of numerical simulation the analysis of the influence of heterogeneous structures of the rock's samples by the example of marble on the process of non-elastic strain accumulation and fracture zones propagation under mechanical loading of different types was performed. It was determined that availability of pores and grain structure in marble affect the formation of patterns of fracture and plastic strain localization in studied mesovolumes. The obtained results are in a good agreement with developed concepts of rock samples as multiscale hierarchical systems and can be used for estimation of the structural behaviors of the marbles of different types and other rocks.

**Keywords:** non-elastic strain, fracture, Drucker – Prager – Nikolaevski model, marble, grains, numerical simulation.

Изучение общих закономерностей эволюции напряженно-деформированного состояния, накопления неупругой деформации и раз-

рушения, а также влияния на эти процессы неоднородности структуры горных пород является не только фундаментальной задачей, но и имеет большое прикладное значение. Горные породы представляют собой иерархически организованные среды и поэтому для изучения их деформации и разрушения необходимо проводить исследования на разных масштабах, включая мезоуровень, на котором явно выделяют элементы внутренней структуры [1].

В качестве объекта исследования был выбран мрамор. Мрамор широко применяют для изготовления памятников и архитектурных сооружений. Поэтому особенности его разрушения в разных условиях нагружения представляют интерес.

Были созданы структурные модели мрамора, в которых варьируются концентрации пор, расположение зёрен и размеры мезообъемов. Поры и зерна являются структурными элементами мезообъемов, обладающими разными физико-механическими свойствами.

Для моделирования деформирования рассматриваемых мезообъемов использованы уравнения механики деформируемого твердого тела и определяющие соотношения упругопластической среды с неассоциированной моделью Друккера – Прагера – Николаевского [1]. Для описания разрушения использован комбинированный критерий, основанный на критических значениях накопленных неупругих деформаций и растягивающих напряжений. Для численного решения задачи использован конечно-разностный метод Уилкинса [2].

Расчёты выполнены в квазистатической постановке для двух видов нагружения: одноосное сжатие в стеснённых условиях и комбинация простого сдвига со сжатием.

Выявлено, что поры не всегда являются основными очагами разрушения. В мезообъёме мрамора с высокой пористостью очаги разрушения появляются около пор, затем вокруг областей разрушения начинает зарождаться пластическая деформация. В объёме без пор сначала накапливаются неупругие деформации в зёрнах со слабыми прочностными свойствами, а только потом в местах наибольшей концентрации неупругой деформации появляются области разрушения.

Указанные особенности могут быть полезны для анализа влияния структурных неоднородностей на особенности разрушения горных пород и других квазихрупких материалов в условиях механических нагрузок.

## Литература

1. Макаров П.В., Смолин И.Ю., Стефанов Ю.П. Нелинейная механика геоматериалов и геосред. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2007. 235 с.
2. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С. 212–263.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СХЕМ ОБРАБОТКИ ОБРАЗЦОВ ИЗ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА

**Л.Р. Ахметшин, В.А. Красновейкин, Е.Н. Москвичев**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: this\_is\_patrik@mail.ru

**Аннотация.** В работе с использованием методов численного моделирования решалась задача определения напряженно-деформированного состояния образцов из листового алюминиевого проката при обработке интенсивной пластической деформацией. Для реализации интенсивной пластической деформации в плоских образцах предложено использовать метод прессования рифлением. Оснастка пресс-формы имеет зубья в виде полуцилиндров. Данная форма зубьев предложена как альтернатива классическому исполнению оснастки для прессования рифлением с трапецеидальными зубьями. Величина накопленной пластической деформации после одного цикла прессования рифлением соизмерима с равноканальным угловым прессованием. Это может быть предпосылкой к изменению внутренней структуры обработанных плоских образцов и как следствие изменения их физико-механических свойств. Оценены величины реактивных усилий для режимов прессования при разных температурах. Указаны преимущества разработанной оригинальной оснастки перед классическим исполнением.

**Ключевые слова:** механические свойства, численное моделирование, прессование рифлением.

## NUMERICAL SIMULATION OF PERSPECTIVE TREATMENT SCHEMES OF SPECIMENS FROM SHEET PRODUCT

**L. Akhmetshin, V. Krasnoveikin and E. Moskvichev**

National research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: this\_is\_patrik@mail.ru

**Abstract.** In work with the use of methods of numerical modeling was solved the problem of determining of stress-strain state of specimens of sheet metal during processing intense plastic deformation. For the realization of intensive plastic deformation of flat samples it is proposed to use the method of pressing the groove. The tooling of the mold has cogs in the form of half-cylinders. This form of cogs is offered as an alternative to the classical execution of a tool for pressing with groove with trapezoidal cogs. The value of the accumulated plastic deformation after one cycle of groove pressing is commensurable with equal-channel angular pressing. This may be a prerequisite for changing the structure of their physico-mechanical properties. Values of reactive forces was estimated for the pressing regime at different temperatures. The advantages of the developed original rig before the classical execution are indicated.

**Keywords:** numerical simulation, severe plastic deformation, constrained groove pressing, mechanical properties.

Обработка листового проката из конструкционных алюминиевых сплавов методами прессования рифлением зарекомендовала себя как перспективный подход для изменения внутренней структуры материалов и изменения их физико-механических свойств. Классическая оснастка для реализации прессования рифлением представлена в виде пресс-форм с зубьями трапецеидального профиля. Суть метода заключается в попеременном прессовании и выпрямлении плоских образцов. Один цикл обработки состоит из четырех этапов, в которых образец прессуется между двух рифленых половинок пресс-формы, выпрямляется между плоскими половинками, после смещения образца относительно наклонных площадок зубьев повторяется рифление и выпрямление. Подразумевается, что после одного цикла прессования образец испытывает равномерную обработку по всему объему. За счет сдвига в локальных областях пластины реализуются большие степени пластических деформаций. Большие степени пластических деформаций в области сдвига способствуют изменению внутренней структуры образцов и изменению их физико-механических свойств.

Однако в классической схеме прессования рифлением есть некоторые недостатки. В области сгиба возникает концентраторы напряжений и как следствие дефект в виде поперечных канавок. Данный дефект нередко становится причиной роста поперечных трещин, ведущих к фрагментации обрабатываемой пластины.

В работе предлагается альтернатива классической оснастке с зубьями трапецеидального профиля. Новая пресс-форма имеет зубья в виде полуцилиндров. Сглаженный профиль зубьев должен исключать появление поперечных канавок, и уменьшаться риск образования трещин.

Для подготовки оснастки пресс-форм нового типа используется численное моделирование. При выборе оптимальных размеров создаваемой оснастки проводится анализ численных результатов, при котором необходимо оценить напряженно-деформированное состояние плоских образцов при обработке и силу реакции опоры при смещении верхней половинки относительно нижней. Численное моделирование деформирования плоских образцов между двух рифленых половинок пресс-формы проведено с использованием метода конечных элементов. Решалась система дифференциальных уравнений механики сплошных сред для плоскодеформируемого состояния. Механическое поведение образцов из алюминиевого сплава 1560 описывалось упруго-пластической билинейной постановкой при различных температурах.

В результате численного моделирования оценены степени накопленной пластической деформации на этапах рифления и выпрямления, получена зависимость изменения реактивного усилия при прессовании от толщины обрабатываемого плоского образца. Оценка напряженно-деформированного состояния образцов свидетельствует о возможности изменения внутренней структуры материала в процессе прессования. Ве-

личина накопленной пластической деформации после одного цикла прессования рифлением соизмерима с равноканальным угловым прессованием объемных образцов. Установлено, что оптимальные режимы прессования достигаются при повышенных температурах близких к 250 °С. Напряжения, возникающие при обработке алюминиевого образца, не превышают критических величин. Указаны преимущества разработанной оригинальной оснастки перед классическим исполнением. Даны рекомендации по выбору размеров для изготовления оснастки пресс-формы с зубьями в виде полуцилиндров исходя из возможностей прессов.

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ РАЗГОНА ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРОДУКТАМИ ВЗРЫВА ЗАРЯДОВ СФЕРИЧЕКОЙ ФОРМЫ**

**К.М. Абузяров, М.Х. Абузяров, А.В. Кочетков**

Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского  
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Россия  
E-mail: abouziar@mech.unn.ru

**Аннотация.** Численно моделировались трехмерные процессы разгона деформируемых упругопластических тел продуктами детонации твердого взрывчатого вещества сферической формы. Моделирование производилось с помощью авторского 3D программного комплекса, основанного на модифицированной схеме С.К. Годунова повышенной точности, единой как для решения уравнений гидро-газодинамики так и упругопластических течений, с использованием базисной декартовой неподвижной сетки и локальных подвижных сеток, связанных с поверхностями тел. Показано существенное влияние формы, деформирования и положения тела относительно заряда на его разгон.

**Ключевые слова:** трехмерная газодинамика, численное моделирование, детонация, схема Годунова, деформируемое твердое тело, метод расщепления упругопластических течений.

## **NUMERICAL SIMULATION OF THREE-DIMENSIONAL PROCESSES OF THE ACCELERATION OF DEFORMABLE SOLIDS BY PRODUCT OF EXPLOSION OF SPHERICAL CHARGES**

**K. Abuziarov, M. Abuziarov and A. Kochetkov**

Research Institute of Mechanics of the National Research Nizhny Novgorod State University.  
N.I. Lobachevsky, Russian Federation  
E-mail: abouziar@mech.unn.ru

**Abstract.** Three-dimensional processes of acceleration of deformable elastoplastic bodies by the products of detonation of a solid explosive of spherical shape were simulated numerically. The modeling was carried out with the help of the author's 3D software package, based

on the modified Godunov's high order accuracy scheme, unified for solving the equations of hydro-gas dynamics and elastoplastic flow, using a basic Cartesian fixed grid and local moving grids associated with the surfaces of bodies. A significant influence of the shape, deformation and position of the body relative to the charge on its acceleration is shown.

**Keywords:** three-dimensional gas dynamics, numerical simulation, detonation, Godunov's scheme, deformable solid, splitting method of elastoplastic flows.

Моделирование процессов взаимодействия деформируемых твердых тел с ударно-волновыми нагрузками, возникающими при детонации взрывчатых веществ, актуально в науке и технике. При решении таких задач необходимо учитывать процессы инициирования и распространения детонации в твердых ВВ с генерацией ударных волн расширяющимися продуктами взрыва и последующим взаимодействием с конструкциями и их значительным деформированием и перемещением. Решение таких задач даже в упрощенных постановках возможно только численно и требует значительных вычислительных ресурсов. В данной работе для моделирования этих процессов используется разработанный авторами трехмерный комплекс, созданный на базе методики, предложенной в [1]. Эта методика основана на использовании трех видов различных сеток. Это сетки в виде наборов треугольников (STL файлов), задающие поверхности взаимодействующих тел и отслеживающие эти поверхности в процессе решения, базовая декартова неподвижная сетка для каждого тела, вложенная в него, и локальных подвижных сеток, привязанных к каждому треугольнику поверхности. Для решения уравнений Эйлера газодинамической части и Эйлера-Коши для упругопластических течений используется модификация разностной схемы С.К. Годунова повышенной точности [2]. Для описания процесса распространения детонации используется обобщенная на 3D случай лучевая модель (time dependent) детонации [3]. Контактная граница продукты детонации – воздух не выделяется и для продуктов детонации и воздуха используется единое уравнение состояния типа JWL [3], для упругого поведения материала обобщенный закон Гука, учет пластического поведения материала происходит в соответствии с [4], упрочнение считается изотропным.

На рис. 1 показана постановка задачи. Заряд ВВ ТГ36/64 сферической формы радиусом 3.24 см, начальная детонация задавалась в центральной области заряда радиусом 1 см. По заряду и соответственно воздуху (темно синий цвет) основная сетка задавалась со стороны кубической ячейки 0.2 см. Красным отмечены три стальных кубика со стороной 1 см, материал - сталь 30, соответственно масса 7.8 г. Шаг основной сетки по кубикам 0.07 см. Изображаемое сечение проходит через центр заряда и центры кубиков. Рассматривался также разгон тел цилиндрической формы диаметром 1 см, расположенные в тех же точках.

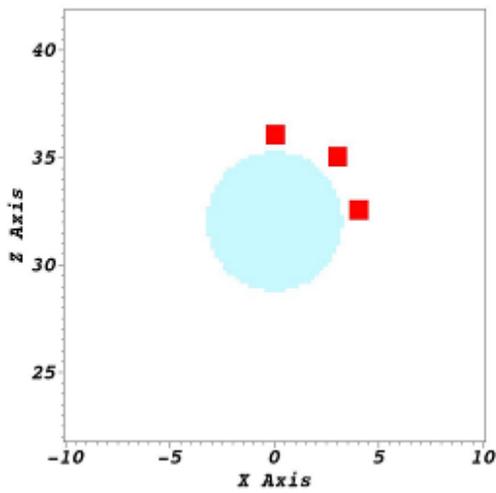


Рис. 1

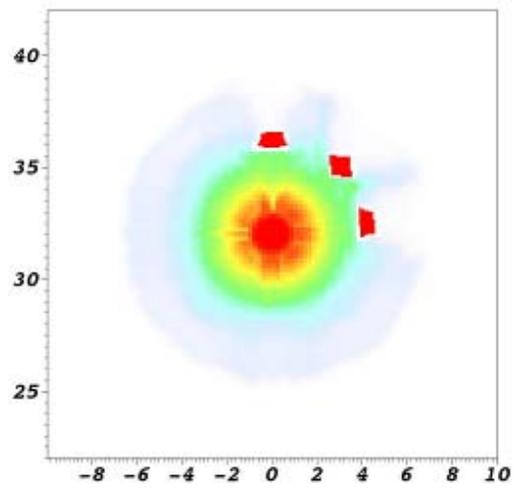


Рис. 2

На рис. 2 приведено распределение плотности на момент 45 мкс, на рис. 3 показаны поверхности кубиков, соответственно в начальный момент и на 45 мкс. Кубики сильно и необратимо упругопластически деформируются, потоки продуктов детонации движутся существенно быстрее, формируются газовые струи, обтекающие кубики.

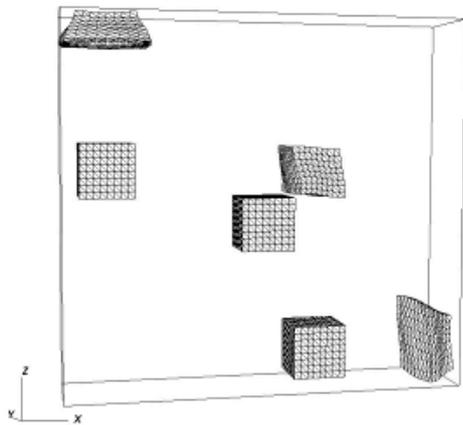


Рис. 3

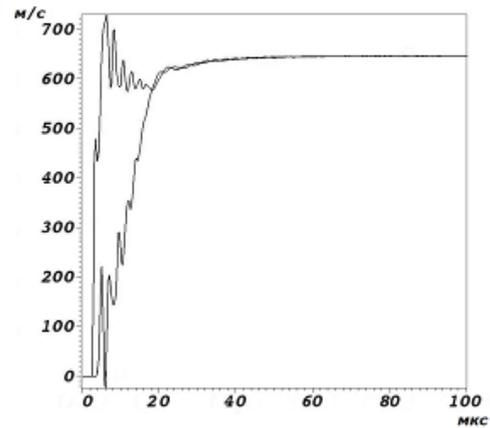


Рис. 4

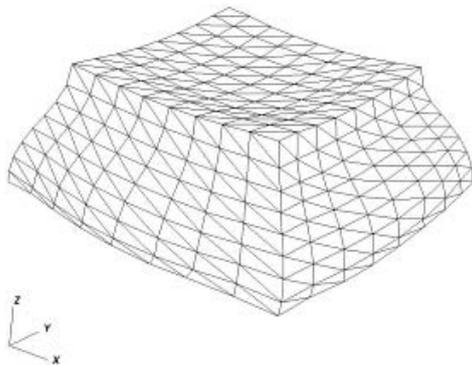


Рис. 5

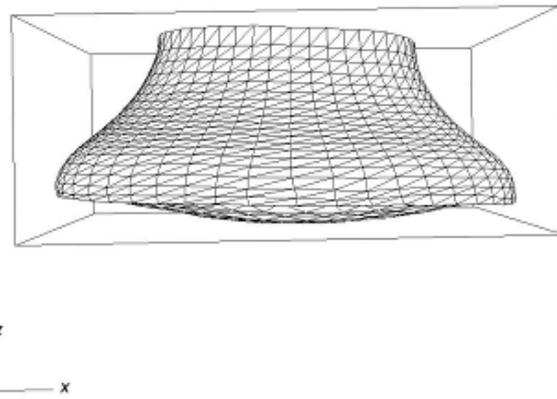


Рис. 6

На рис. 4 приведена скорость в зависимости от времени на поверхности кубика, разгоняемого в вертикальном направлении, нижняя кривая соответствует центру верхней (дальней от заряда) поверхности, соответственно верхняя кривая – центру нижней (ближней к заряду) поверхности кубика. На рис 5, 6 показаны поверхности кубика и цилиндра, разгоняемых в вертикальном направлении.

Выявлены следующие закономерности процесса разгона стальных кубиков и цилиндров для данного ВВ при такой геометрии и взаимном расположении сферического заряда и стальных кубиков и цилиндров: во-первых, процесс разгона стальных кубиков и цилиндров продуктами взрыва длится порядка 15 мкс и происходит на расстоянии до 1.5 радиуса ВВ; во-вторых, максимальные остаточные деформации тела получают до 8 мкс, размеры тел в направлении движения при этом сокращаются до двух раз, а площадь поперечного сечения возрастает до четырех раз, что существенно влияет на процесс разгона; в-третьих, начальная геометрия и положение тел по отношению к детонационной волне существенно влияют на скорость и процесс деформирования, тело в форме куба ускоряется до 640 м/с, что на 20% больше скорости цилиндра той же массы; в-четвертых, скорость продуктов детонации достигает максимума и устанавливается на расстоянии до 2 радиусов заряда и для данного ВВ достигает 6200 м/с, что, практически, на порядок превосходит скорость разгоняемых тел и соответствует известным экспериментальным данным.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов: № 17–308–50008 мол нр, № 16–08–00458\_a.

### Литература

1. *Abuziarov K.M., Abuziarov M.H., Kochetkov A.V.* 3D fluid structure interaction problem solving method in euler variables based on the modified godunov scheme // *Materials physics and mechanics*. Vol. 28, No 1/2, 2016. P. 1–5.
2. *Abouziarov M., Aiso H.* An application of retroactive characteristic method to conservative scheme for structure problems (elastic-plastic flows) // *Hyperbolic Problems, Theories, Numerics, Applications*. Tenth International Conference in Osaka. September 2004, Copyright 2006 by Yokohama Publishers, Inc. P. 223-230.
3. *Физика взрыва / под ред. Л.П. Орленко.* Т. 1. 3-е изд. М.: Физматлит, 2002. 832 с.
4. *Кукуджанов В.Н.* Метод расщепления упругопластических уравнений // *Изв. РАН МТТ* 2004. №1. С. 98–108.

# ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛОМАС-СОПЕРЕНОСА В СИСТЕМЕ, СОДЕРЖАЩЕЙ МАТЕРИАЛ С ИЗМЕНЯЕМЫМ ФАЗОВЫМ СОСТОЯНИЕМ, С ИСТОЧНИКОМ ПОСТОЯННОГО ОБЪЕМНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ

**Н.С. Бондарева**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: R0dniki@mail.ru

**Аннотация.** Данная работа посвящена численному исследованию сопряженного конвективного теплопереноса в системах, содержащих кремниевый элемент постоянного объемного тепловыделения, металлический теплорассеивающий профиль с ребренной поверхностью, соприкасающейся с материалом с изменяемым фазовым состоянием. Было численно проанализировано влияние частоты расположения ребер на режимы конвективного плавления парафина. Получены гидро- и термодинамические характеристики процесса на разных стадиях плавления. Проведена оценка времени, затрачиваемого на полное расплавление парафина в зависимости от частоты расположения ребер профиля.

**Ключевые слова:** естественная конвекция, плавление.

## NUMERICAL INVESTIGATION OF CONJUGATE HEAT TRANSFER IN SYSTEM CONTAINING PHASE CHANGE MATERIAL WITH SOURCE OF CONSTANT VOLUME HEAT GENERATION

**N. Bondareva**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: R0dniki@mail.ru

**Abstract.** Present study is devoted to numerical investigation of conjugate convective heat transfer in systems containing silicon source of constant volume heat generation, metal profile with fins and phase change material. The influence of frequency of fins arrangement on convective melting regimes was analyzed numerically. Hydro and thermodynamic characteristics of the considered process in different stages of melting were received. Evaluation of time, spent on complete melting depending on the location frequency of fins, was analyzed.

**Keywords:** natural convection, melting.

В настоящее время задача охлаждения и теплоотведения является одной из наиболее актуальных задач электронной техники. К пассивным системам охлаждения можно отнести системы на основе материалов с изменяемым фазовым состоянием. Экспериментально было показано, что использование таких материалов позволяет поддерживать температуру устройства на низком уровне в течение долгого времени, благодаря высокой скрытой энергии плавления. В электронике в качестве таких материалов используются парафины, температуры плавления которых лежат в диапазоне

от 20 до 70°. Для усиления теплоотдачи от источника к парафину используются теплорассеивающие профили, как правило, изготовленные из медных или алюминиевых сплавов. Изменение формы профиля позволяет регулировать скорость плавления материала. При большом объеме расплавленного материала значительную роль играет конвективный теплоперенос. Изменение формы профиля отражается на режимах гидродинамики и теплопереноса. Поэтому комплексное взаимодействие естественного конвективного теплопереноса и процесса плавления в условиях постоянной подачи энергии требует детального численного исследования.

В работе рассматривается двумерная задача тепломассопереноса в системе, содержащей материал с фазовым переходом «твердое тело – жидкость», кремниевый источник постоянного объемного тепловыделения и расположенную между материалом и источником медную подложку с ребристой поверхностью. В начальный момент времени температура во всей системе была равна температуре окружающей среды. Численный анализ был проведен для случаев с разной частотой ребрения медной пластины.

Математическая модель для данной задачи была сформулирована в виде системы уравнений Навье – Стокса в безразмерных преобразованных переменных функция тока, завихренность и температура. Общее уравнение энергии для твердой и жидкой фаз было записано с учетом скрытой энергии плавления в энтальпийной форме, при этом скачок энтальпии на границе фазового перехода был сглажен с помощью функции, зависящей от температуры, линейно возрастающей от 0 до 1 при переходе из твердого материала в расплав. Дифференциальные уравнения были решены с использованием метода конечных разностей на равномерной сетке. Уравнение сохранения энергии и уравнение дисперсии вихря были решены с использованием локально-одномерной схемы Самарского. Разностное уравнение Пуассона для функции тока было решено методом последовательной верхней релаксации.

Медь имеет высокую теплопроводность, поэтому с нагреванием источника энергия быстро распространяется по медной вставке. Парафин имеет более низкую теплопроводность, поэтому градиент температуры на поверхности теплорассеивающего профиля резко возрастает до того момента, пока материал на поверхности не расплавится. Далее с удалением межфазной границы от поверхности профиля число Нуссельта растет медленней. Доминирующим механизмом переноса энергии на начальном этапе плавления материала является теплопроводность. Увеличение объемной доли расплава способствует возникновению и усилению конвективного теплопереноса. Увеличение пространства, занимаемого расплавом, приводит к доминирующему режиму естественной конвекции. При этом форма и размер ребрения существенно сказываются на динамике течений, следовательно, и на режиме плавления материала.

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Минобрнауки России (задание № 13.9724.2017/8.9).

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАТОРОШЕННОГО ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА НА ПАРАМЕТРЫ ИЗГИБНО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ОТ ДВИЖЕНИЯ ПОДВОДНОГО СУДНА**

**Н.О. Баурин, В.Л. Земляк, К.И. Ипатов, С.В. Радионов**

**Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема, Россия**  
E-mail: vellkom@list.ru

**Аннотация.** Работа посвящена экспериментальному исследованию деформированного состояния заторошенного ледяного покрова от движения подводного судна вблизи его нижней поверхности. Эксперименты проводились в ледовом опытовом бассейне. Модель ледяного покрова приготавливалась путем естественного намораживания льда заданной толщины. Заторошенные участки моделировались путем вмораживания полос льда в ледяное поле. Экспериментальные исследования показывали, что распространение изгибно-гравитационных волн в ледяном покрове и эффективность его разрушения в значительной степени зависят от количества торосов, их размера и местоположения по отношению к траектории движению подводного судна. Выявлены режимы движения, при которых разрушение льда было наиболее интенсивно.

**Ключевые слова:** подводное судно, лед, изгибно-гравитационные волны.

## **THE RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE HUMMOCKED ICE COVER ON THE PARAMETERS OF FLEXURAL-GRAVITATIONAL WAVES FROM THE MOTION OF A SUBMARINE VESSEL**

**N. Baurin, V. Zemlyak, K. Ipatov and S. Rodionov**

**Sholom-Aleichem Priamursky State University, Russian Federation**  
E-mail: vellkom@list.ru

**Abstract.** The given article is devoted to the experimental research on the topic of deformed state of hummocked ice caused by motion of a submarine vessel near its surface. Experiments were carried out in the ice basin. The model of ice cover was made by natural freezing on up to the required depth. Ridge ice hummocks were modeled by freezing stripes of ice of the given thickness into the ice field. The experiments show that flexural-gravity waves formation in ice cover and the efficiency of its breaking is substantially dependent on the degree of development of hummocks, their size and location in relation to motion of an underwater vessel. Modes of motion at which ice breaking was most intensive are detected.

**Keywords:** submarine vessels; ice; flexural-gravity waves

Воздействие ветра и течения на ледяные поля может вызвать в них процессы сжатия, приводящие к торошению. Торосы образуются в результате

сжатия ледяного покрова. В арктических морях наблюдается преимущественно торосистый лед, за исключением берегового припая между островами, в проливах, заливах, отмелях берегов (где лёд не подвергается сжатию). В работе Д.Е. Хейсина [1] рассмотрена задача о распространении гравитационных волн в битых льдах неравномерной толщины. В.Д. Жесткой [2] численно решена задача по расчету напряженно-деформированного состояния ледяного покрова, имеющего заторошенные участки. В работе [3] выполнено численное моделирование движения погруженного тела вблизи нижней поверхности упругой пластины переменной толщины - заторошенного ледяного покрова. Данный подход позволяет определить параметры волн, распространяющихся в упругой пластине, однако, чтобы установить характер и эффективность разрушения заторошенного ледяного покрова ИГВ, необходимо использовать более сложные модели льда. В работе выполнено исследование влияния заторошенного ледяного покрова на параметры изгибно-гравитационных волн от движения подводного судна. Эксперименты проводились в опытовом ледовом бассейне лаборатории «Ледотехники» (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, г. Биробиджан). Модель ледяного покрова приготавливалась путем намораживания льда заданной толщины естественным холодом. Масштаб моделирования  $\lambda_l = 1-120$ . Толщина намораживаемого льда составляла  $h_m = 3$  мм, что в пересчете на натуру равнялось  $h_n = 1.95$  м. Торосы моделировались путем вмораживания в ледяное поле поперечных и продольных полос льда толщиной  $h_{hm} = 0.01$  м и шириной  $b_{hm} = 0.2$  м). Модель судна, выполненная в масштабе  $\lambda_l = 1:120$ , представляла собой тело вращения каплевидной формы с относительным удлинением  $L_m/V_m = 8.4$  (где  $L_m = 1.15$  м). Полное подводное водоизмещение судна после пересчета на натуру равнялось  $D_n = 24000$  т.

С целью оценки влияния неоднородностей ледяного покрова в виде продольно и поперечно расположенных относительно траектории движения модели нагрузки заторошенных участков на параметры генерируемых ИГВ предварительно была проведена серия модельных экспериментов по перемещению нагрузки вблизи нижней поверхности сплошного ледяного покрова при различной глубине акватории. Эксперименты показывают существенное влияние глубины акватории на величину прогибов модельного льда и значение критической скорости движения нагрузки. Максимальные значения прогибов наблюдались при движении нагрузки в условиях ограниченной глубины акватории при  $H_m = 0.35$  м. При скорости равной порядка  $u_m = 1.8$  м/с величина прогибов становилась максимальной. С ростом глубины акватории значение критической скорости увеличивалось, достигая максимальных значений при глубине дна  $H_m = 1$  м. По сравнению с глубокой водой прогибы возрастали на 8 ч 14%. Анализ зависимостей показывает сложную картину влияния рассматриваемых ледовых условий на параметры ИГВ. С уменьшением глубины акватории прогибы

модельного льда не увеличивались, как для случая сплошного ровного ледяного поля, а наоборот уменьшались, что может быть связано с изменением влияния сил инерции льда на параметры ИГВ вследствие увеличения средней толщины ледяного покрова, т.е. изменения баланса энергии гравитационных и изгибных волн в составе ИГВ. Максимальное значение прогибов наблюдалось при глубине дна  $H_m = 1$  м, при этом значения  $w_m$  возрастали на  $24 \div 27$  % в зависимости от числа затороженных участков по сравнению со сплошным льдом. Величина критической скорости движения нагрузки оставалась неизменной и для всех случаев глубины воды составила порядка  $u_m = 2$  м/с.

В отличие от поперечно расположенных торосов при их продольном расположении максимальное значение прогибы принимали при ограниченной глубине акватории  $H_m = 0.35$  м, возрастая на 11%, по сравнению со случаем глубокой воды. Величина критической скорости движения нагрузки оставалась неизменной и составила порядка  $u_m = 2$  м/с. Как показали экспериментальные исследования, образование магистральных трещин происходило в определенных областях (на вершинах и подошве ИГВ). Также формировалась продольная трещина вдоль траектории движения нагрузки между затороженными участками. Интенсивность разрушения льда для случая глубокой воды была меньше. Площадь разрушения модельного поля зависела от скорости движения нагрузки и становилась максимальной при скоростях близких к критическому значению  $u_m = 2$  м/с.

В целом, анализ полученных результатов показывает, что эффективность разрушения льда ИГВ при движении нагрузки вдоль затороженных участков ниже, чем при преодолении ИГВ поперечно расположенных торосов, что связано со значительно большими энергозатратами, необходимыми для разрушения продольных торосов. Значительно больше оказалась и площадь льдин, т.к. торосы разрушались в местах формирования магистральных трещин на расстояниях, равных порядка половине длины ИГВ. Однако отметим, что при движении нагрузки вдоль торосов наблюдалось не только формирование магистральной трещины вдоль траектории движения модели судна, но и интенсивное разрушение льда между ними, т.е. при необходимости всплытия ПС в сложной ледовой обстановке, при наличии затороженного льда путем генерирования резонансных ИГВ, судну необходимо перемещаться между двумя продольными затороженными участками, что может привести к интенсивному разрушению льда в области над ПС.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10097).

### Литература

1. Хейсин Д.Е. Некоторые нестационарные задачи динамики ледяного покрова // Труды ААНИИ. 1971. Т. 300. С. 81–91.

2. *Жесткая В.Д., Козин В.М.* Исследование возможностей разрушения ледяного покрова амфибийными судами на воздушной подушке резонансным методом. Владивосток: Дальнаука, 2003. 161 с.

3. *Земляк В.Л., Козин В.М., Баурин Н.О.* Влияние торосов на напряженно-деформированное состояние льда от движения подводного судна // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2013. Т. 13. №2. С. 54-69.

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА К ОПИСАНИЮ СТРУКТУРЫ АРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИТОВ**

**А.Э. Васькина, Ю.Н. Сидоренко**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: avaskina444@gmail.com

**Аннотация.** В данной работе предлагается использовать в качестве дополнительного параметра структуры армирования степень её однородности. В качестве характеристики однородности структуры предлагается использовать такую величину как связность, которая характеризует количество «контактов» между включениями. Предложен параметр, характеризующий степень однородности структуры армирования композита. При его вычислении используются методы кластерного анализа. Показано, что предложенный параметр не зависит от величины моделируемого объема.

**Ключевые слова:** структура армирования КМ, кластеризация, степень однородности.

## **THE APPLICATION OF CLUSTER ANALYSIS METHODS TO THE DESCRIPTION OF THE STRUCTURE OF REINFORCEMENT OF COMPOSITES**

**A. Vaskina and Yu. Sidorenko**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: avaskina444@gmail.com

**Abstract.** In this paper, it is proposed to use the degree of its homogeneity as an additional parameter of the reinforcement structure. As a characteristic of the homogeneity of the structure, it is proposed to use such a value as connectivity, which characterizes the number of "contacts" between inclusions. A parameter characterizing the degree of homogeneity is proposed. When calculating it, the methods of cluster analysis are used. It is shown that the proposed parameter does not depend on the size of the simulated volume.

**Key words:** structure of CM reinforcement, clustering, degree of homogeneity.

В настоящее время все чаще требуются особые материалы, наиболее подходящие для использования в заданных условиях. Этим требованиям соответствуют композиционные материалы (КМ). Учитывая сложность строения КМ, возможность управления их свойствами в процессе созда-

ния, такие материалы можно рассматривать как сложные технические системы [1].

Одним из важнейших параметров является структура армирования КМ. В связи с этим необходимо иметь максимально полную информацию о структуре композита. На сегодняшний день при описании структуры используется крайне ограниченный набор параметров, который включает, как правило, только объемное содержание армирующих частиц и характер армирования материала (регулярный, стохастический).

Для исследования эффективности предложенного параметра рассмотрена геометрическая модель композита с неупорядоченным распределением включений.

Контактирующие включения могут образовывать группы, цепочки и другие структурные образования, которые составляют своеобразные каркасы. Такие структурные образования рассматриваются в качестве кластеров структуры. Для выявления подобных образований в работе используются методы кластерного анализа.

В качестве характеристики отдельного кластера предлагается использовать связность кластера - отношение числа связей между включениями, принадлежащими данному кластеру, к количеству включений в кластере:

$$S_c = \frac{m}{n} \quad (1),$$

где  $n$ -число вершин (включений), а  $m$ - число ребер(связей) в кластере.

Связность всей структуры вычисляется как:

$$S_d = \sum_{i=1}^q \frac{S_{ci}}{q} \quad (2),$$

где  $q$ - количество кластеров.

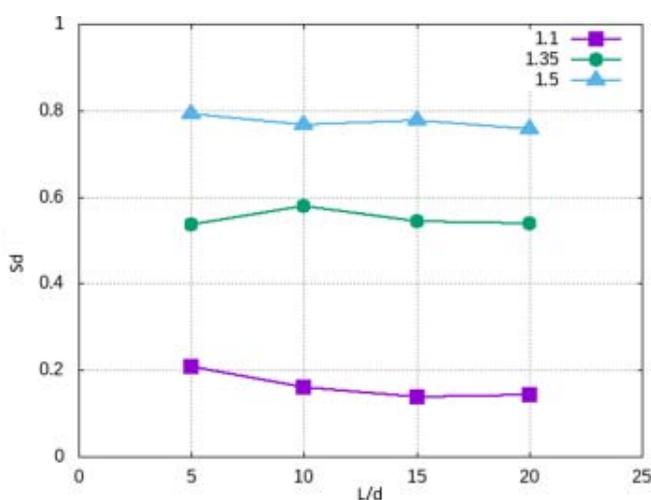


Рис. 1. Зависимость связности от размеров моделируемого объема

Можно полагать, что возрастание параметра  $S_d$  является признаком увеличения степени неоднородности структуры армирования композита.

Исследована зависимость связности  $S_d$  от размеров моделируемого объема при постоянном объемном соотношении компонентов, равном 25%.

Исследование проводилось при разных значениях параметра  $z$  (1): 1.1; 1.35; 1.5. Полученный результат показывает, что предложенный параметр ( $S_d$ ) таким образом можно применять в широком интервале объемов.

### Литература

1. Советова Ю.В., Сидоренко Ю.Н., Скрипняк В.А. Многоуровневый подход к исследованию влияния объемного соотношения компонентов волокнистого однонаправленного углепластика на его механические // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2014. № 2(28). С. 77–89.

## ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОПОЛЕВОГО РАЗЛОЖЕНИЯ АЗИДА СЕРЕБРА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Н.В. Газенаур, Л.В. Кузьмина

Кемеровский государственный университет, Россия  
E-mail: nikhasenauer@gmail.com

**Аннотация.** В работе представлены результаты физического моделирования электрополевого разложения азида серебра в слабых магнитных полях ( $10^{-5}$  -  $10^{-1}$  Тл). Показано, что магнитные поля различной интенсивности могут как замедлять, так и ускорять медленное разложение. Максимальное действие магнитного поля наблюдается на образцах с дополнительно введенной примесью.

**Ключевые слова:** электрическое поле, магнитное поле, азиды тяжелых металлов, разложение, взрыв, примесь.

## PHYSICAL MODELING OF THE PROCESS OF DECOMPOSITION OF SILVER AZIDE IN MAGNETIC FIELD

N. Gazenaur and L. Kuzmina

Kemerovo State University, Russian Federation  
E-mail: nikhasenauer@gmail.com

**Abstract.** The paper presents the results of physical simulation of the electric field decomposition of silver azide in weak magnetic fields ( $10^{-5}$  -  $10^{-1}$  Tl). It is shown that magnetic fields of different intensity can both slow down and accelerate the slow expansion. The maximum effect of the magnetic field is observed on samples with an additionally introduced impurity.

**Keywords:** electric field, magnetic field, azides of heavy metals, decomposition, explosion, impurity.

Процессы, протекающие в твердых телах в электромагнитных полях весьма широко используются в технике, поэтому их изучение представляет одну из важных научно-технических задач. Азиды тяжелых металлов относятся к классу неустойчивых высокочувствительных энергетических материалов, в которых медленно протекающая реакция разложения при различных внешних воздействиях приводит к старению изделий на их основе, либо сопровождается взрывом, что существенно ограничивает возможности их применения. Поэтому моделирование процессов, протекающих в данных материалах под действием электромагнитных полей становится актуальным.

Следует отметить эффективное влияние магнитного поля ( $10^{-5}$  –  $10^{-1}$  Тл) на скорость электрополевого разложения азидов тяжелых металлов (на примере кристаллов азид серебра). В этом случае наблюдается сложный характер влияния напряженности постоянного поперечного магнитного поля на скорость разложения данных материалов, а именно, в определенных областях напряженностей отмечено ускорение реакции разложения, переходящее во взрыв, либо гашение реакции. По сути, наблюдается переход медленного разложения во взрывное. Медленное разложение фиксируется по выделению газообразных продуктов. Количественный анализ продуктов разложения проводили методом внешнего газовыделения, при этом кристалл находился под микроскопом под слоем вазелинового масла. Измеряли диаметр газообразных продуктов и рассчитывали их суммарный объем. Время до взрыва образца определяли по секундомеру, который включался одновременно с источником питания постоянного тока и электромагнита. Факт взрыва образца, определяли по вспышке или звуковому сигналу.

Обнаруженное неоднозначное влияние магнитного поля на скорость твердофазной реакции наблюдается на нитевидных кристаллах с биографической (фоновой) примесью. Но, также известна значительная роль примеси в инициировании медленного разложения в кристаллах азид серебра. А именно, реакционные области (РО), где локализована реакция разложения, образованы краевыми дислокациями и точечными дефектами, в формировании которых значительную роль играют примеси положительных ионов металлов. Уменьшая либо увеличивая их количество можно изменять время образования РО, следовательно – управлять реакционной способностью и стабильностью данных материалов.

С учетом этих результатов можно моделировать процесс электрополевого разложения, варьируя как минимум два параметра: напряженность поперечного магнитного поля и содержание примеси в образцах. Также следует учитывать сложности в создании постоянных магнитных полей с напряженностью, соотносимой с магнитным полем земли и ниже. Поэтому моделирование условий действия слабых магнитных полей в совокупности

с экспериментом в данном случае весьма полезно для получения объективных результатов.

Кристаллы азида серебра с пониженным содержанием примеси (не более 30%) получают двумя способами - это электроочистка и способ выращивания в однородном магнитном поле. В обоих случаях получают кристаллы с минимальным содержанием примеси.

Кристаллы с минимальным содержанием примеси являются химически инертными к внешним энергетическим воздействиям (электрическому полю, УФ-облучению) в течение 6 месяцев.

Для стабилизации образцов на более длительное время следует моделировать условия реализации предложенных методик и дальнейшего хранения образцов.

В то же время, целенаправленно увеличивая содержание примеси в кристаллах азида серебра, например железа и свинца, имеющих различные магнитные свойства, также можно изменять скорость реакции разложения, т.е. уменьшать время и увеличивать вероятность перехода медленного разложения во взрывное.

Таким образом, моделируя условия электрополевого разложения образцов азида серебра с различным содержанием примеси в поперечном магнитном поле различной интенсивности, можно в широких пределах варьировать временные характеристики взрыва, а также управлять долговременной стабильностью инициирующих взрывчатых веществ.

## **ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЛОКАЛЬНОГО ПОЛУЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ОБЪЕМНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ НА КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В КВАДРАТНОМ КОНТУРЕ**

**Н.С. Гибанов, М.А. Шеремет**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: gibanov@mail.tsu.ru

**Аннотация.** Проводится численное исследование ламинарных режимов естественной конвекции в замкнутом квадратном корпусе при наличии локального источника объемного тепловыделения полуцилиндрической формы. Нагреватель располагался в центральной части нижней стенки области, и в процессе исследования варьировалось его положение. Не занимаемая источником энергии часть стенки, а также верхняя стенка являлись адиабатическими, боковые поверхности – охлаждающими. Уравнения, описывающие перенос массы, импульса и энергии в рассматриваемой области, представляли собой систему нестационарных двумерных уравнений Обербека–Буссинеска в подвижной среде и уравнение теплопроводности с источником слагаемым внутри тепловыделяющего элемента. В качестве рабочей среды рассматривалась ньютоновская теплопроводная жидкость. В результате проведенных исследований были получены

распределения изолиний функции тока и температуры в широком диапазоне изменения числа Рэлея. Проведена оценка влияния положения нагревателя и интенсивности тепловыделения на характер течения и теплопереноса в рассматриваемой полости. Получены распределения среднего числа Нуссельта в зависимости от определяющих процесс параметров.

**Ключевые слова:** естественная конвекция, замкнутая полость, локальный источник объемного тепловыделения.

## INFLUENCE OF A SEMICYLINDRICAL VOLUMETRIC HEAT GENERATION SOURCE LOCATION ON CONVECTIVE HEAT TRANSFER WITHIN A SQUARE CAVITY

**N. Gibanov and M. Sheremet**

National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: gibanov@mail.tsu.ru

**Abstract.** The numerical investigation of laminar natural convection in a closed square cavity having local volumetric heat generating source of semicylindrical shape has been carried out. The heater is located in central part of bottom wall and in analysis its position has been varied. The part of bottom wall without heater and top wall are considered to be adiabatic, while the side walls are kept at cooling temperature. Transport equations of mass, momentum and energy in domain of interest have been formulated using the system of two-dimensional unsteady Oberbek–Boussinesq equations inside the fluid zone and a heat conduction equation inside the solid heater. The working fluid is the Newtonian heat-conducting liquid. Distributions of streamlines and isotherms in a wide range of the Rayleigh number have been obtained as a result of conducted study. The effects of the heater location and volumetric heat generation intensity on the fluid flow and heat transfer inside the cavity have been analyzed. Distributions of the average Nusselt number depending on the governing parameters have been obtained.

**Keywords:** natural convection, heat transfer, closed cavity, local volumetric heat generating source.

С развитием электронной техники вопросы охлаждения различных блоков радиоэлектронной аппаратуры привлекают большой интерес как со стороны ученых-исследователей, так со стороны различных компаний и предприятий, занимающихся разработками и производством печатных плат и радиоэлектронной техники. Процессы теплообмена в замкнутых радиоэлектронных блоках исследуются в связи с крупнейшими программами развития и экономии ресурсов нашей страны. Для оценки эффективности теплообмена на поверхности нагревательного элемента, как правило используются 2 подхода: экспериментальный и теоретический. Экспериментальным аппаратом можно воспользоваться только при наличии готового образца, в то время как математическое моделирование помогает производить все необходимые исследования для качественной и разумной проектировки будущего аппарата.

В представленной работе проводится математическое моделирование ламинарных режимов естественно-конвективного теплообмена в замкнутой квадратной полости при наличии локального источника энергии с постоянным тепловыделением. Коэффициент теплопроводности в процессе численного исследования был проварьирован. Область решения представляет собой квадратную полость с локальным источником энергии полуцилиндрической формы в нижней части, боковыми охлаждающими стенками постоянной температуры и адиабатическими горизонтальными стенками. Внутри рассматриваемой полости находился газ, считающийся ньютоновской жидкостью с постоянными теплофизическими свойствами и удовлетворяющий приближению Буссинеска. Процессы переноса тепла, импульса и энергии в рассматриваемой среде, а также внутри источника описывались системой нестационарных плоских уравнений Обербека-Буссинеска в преобразованных переменных «завихренность скорости – функция тока – температура»:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \frac{\partial \Omega}{\partial X} - \frac{\partial \Psi}{\partial X} \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = \sqrt{\frac{\text{Pr}}{\text{Ra}}} \left( \frac{\partial^2 \Omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Y^2} \right) + \frac{\partial \Theta}{\partial X}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} = -\Omega, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \frac{\partial \Theta}{\partial X} - \frac{\partial \Psi}{\partial X} \frac{\partial \Theta}{\partial Y} = \frac{1}{\sqrt{\text{Pr} \cdot \text{Ra}}} \left( \frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Y^2} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{a_w / a_f}{\sqrt{\text{Pr} \cdot \text{Ra}}} \left( \frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Y^2} + Os \right) \quad (4)$$

Представленная система была решена с применением метода конечных разностей на равномерной расчетной сетке [1, 2]. Для сведения плоской задачи к системе одномерных была использована локально-одномерная схема А.А. Самарского. Диффузионные слагаемые были аппроксимированы на основе центральной разностной схемы второго порядка точности, конвективные – с применением монотонной аппроксимации А.А. Самарского. Получившуюся систему линейных алгебраических уравнений решали с помощью метода прогонки, а дискретизированное уравнение Пуассона для функции тока – с помощью метода последовательной верхней релаксации. Представленный алгоритм решения краевых задач гидродинамики и теплопереноса был апробирован и протестирован на множестве модельных задач [3, 4].

В качестве рабочей среды в исследуемой области был использован воздух. Теплопроводность материала источника тепловыделения варьировалась, а также было проварьировано положение локального источника энергии в рассматриваемой области. В результате численного исследования были получены распределения изолиний функции тока и температуры в широком диапазоне изменения числа Рэлея. Проведена оценка влияния коэффициента теплопроводности материала источника энергии на гидродинамику и теплоперенос в рассматриваемой области. Проанализировано влияние расположения нагревателя в области для более эффективного теплосъема с его поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Госзадания №13.9724.2017/8.9.

### Литература

1. *Бондарева Н.С., Гибанов Н.С., Мартюшев С.Г., Мирошниченко И.В., Шеремет М.А.* Сравнительный анализ методов конечных разностей и контрольного объема на примере решения нестационарной задачи естественной конвекции и теплового излучения в замкнутом кубе, заполненном диатермичной средой // Компьютерные исследования и моделирование. 2017. Т. 9, № 4. С. 567–578.
2. *Пасконов В. М., Полежаев В. И., Чудов Л. А.* Численное моделирование процессов тепло и массообмена. М.: Наука, 1984. 288 с.
3. *Шеремет М.А.* Сопряженные задачи естественной конвекции. Замкнутые области с локальными источниками тепловыделения. LAP: Lambert Academic Publishing, 2011. 167 с.
4. *Gibanov N., Sheremet M.* Unsteady natural convection in a cubical cavity with a triangular heat source // International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow. 2017. Vol. 27, Issue 8. P. 1795–1813.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАПЫЛЕНИЯ ВОЛЬФРАМА МЕТОДОМ ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ПАРОГАЗОВОЙ ФАЗЫ

**Н.И. Гичёва, Е.А. Дьяков**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: tashka-zenit@mail.ru

**Аннотация.** В работе представлены результаты численного моделирования процессов гидродинамики и тепломассопереноса в химическом реакторе для получения вольфрама методом осаждения при восстановлении гексафторида вольфрама водородом. Созданная физико-математическая модель включает уравнения неразрывности, переноса импульса, энергии и баланса массы. Численное решение проводилось методом расщепления полей скорости и давления с использованием неявной обобщенной схемы переменных направлений в Д-форме. Получены распределения полей скорости, температуры и концентрации в химическом реакторе. Достоверность решения протестирована на модельной задаче. Результаты качественно согласуются с данными других исследований.

**Ключевые слова:** уравнения Навье–Стокса, тепломассоперенос, химический реактор, осаждение из парогазовой фазы, напыление вольфрама.

## MODELING OF TUNGSTEN COATING PROCESS BY CHEMICAL VAPOR DEPOSITION

N. Gicheva and E. Diykov

National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: [tashka-zenit@mail.ru](mailto:tashka-zenit@mail.ru)

**Abstract.** In this paper the results of physical and mathematical modeling of fluid motion and heat and mass transfer in a chemical reactor for producing tungsten by means of chemical vapor deposition by hydrogen reduction of tungsten hexafluoride has been performed. The mathematical model developed includes the continuity equation, transport equations for momentum, energy and species balance. A numerical solution has been carried out by dint of method of pressure and velocity correction using an alternative direction implicit scheme. The velocity field and the temperature and mass distribution in the reactor were obtained. Reliability of the calculations was verified by solving the classical test problem. The results obtained show a good qualitatively agreement with other investigations.

**Keywords:** Navier-Stokes equations, heat and mass transfer, single-wafer reactor, chemical vapor deposition, tungsten deposition.

В Послании Федеральному Собранию на 2015 год Президент РФ Владимир Путин предложил реализовать национальную технологическую инициативу, в рамках которой предусмотрено внедрение инновационных технологий, в том числе аддитивного производства. Именно применение аддитивных технологий позволяет в полной мере реализовать основные принципы создания материалов нового поколения, заложенные в «Стратегических направлениях развития материалов и технологий на период до 2030 года». К описанным приоритетным технологиям относится метод получения вольфрама путем осаждения из парогазовой фазы с помощью восстановления его фторидов или хлоридов.

В данной работе осуществляется численный расчёт процессов гидродинамики и тепломассопереноса в камере химического реактора известного в литературе коммерческого дизайна, так называемого, single-wafer reactor. (рис. 1) [1]. Смесь газов, имеющих температуру  $T_0$  и концентрацию  $C_0$ , поступает сверху в цилиндрическую камеру реактора через распределительное устройство со скоростью  $U_0$ , проходит над нагретой подложкой и выводится через кольцевой канал. На нагретой до температуры  $T_1$  подложке происходит реакция восстановления гексафторида вольфрама водородом, в результате которой на подложку осаждается чистый вольфрам.

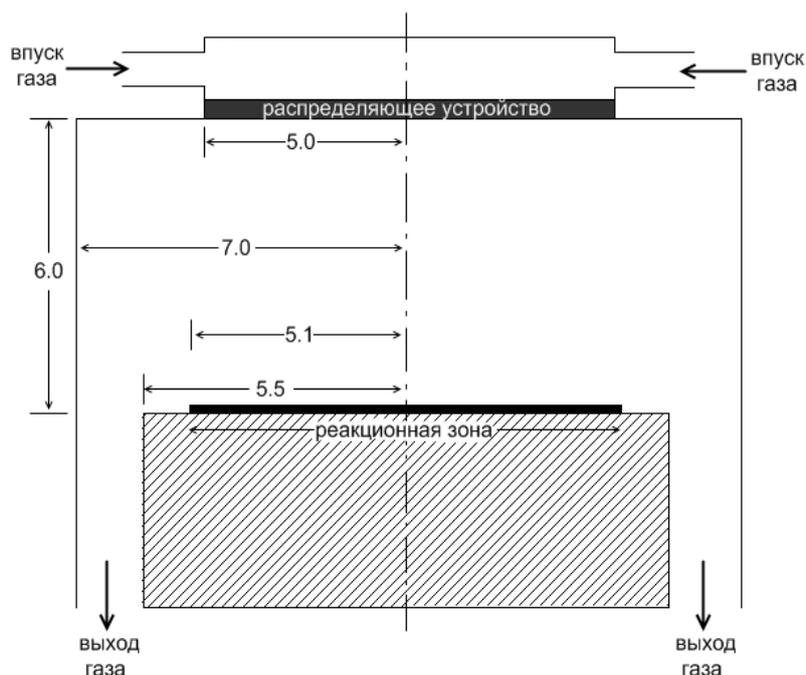


Рис. 1

Описанные процессы математически представлены системой уравнений, включающей уравнения Навье – Стокса, уравнение неразрывности, уравнение энергии и уравнение конвективной диффузии в безразмерной форме в цилиндрической системе координат. В качестве масштабов обезразмеривания взяты радиус камеры, входная линейная скорость, а также максимальный перепад температур. Характер гидродинамических, тепло- и массообменных процессов в данной модели зависит от значений критериев Рейнольдса, Прандтля и Шмидта.

Решение полученной системы реализуется методом расщепления полей скорости и давления [2] с помощью неявной обобщённой схемы переменных направлений в «дельта» - форме [3] и с применением экспоненциальной схемы [4]. Данный двумерный метод основан на введении промежуточного временного слоя, для линейных уравнений абсолютно устойчив и имеет второй порядок точности по времени.

Получены поле скоростей, а также распределение температуры и концентрации в камере реактора. Результаты качественно совпадают с представленными в работе [1] для аналогичной задачи.

Для проверки достоверности решения математическая модель и метод были применены к решению классической задачи о течении вблизи бесконечного вращающегося диска [5]. В задаче рассматривается течение вблизи плоского диска, равномерно вращающегося с угловой скоростью со вокруг оси, перпендикулярной к плоскости диска. Жидкость вдали от диска принимается покоящейся. Вследствие трения слой жидкости, непосредственно прилегающий к диску, увлекается последним и под действием центробежной силы отбрасывается наружу от диска. Взамен отброшенной

жидкости к диску притекает в осевом направлении новая жидкость, которая также увлекается диском и опять отбрасывается наружу. С использованием ранее описанных методов были получены распределения скоростей вблизи диска. Сравнение численных результатов разработанной модели с аналитическим решением данной задачи, полученным В.Г. Кохрэном, демонстрирует хорошее совпадение решений.

### Литература

1. *Park, J.-H.* Mathematical Modeling for Chemical Vapor Deposition in a Single-Wafer Reactor: Application to Low-Pressure Deposition of Tungsten // *Korean J. Chem. Eng.* 2002. № 19 (3). P. 391-399.
2. *Chorin A.J.* Numerical Solution of the Navier-Stokes Equations // *Mathematics of Computation.* 1968. Vol. 22. № 104. P. 745-762.
3. *Андерсон Д., Танненхилл Дж., Плетчер Р.* Вычислительная гидромеханика и теплообмен: в 2-х т., Т. 1: пер. с англ. М.: Мир, 1990. 384 с.
4. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с англ. под ред. Виленского. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
5. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя.: пер. с нем. главной редакции физико-математической литературы издательства «Наука». М.: Наука, 1974. 712 с.

## МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ, ОСНОВАННАЯ НА ПРИНЦИПАХ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПРОЧНОСТИ

**А.С. Григорьев, Е.В. Шилько, В.А. Скрипняк, С.Г. Псахье**

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия  
E-mail: grigoriev@ispms.ru

**Аннотация.** В работе представлена численная модель динамического механического поведения хрупких материалов, основанная на идеях кинетической теории прочности. В основе развиваемой модели лежит допущение, что любая неупругая деформация в материале является следствием релаксации действующих мгновенных напряжений. Причем процесс релаксации протекает не мгновенно, а в течение конечного времени  $T$ . При этом, текущее значение времени  $T$  определяется величиной действующих напряжений и свойствами материала. Следует отметить, что этот параметр по своей сути является аналогом характерного времени деградации материала, который встречается в работах Журкова, Петрова и Морозова. Предложенная модель позволяет моделировать динамическое нагружение хрупких материалов в интервале скоростей деформации от 0.001 1/с до 1000 1/с. Верификация модели проведена путем моделирования испытаний образцов хрупких материалов (бетона и песчаника) на одноосное сжатие с различными скоростями деформации. Для этого модель была реализована в рамках метода дискретных элементов на базе статической модели пластичности горных пород Николаевского (неассоциированный закон пластического течения с критерием пластичности в форме Мизеса–Шлейхера) и критерия разрушения Друкера–Прагера. Верификация показала

адекватность предложенной модели и хорошее согласие результатов моделирования с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** численное моделирование, метод дискретных элементов, динамическая модель, кинетическая теория прочности.

## KINETIC STRENGTH THEORY BASED DYNAMIC MODEL OF BRITTLE SOLIDS MECHANICAL BEHAVIOR

A. Grigoriev, E. Shilko, V. Skripnyak and S. Psakhie

Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Russian Federation

E-mail: grigoriev@ispms.ru

**Abstract.** The paper presents a numerical model of the dynamic mechanical behavior of brittle materials, based on the ideas of the kinetic theory of strength. The developed model is based on the assumption that any inelastic deformation in the brittle material is an effect of the stress relaxation. Moreover, the process of relaxation proceeds not instantaneously, but for a finite time  $T$ . At the same time, the current value of the time  $T$  is determined by the magnitude of the applied stresses and the properties of the material. It should be noted that this parameter is inherently analogous to the characteristic time of material degradation, which occurs in the works of Zhurkov, Petrov and Morozov. The proposed model allows modeling the dynamic loading of brittle materials in the strain rate range from 0.001 1/s to 1000 1/s. Verification of the model was carried out by simulation of uniaxial compression tests of brittle materials samples (concrete and sandstone) with different strain rates. For this purpose the model was implemented within the discrete elements method based on the static Nikolaevsky rock plasticity model (non-associated plastic flow rule with the plasticity criterion in the form of Mises-Schleicher) and the Drucker-Prager fracture criterion. Numerical simulation results showed the adequacy of the proposed model and a good agreement between the simulation results and the experimental data.

**Keywords:** numerical simulation, discrete element method, dynamic model, kinetic theory of strength.

Эффективным инструментом для изучения особенностей поведения, включая динамику разрушения, материалов в условиях динамического нагружения является численное моделирование. Наиболее распространенными численными методами, применяемыми для решения таких задач, являются методы конечных элементов и конечных разностей. Хорошо развитый математический аппарат этих методов позволяет реализовывать сложные реологические модели механического отклика материалов и решать сложные задачи механики деформируемого твердого тела. В то же время при использовании этих методов для решения динамических задач возникают хорошо известные сложности, связанные с моделированием множественного разрушения, сопровождающегося интенсивным массопереносом и перемешиванием фрагментов. Для решения подобных задач в настоящее время широко применяются численные методы дискретного подхода к

описанию среды. Распространенным представителем данного класса методов являются методы дискретных элементов, в рамках которых моделируемая среда представляется ансамблем взаимодействующих элементов или частиц конечного размера и определенной формы, которая может изменяться при деформировании.

Несмотря на то, что методы дискретных элементов широко применяются для численного изучения особенностей деформирования и разрушения хрупких гетерогенных материалов и сред, в настоящее время математический формализм МДЭ ограничен квазистатическими моделями отклика элементов на механическое воздействие. Это ограничивает область применения МДЭ интервалом скоростей деформации до  $10 \text{ с}^{-1}$ . В то же время преимущества данных методов в моделировании разрушения востребованы, в первую очередь, при решении задач динамического нагружения хрупких материалов. Поэтому актуальной задачей механики является создание моделей неупругого поведения, учитывающих особенности динамического поведения материалов, в рамках методов дискретных элементов.

Одним из способов учета зависимости прочностных и реологических свойств материала от скорости нагружения является структурно-кинетический подход, развитый в работах таких авторов как Журков, Регель, Петров, Морозов. В рамках данного подхода в качестве основного параметра динамического деформационного отклика материала используется характерное время деградации материала  $T$ . Параметр  $T$  является физическим и, как правило, характеризует процесс зарождения и развития магистральной трещины (разрушение) в образце или фрагменте материала или формирование системы микрповреждений, обуславливающие макроскопически неупругое поведение этого фрагмента.

В работе предложена динамическая модель неупругого отклика дискретных элементов, моделирующих хрупкие материалы. Развитая модель основана на классической «статической» модели пластичности Николаевского (неассоциированный закон пластического течения с критерием пластичности в форме Мизеса - Шлейхера) и критерии разрушения Друкера-Прагера и использует подход кинетической теории прочности для описания изменения величины параметров пластичности и прочности при динамическом нагружении. Особенностью предложенной модели является использование «силовой» формы записи критерия наступления предельного состояния вместо интегральной формы, традиционно используемой в кинетической теории прочности. Это позволяет описывать динамический неупругий отклик хрупких материалов (при скоростях деформации до  $\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$ ) без изменения основ формализма базовых («статических») моделей пластичности и прочности.

Для демонстрации корректности и адекватности предложенной модели динамического деформирования хрупких материалов проведена верификация на примере одноосного сжатия с постоянной скоростью образцов бе-

тона и песчаника прямоугольной формы размером 6x9 мм. Скорость деформирования варьировалась в пределах от  $10^{-3}$  с<sup>-1</sup> (квазистатическое нагружение) до 103 с<sup>-1</sup>. Результаты моделирования показали хорошее согласие с экспериментальными данными.

Следует отметить, что для использования модели не требуется строгого разделения задач деформирования материала (и соответствующих математических моделей) на статическую и динамическую и тем самым обеспечивается возможность корректного перехода от режима квазистатического нагружения в высокоскоростной динамический режим и наоборот. Более того, хотя развитая динамическая модель реализована на примере конкретных модели пластичности и модели разрушения хрупких материалов в рамках одной из реализаций метода частиц, она естественным образом может быть реализована на базе любых моделей неупругого отклика и разрушения, реализуемым в рамках различных численных методов (включая методы конечных элементов и разностей).

Поскольку управляющие параметры модели (характерные времена зарождения несплошностей различного масштаба) определяются масштабной величиной времени инкубации, они также являются масштабными. Поэтому при определении ключевых зависимостей параметров модели от времени зарождения несплошностей, необходимо учитывать масштабный фактор. В частности, характерный размер образцов, используемых для определения зависимостей прочностных и реологических свойств от скорости деформации (или времени зарождения несплошностей), должен быть сопоставим с размером дискретного элемента, поведение которого будет определяться этими зависимостями.

Предложенный в работе способ построения динамических моделей является актуальным для решения нового класса прикладных задач, связанных с природными и техногенными динамическими воздействиями на конструкции из искусственных строительных материалов, включая бетоны, элементы конструкций из керамики и природные каменные материалы. В частности, реализация предложенной модели в рамках метода частиц позволяет решать задачи прогнозирования времени разрушения материалов и конструкций в зависимости от амплитуды и скорости нагружения с учетом структурных особенностей рассматриваемых материалов. При этом на основе решения обратной задачи предложенный способ реализации динамической модели в рамках метода частиц дает возможность проводить оценки характерного размера элементов внутренней структуры материала, определяющих разрушение на рассматриваемом масштабном уровне.

Работы выполнены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.607.21.0186, идентификатор проекта RFMEFI60717X0186).

# ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ГИДРИДА АЛЮМИНИЯ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РДТТ

В.С. Гурова, С.А. Синеокая, Н.Н. Дьяченко

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: valery0995@mail.ru

**Аннотация.** Для увеличения энергетических характеристик двигателя в топливо добавляют порошок металла. Наиболее широкое применение в ракетной технике имеют порошки алюминия. Продукты сгорания такого топлива представляют смесь газа и мелкодисперсного ансамбля частиц оксида алюминия. Значительный интерес представляет возможность использовать топливо, в котором добавкой является гидрид алюминия. Наличие водорода в составе топлива, увеличивает его энергоемкость. Исследуется влияние добавки гидрида алюминия в топливо на энергетические характеристики РДТТ. Представлены результаты численного расчета квазиодномерного установившегося течения продуктов сгорания топлива с добавлением порошка гидрида алюминия в сопле РДТТ. Показаны зависимости двухфазных потерь двигателя за счет неравновесности потока, среднемассового размера частиц на выходе из сопла и удельного импульса от размера частиц оксида алюминия на входе в сопло. Анализ результатов расчетов показывает, что использование порошка гидрида алюминия в смесевых твердых топливах значительно увеличивает удельный импульс двигателя по сравнению с добавкой в топливо в виде алюминия.

**Ключевые слова:** удельный импульс, двухфазные потери, коагуляция, дробление.

## PARAMETRIC STUDIES OF THE INFLUENCE OF ALUMINUM HYDRIDE ON THE ENERGY CHARACTERISTICS OF SOLID PROPELLANT

V. Gurova, S. Sineikay and N. Dychenko

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: valery0995@mail.ru

**Abstract.** The metal powders are added to the fuel to increase the energy characteristics of the engine. Aluminum powders are most widely used in rocket technology. The combustion products of such a fuel are a mixture of gas and finely dispersed ensemble of aluminum oxide particles. The ability to use fuel in which the additive is aluminum hydride is most interesting. The presence of hydrogen in the fuel increases its energy intensity. The effect of the addition of aluminum hydride to fuel on the energy characteristics of the solid propellant is investigated. The results of a numerical calculation of the quasi-one-dimensional steady-state flow of combustion products of fuel with the addition of aluminum hydride powder in the nozzle of the solid propellant rocket are presented. The dependences of the two-phase motor losses due to the nonequilibrium flow, the mass-average particle size at the nozzle exit, and the specific momentum on the particle size of the alumina at the inlet to the nozzle are shown. Analysis of calculation results shows that the use of aluminum hydride powder in mixed solid fuels significantly increases the specific impulse of the engine in comparison with the addition to the fuel in the form of aluminum.

**Keywords:** specific impulse, two-phase losses, coagulation, fragmentation.

Для повышения энерготяговых характеристик ракетного двигателя в топливо добавляют порошки металлов. Наибольшее применение нашел алюминий. Уменьшение размера частиц увеличивает их полноту сгорания и уменьшает двухфазные потери. Дальнейшее увеличение энергетики связано с использованием высокоэнергетических материалов, к которым относится гидрид алюминия. Высокая энергия от окисления алюминия в сочетании с низкой молекулярной массой продуктов сгорания из-за наличия водорода приводят к повышению энергетики ракетного двигателя. Данная работа посвящена численному исследованию течения продуктов сгорания твердого топлива, металлической добавкой в котором является порошок гидрида алюминия. Продукты сгорания металлизированного топлива представляют двухфазную смесь газа и частиц конденсированной фазы. Как в случае использования алюминия, так и в случае использования гидрида алюминия, конденсированная фаза представляет полидисперсный ансамбль жидких частиц оксида алюминия. Поэтому постановка задачи и система уравнений, описывающая течение двухфазной среды заимствованы из работы «Численное исследование течения в соплах РДТТ продуктов сгорания топлива, содержащего высокодисперсный порошок алюминия» (Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2016. №2(40). С. 63-70).

Интегрирование системы уравнений для газа и частиц осуществляется с помощью разностных схем второго порядка точности. Течение стационарное, рассчитывалось в квазиодномерной постановке для радиусно-профилированного сопла. На входном сечении использовалось условие скоростного и температурного равновесия между газовой фазой и частицами. Квадраты моментов вращения частиц на входе для всех фракций полагались нулевыми.

Расчеты проводились для модельного топлива при следующих значениях исходных параметров: температура в камере сгорания  $T_k=3200, 3400, 3600$  К; давление в камере сгорания  $P_k=50, 60, 70$ ; средний радиус частиц на входе  $r_0=1.5, 1.0, 0.5, 0.1$  мкм; число фракций  $N=15$ ; расширение сопла  $ra=4, 6, 8$  минимальных радиусов; минимальный радиус сопла  $r^*=0.1$  м; весовая доля конденсата  $z=0.34$ ; молекулярный вес  $M_{\text{мол.вес}}=21.8$  кг/моль, показатель адиабаты равновесного расширения смеси газа и частиц  $k=1.173$ . Экспериментальных данных распределения частиц оксида алюминия при горении порошка гидрида алюминия в открытой литературе нет, поэтому распределение задавалось, как и в случае горения порошка алюминия, логарифмически-нормальным законом.

Для параметрического исследования были выбраны параметры ( $P_k=60$  атм.;  $T_k=3400$  К;  $ra=6$ ), которые обозначим за средние. На рисунках представлены результаты расчета среднемассового размера частиц  $d_{43}$  на срезе сопла от среднего радиуса  $r_0$  на входе в сопло при уменьшении параметров ( $P_k, T_k, ra$ ) и при увеличении одного из параметров относительно

средних. Далее на рисунках показаны зависимости двухфазных потерь от одного параметра при изменении двух других.

Численные расчеты показывают:

- повышение температуры в камере сгорания наряду с повышением полноты сгорания частиц металла увеличивает энергетику потока, уменьшает разницу скоростей между частицами оксида и газа тем самым уменьшает двухфазные потери;

- для уменьшения потерь, обусловленных неравновесностью потока, необходимо использовать в качестве металлической добавки в топливо высокодисперсные порошки;

- чем меньше размер частиц на входе в сопло, тем меньше их средне-массовый размер на срезе сопла и, как следствие, меньше двухфазные потери;

- для высокодисперсного порошка упрощается постановка задачи и система уравнений, т.к. процесс дробления частиц не наблюдается вдоль всего сопла.

Результаты данной работы могут быть использованы при проектировании аэрокосмических систем.

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ В РЕАКТОРЕ ОСАЖДЕНИЯ ВОЛЬФРАМА**

**А.А. Демьянов, В.Н. Брендаков**

Северский технологический институт – филиал Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия  
E-mail: sora94@mail.ru

**Аннотация.** В работе представлена численная модель, описывающая течение двухкомпонентной смеси вязкого газа в осесимметричной постановке, для геометрии с осложненными граничными условиями. Выбран метод численного решения, позволяющий получить для разностного аналога дифференциальных уравнений второй порядок точности, как по координатам, так и по времени. Выполненные тестовые расчеты показали работоспособность созданной численной модели. Планируется использовать ее в составе модели процесса восстановления гексафторида вольфрама водородом.

**Ключевые слова:** вычислительная гидродинамика, граничные условия, метод решения.

# NUMERICAL SIMULATION OF HYDRODYNAMICS IN A TUNGSTEN DEPOSITION REACTOR

A. Demyanov and V. Brendakov

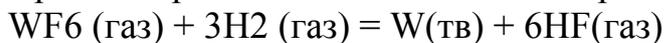
Seversk Technological Institute - branch of the federal state autonomous educational institution of higher education National Research Nuclear University «МЕРФИ», Russian Federation  
E-mail: sora94@mail.ru

**Abstract.** The paper presents a numerical model describing the flow of a two-component viscous gas mixture in an axisymmetric formulation for a geometry with complicated boundary conditions. A numerical solution method is chosen that makes it possible to obtain for the difference analogue of differential equations a second order of accuracy, both in coordinates and in time. The performed test calculations showed the operability of the created numerical model. It is planned to use it as part of the model of the process of reduction of tungsten hexafluoride by hydrogen.

**Keywords:** computational fluid dynamics, boundary conditions, method of solution.

Осаждение вольфрама из газообразной смеси гексафторида вольфрама и водорода является относительно новым технологическим процессом, позволяющим решать широкий круг задач, возникающих при создании современной техники, включая нанесение покрытий различного назначения и получение разнообразных изделий из вольфрама, которые затруднительно или невозможно изготовить традиционными методами.

Процесс происходит по химической реакции



и обладает рядом преимуществ перед другими способами:

- низкая температура процесса;
- высокие скорости осаждения вольфрама;
- возможность использования металлической аппаратуры;
- простота и надежность дозирования и транспортировки  $\text{WF}_6$ , имеющего низкую температуру кипения.

Для количественного анализа описанного процесса необходимо четко сформулировать физико-химическую модель процесса осаждения вольфрама из смеси его гексафторида с водородом при стехиометрическом соотношении компонентов, на основе которой можно рассчитать основные показатели процесса при заданных параметрах без проведения многочисленных трудоемких и финансово затратных экспериментов.

В реальном процессе газообразную смесь  $\text{WF}_6$  и  $\text{H}_2$  пропускают вдоль нагретой поверхности, на которой осаждается вольфрам. При движении газовой смеси содержание исходных компонентов в ней уменьшается, а содержание продукта реакции (HF) увеличивается. В результате наблюдается снижение скорости процесса по длине реакционной поверхности, которое зависит от ее размеров, температуры осаждения, состава и расхода газовой смеси. Количественную взаимосвязь между перечисленными па-

раметрами и основными показателями процесса, такими как полнота восстановления WF6 и производительность исследуемого аппарата, можно установить только в результате математического моделирования процесса осаждения вольфрама.

Одним из ключевых факторов, существенно влияющим на рассматриваемый процесс, является гидродинамическая картина течения смеси газов, складывающаяся в рабочей зоне реактора осаждения вольфрама.

В данной работе построена математическая модель течения вязкой несжимаемой среды переменной плотности. В качестве рассматриваемого объема выбрана осесимметричная геометрия с поверхностью осаждения расположенной в приосевой части. Рассматривается двухмерная задача течения вязкой смеси газов, описываемая на основе уравнений Навье – Стокса. Решение поставленной задачи ищем в переменных «скорость-давление», как наиболее перспективный способ в гидродинамике. Система дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка заменяется их разностными аналогами, записываемых на разнесенной разностной сетке. Получаемая система алгебраических уравнений решается методом установления, для чего искусственно добавляем во все уравнения переноса частную производную по времени. Чтобы получить второй порядок точности по времени, записываем каждое нестационарное уравнение на дробном шаге по времени ( $n+1/2$ ). Полученную систему алгебраических уравнений переписываем в виде обобщенной неявной двухслойной схемы переменных направлений в «дельта» форме, и решаем методом прогонки. Для исключения зависимости от сеточного числа Рейнольдса конвективные слагаемые в уравнениях записывались в виде трех точечной аппроксимации.

Для проверки точности получаемых решений была выполнена сходимость по шагу разностной сетки, когда шаг разностной сетки уменьшали в два раза до получения одинаковых решений течения в трубе. Так же проводилось сравнение численных результатов с имеющимися аналитическими решениями в случае простых вариантов течения. Достаточно близкое совпадение численных и аналитических результатов позволяет сделать вывод о том, что созданная математическая модель течения двухкомпонентной смеси в рабочей зоне реактора осаждения вольфрама может быть использована как составная часть общей модели процесса восстановления гексафторида вольфрама водородом.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГРАНУЛИРОВАННОЙ СРЕДЫ В КОЛЬЦЕВОМ БУНКЕРЕ

Е.А. Дьяков, Н.И. Гичева

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия

E-mail: [diakowegor@mail.ru](mailto:diakowegor@mail.ru)

**Аннотация.** В работе проводится исследование гидродинамики гранулированной среды в кольцевом бункере. Используются модель дилатантной среды Сиско и граничные условия прилипание-скольжение. Достоверность предложенной математической модели подтверждается сравнением результатов расчета с экспериментальными данными. Изучено влияние коэффициента скольжения и числа Рейнольдса на характер течения. Полученные результаты могут быть применены в области смешения и усреднения сыпучих материалов.

**Ключевые слова:** реология, неньютоновская жидкость, гранулированная среда, условия скольжения, модель Сиско.

## RESEARCH OF MOTION OF A GRANULAR MEDIUM IN AN ANNULAR HOPPER

E. Dyakov and N. Gicheva

National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: [diakowegor@mail.ru](mailto:diakowegor@mail.ru)

**Abstract.** Research of hydrodynamics of a granular medium in an annular hopper is carried out in this work. The dilatant environment model of Cisco and stick-slip boundary conditions are used. The reliability of the mathematical model proposed is proved by comparison between the model predictions and the experimental data. The influence of the slip coefficient and the Reynolds number on the flow pattern was studied. The results obtained can be applied in the field of granular materials mixing and averaging.

**Keywords:** rheology, non-Newtonian fluid, granular medium, slip conditions, model Cisco.

На сегодняшний день в различных областях промышленности – химической, металлургической, в аддитивных технологиях – разрабатываются и используются порошковые и гранулированные материалы: пластмассы, модифицирующие добавки, композиты и др. При производстве таких сыпучих материалов сталкиваются с процессами дозирования, измельчения, смешения, усреднения, транспортировки. Такие процессы протекают в различных аппаратах порошковой технологии. Это могут быть сепараторы, дозаторы, измельчители, сложные комбинированные установки. В данной работе будет рассмотрен важный элемент некоторых из этих аппаратов – кольцевой бункер. Перспективным направлением дальнейшего совершенствования этих устройств является создание математических моделей, спо-

собных, адекватно опытным данным, объяснять и предсказывать происходящие в них процессы.

В работе исследуется гидродинамика гранулированной среды, которая является неньютоновской жидкостью. Используется модель дилатантной среды Сиско. Для моделирования процессов гидродинамики используется безразмерная форма уравнений движения и неразрывности в цилиндрической системе координат с учётом реологического уравнения. Решение осуществляется численным методом физического расщепления полей скорости и давления. Для численной реализации использовалась неявная обобщенная схема переменных направлений в «дельта» – форме. Данная схема реализована на разнесённой сетке с применением экспоненциальной схемы.

Особенностью предложенной модели движения гранулированной среды является постановка граничных условий прилипание-скольжение на твердых поверхностях. Для учета эффекта скольжения среды на стенке принимается, что касательные напряжения пропорциональны скорости движения среды с точностью до некоторой постоянной, которую назовем коэффициентом скольжения. На верхних поверхностях горизонтальных полок ставились условия прилипания для моделирования эффекта застойных зон и создания угла естественного откоса.

Достоверность полученных результатов подтверждается сравнением течения в трубе рассматриваемой гранулированной среды с имеющимися экспериментальными данными установившегося течения полистироловых частиц в вертикальной цилиндрической трубе.

Дальнейшее рассмотрение движения среды в кольцевом бункере осуществляется при параметрах, которые соответствуют течению среды в эксперименте.

В работе исследовалось влияние коэффициента скольжения в предельных случаях на профиль скорости и линии тока. Проведён анализ влияния индекса течения в реологическом уравнении на вертикальный профиль скорости в соответствии с физической аналитикой. Было получено решение для различного значения числа Рейнольдса и изучено его влияние на характер потока. Полученные результаты могут быть полезны в области смешения и усреднения порошковых и гранулированных материалов.

# ЭВОЛЮЦИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ, ПОСАДКИ КРОВЛИ И ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

**М.О. Еремин**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: eremin@ispms.tsc.ru

**Аннотация.** В докладе представлены результаты моделирования эволюции горного массива при ведении очистных работ. На основе разработанных структурной и физико-математической моделей проведено моделирование посадок кровли при выемке угольного пласта. Проведена оценка шагов генерального обрушения, а также триггерных эффектов, в случае, когда выработка ведется на двух горизонтах залегания угольных пластов.

**Ключевые слова:** горный массив, выработка, триггерные эффекты, посадки кровли, математическое моделирование.

## EVOLUTION OF STRESS-STRAIN STATE OF ROCK MASS AT MINING, ROOF COLLAPSES AND TRIGGER EFFECTS. MATHEMATICAL MODELLING

**M. Eremin**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
eremin@ispms.tsc.ru

**Abstract.** The current research presents the results of modeling the evolution of the mountain massif in the course of cleaning operations. On the basis of the developed structural and mathematical models, modeling of roofing during the seizure of a coal seam was carried out. An assessment of the steps of the general collapse, as well as trigger effects, in the case when the development is carried out on two levels of occurrence of coal seams.

**Key words:** Evolution of stress-strain state of rock mass at mining, roof collapses and trigger effects. Mathematical modelling

Практика управления горным давлением требует понимания основных закономерностей накопления повреждений в кровле и почве породного массива при извлечении полезных ископаемых, например, угля. Современные методы геомеханического моделирования, учитывающие структурные, а также упругие и прочностные особенности породного массива, позволяют исследовать эволюцию напряженно-деформированного состояния (НДС) при ведении горных работ на различных горизонтах залегания угольных пластов и проводить оценку взаимного влияния выработок.

Для описания неупругого деформирования пород в массиве применена модель Друккера – Прагера - Николаевского с неассоциированным законом течения [1]. Полная система уравнений механики деформируемого твердого тела также дополнена моделью накопления повреждений, разработанной ранее [2].

В работе представлены результаты 2D моделирования эволюции НДС при движении очистной выработки на различных горизонтах залегания угольных пластов. Численно изучены особенности накопления повреждений и многомасштабного разрушения в кровле и почве горного массива.

Показано, что породы кровли и почвы, сложенные в основном песчаниками и алевролитами, подвержены хрупкому и квазихрупкому разрушению. При движении очистной выработки формируются области локализованных повреждений различных масштабов, по которым происходит осадка кровли.

Анализ вида НДС показывает, что в своде формируется область переходного напряженного состояния, где происходит смена знаков напряжений, препятствующая распространению локализованных повреждений.

В расчетах показано, что выработки, пройденные на разных горизонтах залегания, оказывают существенное взаимное влияние.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ 15-05-05002.

#### Литература

1. Николаевский В.Н. Геомеханика. М.: Недра. 1996. Т. 1 447 с.
2. Макаров П.В., Еремин М.О. Модель разрушения хрупких и квазихрупких материалов и геосред. // Физ. Мезомех. 2013. Т. 16. №1. С. 5–26.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФТОРИРОВАНИЯ ПОРОШКООБРАЗНОГО ВОЛЬФРАМА

**А.А. Журавлев, В.Н. Брендаков**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: alex\_z\_230796@mail.ru

**Аннотация.** С учетом физико-химических основ процесса фторирования вольфрама разработана численная модель фторирования порошка вольфрама, которая хорошо описывает имеющиеся экспериментальные данные. Представлены оригинальные граничные условия, учитывающие механизм фторирования. Выбрана численная схема решения системы дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка. Проведены тестовые расчеты.

**Ключевые слова:** гексафторид вольфрама, численное моделирование, граничные условия.

# NUMERICAL SIMULATION OF PROCESS OF FLUORIDATION POWDERED TUNGSTEN

**A. Zhuravlev and V. Brendakov**

National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: alex\_z\_230796@mail.ru

**Abstract.** Given the physics-chemical bases of process numerical model has been developed for fluoridation tungsten powder which well describes the available experimental data. Presents the original boundary conditions, taking into account the mechanism of fluoridation. Chosen numerical scheme of solution of a system of partial differential equations of second order. Conducted the test calculations.

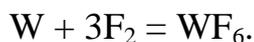
**Keywords:** tungsten hexafluoride, numerical simulation, boundary conditions.

Производство уникальных изделий и покрытий из вольфрама в ряде случаев возможно только при использовании процесса восстановления гексафторида вольфрама водородом. Необходимый для этого исходный материал готовят фторированием вольфрама фтором с последующей конденсацией полученного газообразного продукта.

Современное развитие науки привело к широкому использованию математических моделей в самых разнообразных сферах деятельности. Вопрос о построении новых конструкций аппаратов для реализации конкретного процесса связан с глубоким пониманием данного процесса, а этого можно достичь с помощью математического моделирования, так как оно существенно сокращает материальные затраты, неизменно существующие при физическом моделировании, и время, необходимое для достижения результатов.

Целью настоящей работы является создание математической модели процесса фторирования порошкообразного металлического вольфрама газообразным фтором.

Процесс фторирования металлического вольфрама осуществляется в соответствии с химической реакцией, представленной формулой



Для того, чтобы реализовать процесс фторирования, газообразный фтор пропускают над слоем металлического вольфрама. Проходя по активной зоне реактора, фтор взаимодействует с порошкообразным вольфрамом, в результате чего образовывается гексафторид вольфрама ( $WF_6$ ). В результате такой реакции, концентрация фтора в газовом потоке постепенно уменьшается за счет уменьшения количества фтора и разбавления его образующимся  $WF_6$ . Уменьшение концентрации фтора в двухкомпонентной смеси ведет к уменьшению скорости реакции фторирования. При этом в

соответствии со стехиометрическим коэффициентом по представленной выше формуле, происходит уменьшение скорости газового потока.

В работе рассматривается плоский канал, через который осуществляется течение двухкомпонентной смеси газов, в нижней горизонтальной части канала имеем равномерный слой порошкообразного металлического вольфрама. Если на входе в канал поступает чистый газ фтор, то по мере движения по каналу и в результате реакции фторирования вольфрама, увеличивается доля гексафторида вольфрама в смеси газов.

Таким образом, математическая модель процесса получения газообразного гексафторида вольфрама, представляющая собой систему дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка, типа уравнений переноса, записанных для компонент вектора скорости, энтальпии и концентрации ключевого компонента смеси, а также уравнение неразрывности, может быть решена численно, при известных граничных условиях.

Отличительной особенностью рассматриваемой задачи является оригинальная форма представления граничных условий для газовой смеси на поверхности вольфрама. Функциональная зависимость скорости реакции фторирования, а соответственно и изменение концентрации ключевого компонента, строилась в зависимости от температуры смеси и концентрации фтора возле поверхности нижней границы реактора.

Рассматриваемая в работе задача решалась численно на основе метода конечных разностей. Получаемая система алгебраических уравнений разностного аналога дифференциальных уравнений записывалась в неявном виде. Обобщенную неявную двухслойную схему переменных направлений, представленную в «дельта» форме решали с помощью метода прогонки.

Для проверки достоверности результатов численного моделирования были выполнены тестовые расчеты по определению зависимости степени использования фтора для реакции фторирования от продольной координаты.

Хорошее соответствие расчета и экспериментальных данных позволяет сделать вывод об адекватности созданной модели. Эта модель позволяет проводить численные исследования по выбору оптимальных условий осуществления процесса фторирования порошков тугоплавких металлов.

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗА В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ РАНКА-ХИЛША

**Н.Р. Зейналова**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: nata200605@mail.ru

**Аннотация.** В данной работе проведено численное моделирование температурного разделения потока в вихревой трубе, основанного на принципе Ранка - Хилша. Для описания двумерного закрученного течения вязкого теплопроводного сжимаемого газа привлекается система уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, ик-е модель турбулентности. Построение геометрической области и конечно-объемной сетки выполнено с помощью пакета Gambit. Численное решение математической модели выполнено с помощью пакета Ansys-Fluent. Для аппроксимации конвективных членов уравнений использовалась неявная схема 2-го порядка точности с применением метода Роу для нахождения газодинамических потоков на гранях ячеек. Исследование температурного разделения потока показало, что разность температур на противоположных концах трубы не зависит от давления на входе в вихревую трубу. Определяющим фактором является угол закрутки потока.

**Ключевые слова:** вихревая труба, эффект Ранка - Хилша, температурное разделение.

## NUMERICAL MODELING OF TEMPERATURE GAS SEPARATION IN A RANK-HILSH'S VORTEX TUBE

**N. Zeynalova**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: nata200605@mail.ru

**Abstract.** In this paper, numerical modeling of the temperature flow separation in a vortex tube based on the Rank-Hilsch principle. The numerical solution of the mathematical model is performed using the Ansys-Fluent package. To approximate the convective terms of the equations, we used an implicit second-order accuracy scheme using the Row method to find gas-dynamic flows on the faces of cells. Investigation of the temperature separation of the flow showed that the temperature difference at opposite ends of the pipe does not depend on the pressure at the inlet to the vortex tube.

**Keywords:** vortex tube, Rank-Hilsh's effect, temperature separation.

Вихревые трубы, работающие по изложенному принципу, называются разделительными.

Устройства, работающие по принципу вихревого эффекта можно использовать в различных отраслях промышленности: в качестве сепараторов, осушителей, элементы контрольно-измерительных приборов, для сушки дисперсных материалов. Реализация оборудования включающих

схемы с вихревыми трубами позволит улучшить экологические и экономические показатели основной химической технологии. Процесс энерго-разделения в вихревой трубе рассматривается при следующих допущениях: течение газа является стационарным, турбулентным, закрученным и осесимметричным; среда представляет собой идеальный вязкий сжимаемый газ. Математическая модель включает в себя уравнение неразрывности, уравнения изменения импульса в осевом и радиальном направлениях, уравнение изменения окружной составляющей вектора скорости, уравнение изменения энергии, уравнение изменения кинетической энергии турбулентных пульсаций, уравнение изменения скорости диссипации турбулентной энергии, которые замыкаются уравнением состояния идеального газа. На оси симметрии задаются условия симметрии и равенство нулю радиальной составляющей вектора скорости, на стенках вихревой трубы задается условие прилипания, на выходе из вихревой трубы задается статическое давление равное атмосферному и условие радиального равновесия. На входе в вихревую трубу задаются полное давление, направление потока через направляющие косинусы, интенсивность турбулентных пульсаций и гидравлический диаметр.

Размеры вихревой трубы задавались следующими: длина трубы 168 мм, ширина входного отверстия 2 мм, размер выходного участка с холодным воздухом составил 10.74 мм, размер выходного участка с горячим воздухом 2 мм. С помощью предпроцессора Gambit строились геометрическая область вихревой трубы и разностная сетка, которая состояла из 9840 ячеек.

Математическая модель решалась численно с помощью пакета Ansys-Fluent. Решение системы уравнений осуществлялось при помощи метода конечных объемов. Для аппроксимации конвективных членов уравнений использовалась неявная схема 2-го порядка точности с применением метода Роу для нахождения газодинамических потоков на гранях ячеек.

Было исследовано температурное разделение вихревого потока при следующих полных давлениях на входе в вихревую трубу:  $P=4$  бар,  $P=5$  бар и  $P=7.5$  бар при разных углах закрутки потока. Оказалось, что среднее значение разностей температур на концах трубы практически не зависит от полного давления на входе, и является монотонно возрастающей функцией тангенса угла закрутки (отношение окружной составляющей вектора скорости к радиальной составляющей вектора скорости), который варьировался в диапазоне от 0.5 до 4. Удалось достичь максимального разделения температур в  $38^{\circ}\text{C}$  при тангенсе угла закрутки равном 4.

Анализ распределения полной температуры внутри вихревой трубы показывает, что по мере продвижения от оси к стенкам трубы происходит рост температуры. При этом на левом конце трубы (холодном) реализуется сверхзвуковое истечение газа, тогда как на правом конце (горячем) – дозвуковое.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЕМКостей ДЛЯ ДЕСУБЛИМАЦИИ ФТОРИСТОГО ВОДОРОДА

**А.А. Картавых, А.Ю. Крайнов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: akrainov@ftf.tsu.ru

**Аннотация.** Проведены экспериментальные измерения величины проскока фтористого водорода через приемную емкость, охлаждаемую воздухом с температурой 136 К. Эксперименты проведены на специально подготовленной экспериментальной установке. Измерения проведены аттестованными метрологическими службами приборами. В экспериментах параметры состояния и массовый поток газовой смеси соответствовали параметрам технологического потока. В результате проведенных экспериментов по имитации технологического процесса десублимации фтористого водорода определены величины его проскоков при температуре охлаждения емкости равной 136 К.

**Ключевые слова:** приемные емкости, воздушное охлаждение, десублимация, экспериментальные измерения.

## EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE EFFECTIVENESS OF AIR COOLING OF VESSELS FOR DESUBLIMATION HYDROGEN FLUORIDE

**A. Kartavyh and A. Krainov**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: akrainov@ftf.tsu.ru

**Abstract.** Experimental measurements of the breakthrough of hydrogen fluoride through a receiving vessel cooled with air at a temperature of 136 K are performed. The experiments were carried out on specially prepared experimental setup. The measurements were carried out by certified metrological devices. In experiments, the state parameters and the mass flow of the gas mixture corresponded to the process flow parameters. As a result of the experiments carried out to simulate the technological process of hydrogen fluoride desublimation, the values of its breakthroughs were determined at a capacity cooling temperature equal to 136 K.

**Keywords:** receiver tank, air cooler, desublimation, experimental measurements.

При эксплуатации газодиффузионных очистительных каскадов, тренировки емкостей с сырьевым гексафторидом урана (ГФУ), прокачке емкостей на коллекторах питания, отбора и отвала образуются газовые смеси, подлежащие фракционному разделению. Основными компонентами образующихся смесей является ГФУ, фтористый водород (HF), воздух и другие неконденсируемые газы. При разделении, газовая смесь пропускается последовательно через ряд емкостей. Принята трехступенчатая схема фракционного разделения с различными температурными уровнями. Для де-

сублимации HF и следов ГФУ (проскоков) применяются специальные емкости, так называемые осадители (ОС), охлаждаемые жидким азотом. Для ведения процесса десублимации принят температурный уровень 77 К.

Из температурных уровней при фракционном разделении самым затратным для производства является процесс охлаждения ОС жидким азотом. При работе с жидким азотом имеются вредные и опасные производственные операции.

Снизить затраты производства на эксплуатацию возможно, если применить в качестве хладоносителя холодный воздух. В таком случае необходимо решить вопрос об эффективном температурном уровне ведения технологического процесса десублимации HF.

По результатам расчетов [1], на основе разработанной математической модели определены остаточные концентрации HF для случаев охлаждения жидким азотом и холодным воздухом. Остаточная концентрация HF при воздушном охлаждении до температуры 113 К больше концентрации HF при охлаждении жидким азотом до принятого температурного уровня в 77 К.

В специальной научно-технической литературе отсутствуют надежные данные о величинах проскоков HF как при охлаждении емкостей жидким азотом, так и холодным воздухом. Возможный проскок оценивается величинами от 10% до 30% общего расхода газовой смеси в случае применения в качестве охладителя жидкого азота. При охлаждении ОС холодным воздухом с температурой 113 К величина проскока HF не известна.

Для определения истинных величин проскока HF и оценки возможности применения холодного воздуха для охлаждения ОС в процессе фракционного разделения были проведены опытные работы. Опытные работы проводились на экспериментальной установке [2] и заключались в имитации технологического процесса десублимации HF. Для проведения работ был принят температурный уровень потока воздуха равный 136 К. В предварительно охлажденный ОС до температуры 136 К напускалась газовая смесь, компонентами которой являлись ГФУ и HF с постоянным расходом, равным расходу в технологическом процессе. Для улавливания проскоков HF был установлен еще один ОС, охлаждаемый жидким азотом. Обработка результатов измерений проводилась с использованием полученной в [3] зависимости давления фтористого водорода от температуры. По величине изменения массы ОС охлаждаемого жидким азотом и емкостей с HF и ГФУ подводился материальный баланс эксперимента.

В результате проведенных экспериментов по имитации технологического процесса десублимации HF определены величины проскоков HF при температурном уровне равном 136 К.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-48-700732 p\_a.

## Литература

1. Дурновцев М.И., Картавых А.А., Крайнов А.Ю., Чуканов М.В., Шрагер Э.Р. Оценка возможности применения воздушного охлаждения для замещения использования жидкого азота в производстве по разделению изотопов урана: сб. трудов IX всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики (ФППСМ-2016)», г. Томск. Томск: Томский государственный университет, 2016. С. 392–394.
2. Дурновцев М.И., Губанов С.М., Картавых А.А., Крайнов А.Ю. Стенд для измерения давления насыщенных паров при низких температурах // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики (ФППСМ-2016): сб. трудов IX всероссийской научной конференции, 21–25 сентября 2016 года, г. Томск. Томск: Томский государственный университет, 2016. С. 392.
3. Губанов С.М., Дурновцев М.И., Крайнов А.Ю. Давление насыщенного пара фтористого водорода в области низких температур // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90, № 3. С. 667–669.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РАЗЛОЖЕНИЯ ПОЛИУРАНАТОВ АММОНИЯ

**В.В. Ким, В.Н. Брендаков**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: delicious\_pear@list.ru

**Аннотация.** В данной статье выполнено исследование напряженно-деформированного состояния усиленных пустотных плит. Представлены численные и аналитические расчеты пустотных плит, усиленных и без усиления. Аналитические расчеты выполнялись согласно нормативным документам. Численное моделирование выполнялось в ПК ANSYS. При этом в ANSYS выполнялось моделирование и расчет как пустотной плиты в ее естественной форме, так и расчет этой же плиты, представленной в форме двутавровой балки с уменьшением площади сечения исходя из площади пустот в плите. В результате исследования были получены численные расчеты напряженно-деформированного состояния пустотных плит в двух представлениях, а также схемы трещин на разных стадиях разрушения. Цель данного исследования: выяснить, как и насколько будут отличаться результаты численных расчетов пустотной плиты при разрушающей нагрузке, моделируя ее в естественной и упрощенной двутавровой форме. При этом расчеты выполнены в нелинейной постановке при разрушающей нагрузке, с образованием пластического шарнира в растянутой зоне сечения плиты. Приблизительная разрушающая нагрузка устанавливалась в результате аналитического расчета.

Сопоставление расчетов показывает, что представление усиленных плит в форме двутавровых балок для расчетов имеет погрешности. И эта погрешность может быть разной в зависимости от метода усиления конструкции.

**Ключевые слова:** полиураты аммония, термическое разложение, математическая модель.

# MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF DECOMPOSITION OF AMMONIUM POLYURANATES

V. Kim and V. Brendakov

National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: delicious\_pear@list.ru

**Abstract.** The issues associated with the creation of a mathematical model of the process of thermal decomposition of ammonium polyuranodon. Assumptions made by the system of equations describing the closed loop of the main processes in a drum of the rotary kiln. The algorithm of calculation of temperature and degree of thermal decomposition of ammonium polyuranodon, which allows optimization of parameters and modes of operation rotating drum furnace on the basis of mathematical modeling methods.

**Keywords:** polirenta ammonium thermal decomposition, mathematical model.

В настоящее время атомная энергетика – один из важнейших источников электрической энергии. Отрасль занимает третье место после угольной энергетике и гидроэнергетике. В структуре отрасли – четыре крупных научно-производственных комплекса: предприятия ядерного топливного цикла, атомного машиностроения, ядерного оружейного комплекса и отраслевые научно-исследовательские институты.

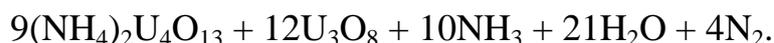
Одним из основных промышленных методов производства оксидов урана является метод химической денитрации уранилнитрата. Поэтому исследование процесса термического разложения полиуранатов аммония имеет большое практическое значение. Одним из ключевых конструктивных элементов такой технологии является барабанная вращающаяся печь. Термическая диссоциация полиуранатов аммония является весьма сложным процессом, и вследствие этого, несмотря на многочисленные данные о таком процессе, до сих пор не существует общепринятых закономерностей, описывающих его.

Во-первых, различные данные имеют противоречивый характер, и, во-вторых, реальный эксперимент связан с большой стоимостью и высокой сложностью его выполнения. Исходя из этого, становится оправданным использование методов математического моделирования, достоверно описывающих реальные процессы, происходящие в барабанной вращающейся печи. Создаваемые модели могут быть использованы для проведения численных экспериментов, позволяющих решить задачи по оптимизации режимных и геометрических параметров самого устройства и выявлять факторы, оказывающие существенное влияние на процесс прокаливания полиуранатов аммония.

Данная работа посвящена описанию предварительного варианта создаваемой математической модели барабанной вращающейся печи. Постановка задачи заключается в том, чтобы выбрать обоснованные допущения, которые не искажают основное содержание реального процесса, и в то же

время позволяют записать в виде математических соотношений ключевые физико-химические процессы, реализуемые в печи.

При построении модели за основу был выбран аппарат, работающий на Сибирском химическом комбинате. Печь представляет собой цилиндрическую ёмкость диаметром  $D=0.6$  м и длиной  $L=8.8$  м, расположенную под углом наклона два градуса к горизонту, и вращающуюся с постоянной скоростью 3.33 об/мин. Степень заполнения прокалочной печи исходным продуктом составляет 3.0...3.5 %. Время нахождения продукта в барабане составляет порядка 20 мин. Там при температуре 450...650°C происходит необратимая эндотермическая реакция термического разложения тетраураната аммония:



В прокалочную печь подается предварительно нагретый азот, расход которого составляет от 6 до 20 м<sup>3</sup>/ч. При проведении процесса термического разложения в атмосфере азота возрастает содержание урана в конечном продукте по сравнению с проведением того же процесса при продувке барабанной печи воздухом. Проведение процесса в инертной среде способствует уменьшению гранул конечного продукта, снижению рабочей температуры на 50...150°C, повышает химическую активность оксида урана, ускоряет последующую операцию фторирования, повышает степень и скорость термического разложения и снижает энергетические затраты на 20...30%.

Учитывая малый размер частиц исходного продукта (порядка 150...200 мкм), а также большой свободный объем в рабочей зоне прокалочной печи, можно сделать следующие допущения:

- реакция протекает только по записанному выше уравнению;
- физико-химические свойства материала не зависят от температуры;
- подвод тепла от стенки печи к слою материала осуществляется только теплопроводностью;
- время пребывания материала в аппарате не зависит от производительности;
- температура  $T_w$  нагревателей среды по всей длине печи остается постоянной.

Таким образом, задача создания математической модели физико-химических процессов, протекающих в прокалочной печи при термическом разложении дисперсного порошка полиураната аммония, состоит в том, что бы описать движение однородной сыпучей среды в рабочей зоне аппарата с учетом необратимой гетерогенной эндотермической реакции и процессов теплопереноса. В первом приближении можно рассмотреть двумерное движение слоя материала с постоянной скоростью. Течение газа внутри цилиндрической печи описывается системой уравнений На-

вье–Стокса. Для описания распределения температуры внутри аппарата используется уравнение конвективного теплообмена с учетом дополнительных источников теплоты. Решается сопряженная задача, теплопроводность в порошкообразном веществе и конвективный теплообмен в движущемся газе. Для оценки степени превращения использовалась эмпирическая зависимость, полученная в результате экспериментальных исследований на промышленной установке в условиях реального технологического процесса.

Таким образом, система дифференциальных уравнений второго порядка совместно с граничными и начальными условиями представляют собой математическую модель процесса термического разложения в виде замкнутой системы, достаточной для определения характера изменения температуры и степени превращения внутри прокаточной печи.

Созданная математическая модель решалась численно с использованием метода конечных разностей. Разностный аналог дифференциальных уравнений записывался в виде чисто неявной схемы, т.к. она является, безусловно, устойчивой. Совместное решение этой системы находилось методом установления по времени с использованием алгоритма прогонки. На каждом шаге итерационного процесса вычислялось распределение температуры, и затем на основании ее находилась степень превращения.

Для оценки степени адекватности созданной математической модели реальному процессу, происходящему в барабанной вращающейся печи, был проведен тестовый расчет. Хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных позволяет сделать вывод о возможности использования данной математической модели для проведения расчетов по оптимизации параметров и режимов работы барабанной вращающейся печи.

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ГИПЕРСКОРОСТНОГО ПОТОКА ЧАСТИЦ ПРИ ВЗРЫВНОМ ОБЖАТИИ ТРУБКИ ИЗ КОРУНДА**

**Т.А. Киселева**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
Сибирского отделения Российской академии наук, Россия  
E-mail: bobarykina@ngs.ru

**Аннотация.** Проведено экспериментальное исследование влияния дозвуковой струи аргона на силу аэродинамического сопротивления тела в сверхзвуковом потоке воздуха. Эксперименты проводились в сверхзвуковой аэродинамической установке МАУ-М ( $d_c = 50$  мм,  $M = 1.45$ ,  $Re_1 = 1,4\text{--}3,8 \times 10^7$  м<sup>-1</sup>). Аэродинамическая сила, действующая на модель, измерялась с помощью однокомпонентных аэродинамических весов, изготовленных на базе тензометрических датчиков CAS BCL-1L.

Параллельно основному потоку вводилась дозвуковая струя газообразного аргона через трубку ( $d = 4$  мм). При обтекании торца трубки (без выдува аргона) сверхзвуковым потоком формировался донный след. Существование донного следа вызывает снижение сопротивления модели ввиду его влияния на течение вблизи модели. При введении в поток дозвуковой струи аргона происходит дополнительное уменьшение силы аэродинамического сопротивления относительно силы, действующей на модель в сверхзвуковом потоке, содержащем донный след. Эффект снижения уменьшается при удалении модели от среза подводящей аргон трубки. Максимальное снижение аэродинамической силы в результате воздействия составляло 30% относительно силы, действующей на модель в содержащем донный след сверхзвуковом потоке, и реализовывалось при удалении модели от среза подающей аргон трубки на 21.6 мм.

**Ключевые слова:** сверхзвуковой поток, аэродинамическое сопротивление, инъекция газа.

## ON THE EFFECT OF A SUBSONIC ARGON JET ON AERODYNAMIC DRAG OF A BODY IN SUPERSONIC AIR FLOW

**T. Kiseleva**

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Russian Federation  
E-mail: bobarykina@ngs.ru

**Abstract.** In this work we investigate the effect of subsonic argon jet on the model's aerodynamic drag in supersonic air flow. The experiments were carried out in a supersonic aerodynamic installation of MAU-M ( $d_c = 50$  mm,  $M = 1.45$ ,  $Re_l = 1.4-3.8 \times 10^7$  m<sup>-1</sup>). Aerodynamic drag force acting on the model was measured by wind-tunnel balance. They were made on the basis of strain gauge CAS BCL-1L.

Argon jet was ducted through the tube ( $d = 4$  mm) along the axis of the air flow. The boattail wake was formed when the flow around the end of the tube (without blowing out argon) by a supersonic flow. The boattail wake causes a decrease in the drag of the model due to its influence on the flow near the model. The blowing of the argon jet led to a sharp decrease in the measured force relative to the force acting on the model in a supersonic flow with the boattail wake. The reduction effect decreases when the model approaches from the end of the argon supply tube. The maximum decrease in the aerodynamic drag force as a result of the action was 30% relative to the force acting on the model in the supersonic flow with the boattail wake and was realized when the model was approached from the end of the argon supply tube by 21.6 mm.

**Keywords:** supersonic flow, aerodynamic drag, gas injection.

Задача управления обтеканием тел, движущихся в атмосфере со сверхзвуковой скоростью, является актуальной. Одной из наиболее важных в практическом плане является проблема снижения аэродинамического сопротивления тел. Наряду с традиционными способами снижения аэродинамического сопротивления (оптимизация геометрии тела), в настоящее время исследуются методы активного воздействия на поток, обтекающий тело. В частности рассматривается создание перед обтекаемым телом локальных или распределенных неоднородностей потока [1-2]. В работе по-

292

казано, что создание перед телом мелкомасштабной неоднородности приводит к перестройке режима обтекания тела, что влечет снижение аэродинамического сопротивления. Введение энергии лазерного излучения [3] и создание теплового следа [4] также приводит к уменьшению силы аэродинамического сопротивления.

Целью представленной работы является экспериментальное исследование влияния выдува дозвуковой струи аргона перед обтекаемым телом на его аэродинамическое сопротивление в сверхзвуковом потоке воздуха. Эксперименты проводились в сверхзвуковой аэродинамической установке МАУ-М ( $d_c = 50$  мм,  $M = 1.45$ ,  $Re_l = 1,4\text{--}3,8 \times 10^7$  м<sup>-1</sup>). Модель была выполнена в виде комбинации полусферы и цилиндра (диаметр модели 7 мм, длина 25 мм). Аэродинамическая сила, действующая на модель, измерялась с помощью однокомпонентных аэродинамических весов, изготовленных на базе тензометрических датчиков CAS BCL-1L. Параллельно основному потоку вводилась дозвуковая струя газообразного аргона через трубку ( $d = 4$  мм). При обтекании торца трубки (без выдува аргона) сверхзвуковым потоком формировался донный след. Существование донного следа вызывает снижение сопротивления модели ввиду его влияния на течение вблизи модели.

В связи с присутствием неоднородностей в сверхзвуковом потоке, для выявления влияния выдува дозвуковой струи аргона, эксперименты проводились следующим образом. После установления рабочего режима измерялась действующая на модель сила  $F_0$  в сверхзвуковом воздушном потоке, содержащем спутный (донный) след. Затем подавалась струя аргона и фиксировалась изменение действующей на модель аэродинамической силы  $F_{Ar}$ . Сила аэродинамического сопротивления, измеряемая при выдуве аргона  $F_{Ar}$ , нормировалась на величину  $F_0$ . Это позволяло выявить относительное изменение сопротивления модели с достаточно высокой точностью, поскольку измерения проводились в течение одного пуска установки, а значит при одинаковых условиях.

В результате было выявлено, что при введении в поток дозвуковой струи аргона происходит уменьшение силы аэродинамического сопротивления относительно силы, действующей на модель в сверхзвуковом потоке, содержащем донный след. Эффект снижения уменьшается при удалении модели от среза подводящей аргон трубки. Так, при расстоянии между моделью и срезом подающей аргон трубки 46.5 мм, изменение силы аэродинамического сопротивления модели в результате выдува дозвуковой струи аргона в составляло  $5 \pm 1\%$ , а при расстоянии 26.5 мм –  $17 \pm 3\%$ . Максимальное снижение аэродинамической силы в результате воздействия составляло 30% относительно силы, действующей на модель в содержащем донный след сверхзвуковом потоке, и реализовывалось при удалении модели от среза подающей аргон трубки на 21.6 мм.

## Литература

1. Георгиевский П.Ю., Левин В.А. Управление обтеканием различных тел с помощью локализованного подвода энергии в сверхзвуковой набегающий поток // Изв. РАН. МЖГ. 2003. № 5. С. 154-167.
2. Гувернюк С.В., Савинов К.Г. Отрывные изобарические структуры в сверхзвуковых потоках с локализованной неоднородностью // Докл. РАН. 2007. Т. 413. № 2. С. 188–192.
3. Iwakawa A., Shoda T., Majima R., Pham S.H., Sasoh A. Mach Number Effect on Supersonic Drag Reduction using Repetitive Laser Energy Depositions over a Blunt Body. Transactions of the Japan society for aeronautical and space sciences. Vol. 60 (2017) No. 5. P. 303-311.
4. Kiseleva T.A., Orishich A.M., Shulyatyev V.B., Golyshev A.A., Yakovlev V.I. AIP Conference Proceedings 1893, p. 030026 (2017).

## ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ СТРУКТУРЫ СВОБОДНЫХ И ИМПАКТНЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЙ

С.Г. Кундасев, В.И. Запрягаев, Н.П. Киселев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
Сибирского отделения Российской академии наук, Россия  
E-mail: kundasev.sergey@gmail.com

**Аннотация.** Представлены результаты комплексного экспериментально-численного исследования ударно-волновой структуры свободных сверхзвуковых неизобарических струй, истекающих из конического сопла, сопла с цилиндрической вставкой и косым срезом. Также представлены результаты исследования взаимодействия сверхзвуковой струи, истекающей из конического сопла с плоской преградой при различных углах наклона. Приведены шлирен-изображения течения, поля измеренного полного давления для свободных струй, а также распределения пристенного давления по поверхности преграды для импактных струй. Для свободных струй показаны основные особенности ударно-волновой структуры течения, проведен сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных. Для импактных струй показаны основные особенности течения, описан характер растекания сверхзвуковой струи по преграде для различных режимов истечения и углов наклона преграды.

**Ключевые слова:** сверхзвуковая струя, ударно-волновая структура, недорасширенная струя, перерасширенная струя, эксперимент, численное моделирование, импактная струя.

# INVESTIGATION OF THE SHOCK-WAVE STRUCTURE OF FREE AND IMPINGING SUPERSONIC JETS

S. Kundasev, V. Zapryagaev and N. Kiselev

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Russian Federation  
E-mail: kundasev.sergey@gmail.com

**Abstract.** This paper presents the results of a complex experimental and numerical research of free supersonic nonisobaric jets exhausting from an axisymmetric conical nozzle and from a beveled nozzle with cylindrical section. Also the results of a study of a supersonic jet impinging on a flat plate are presented with varying inclination angles of plate. For free jets schlieren images of the flow structure and pitot-pressure fields are presented with addition of experimental near-wall pressure fields for impact jets. For free jets main flow features are shown and the comparative analysis of experimental and CFD data is performed. For impact jets the main flow features are presented and the pattern of the flow near obstacle on various gas-dynamic regimes and incline angles are described.

**Key words:** supersonic jet, shock-wave structure, underexpanded jet, overexpanded jet, experiment, CFD, impinging jet.

Актуальность изучения высокоскоростных струйных течений обусловлена их значимостью при практических инженерных работах, связанных с процессами смешения и горения, звукообразования, автоколебаний, взаимодействия с жидкой средой и с твердыми преградами, их применением в ракетно-космической и авиатехнике техники. При разработке перспективных многоразовых возвращаемых аппаратов предполагается использование многоструйных двигательных систем для эффективного торможения вблизи посадочной поверхности. Возникновение в процессе посадки вторичных течений между корпусом аппарата и поверхностью требует подробного изучения сверхзвуковых струй, создаваемых соплом двигательной установки аппарата, а также ее взаимодействия с посадочной поверхностью [1].

Целью работы является выявление физических механизмов течения при взаимодействии сверхзвуковой струи с плоской наклонной преградой, изучение ударно-волновой структуры течения, формирующейся на поверхности преграды, а также получение надежных экспериментальных данных для валидации численных методов.

Для проведения работы выбран комплексный подход, в основе которого лежат экспериментальные данные, полученные на установках АТ-326 и ВСУ ИТПМ СО РАН, которые дополняются результатами численного моделирования течения.

Исследование разделено на три части: на первом этапе исследована ударно-волновая структура сверхзвуковой перерасширенной струи [2], истекающей из конического сопла с диаметром выходного сечения  $D_a=30$  мм и числом Маха на срезе  $Ma=3$  при отношении давлений  $N_{pr}=21.4$ ,

$N_{pr} = P_0/P_e$ , где  $P_0$  – давление торможения (в форкамере установки),  $P_e$  – давление в окружающей среде. В ходе работы были проведены зондовые измерения давления Пито в характерных сечениях струи, выполнена шлирен-визуализация течения и осуществлено численное моделирование исследуемой сверхзвуковой струи. В результате работы получены экспериментальные данные по структуре свободной сверхзвуковой перерасширенной струи  $Ma=3$ , которые могут быть использованы для верификации результатов численного моделирования.

Были показаны основные факторы, влияющие на точность получаемых экспериментальных данных: особенности конструкции газодинамической установки, несовпадение геометрической и газодинамической осей струи, малые отклонения геометрии сопла, необходимость учета времени на выравнивание давления в пневмотрассах зонда. Полученные экспериментальные результаты использованы для верификации результатов численного моделирования структуры течения исследуемой струи. Показано удовлетворительное количественное соответствие результатов расчета данным эксперимента для начального газодинамического участка струи.

Во второй части работы было проведено исследование ударно-волновой структуры сверхзвуковой струи, истекающей из сопла с цилиндрической вставкой и косым срезом [3], угол среза  $\alpha = 18.7$ .  $Ma=3.52$ ,  $N_{pr}=105.3$ . В ходе работы были выполнены зондовые измерения давления Пито в виде дельтовых полей в поперечных сечениях струи, шлирен-визуализация течения в плоскости симметрии задачи и численное моделирование течения.

По результатам исследований получены новые данные по структуре сверхзвуковой струи  $M=3.52$ , истекающей из сопла с цилиндрической вставкой и косым срезом. Эти данные могут быть использованы для верификации численных моделей. Достигнуто качественное соответствие результатов численного расчета и данных эксперимента. По данным зондовых измерений вычислен угол отклонения струи от оси сопла, составивший как для расчета, так и для эксперимента  $50$ . Толщина слоя смещения, полученная в результате численного расчета, соответствует данным эксперимента.

В третьей части работы выполнено исследование взаимодействия струи, истекающей из конического сопла  $Ma=3$   $Da=15$  мм для двух значений относительного давления  $N_{pr}=21.4$  (перерасширенный режим истечения) и  $50$  (недорасширенный режим), взаимодействующей с плоской преградой [4] при расстоянии вдоль оси сопла от среза до преграды  $H/Da=2$  и углах наклона  $\omega=0, 15, 30$ . Были проведены подробные дренажные измерения давления на поверхности преграды в области пятна контакта и выполнена шлирен-визуализация течения в плоскости симметрии задачи.

В результате экспериментального исследования были получены данные о структуре сверхзвуковой струи, натекающей на плоскую наклонную преграду. Показано наличие сверхзвуковой веерной струи, растекающейся по

преграде, и изменение ее газодинамической структуры в зависимости от угла наклона преграды и нерасчетности истечения. Для перерасширенного режима истечения струи выявлено наличие кольцевого периферийного максимума давления на преграде при нормальном натекании, обусловленного меньшими потерями полного давления в системе косых скачков уплотнения. Зарегистрированы различия ударно-волновые структуры течения при растекании веерной струи вдоль наклонной преграды для пристенных потоков в направлениях увеличения или уменьшения расстояния от среза сопла. Показана общность характера структуры течения веерной струи для перерасширенного и недорасширенного режимов истечения. Полученные данные могут быть использованы для валидации результатов численных расчетов.

### Литература

1. *Dyad'kin A.A., Sukhorukov V.P., Rybak S.P., Zapryagaev V.I., Kiselev N.P., Kundasev S.G., Sobolev A.V., Gubanov D.A.* Simulation of the reentry vehicle supersonic brake jets interaction with landing surface // 7th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS 2017) (Italy, Milano, 3–6 july, 2017): Proceedings. S. 1.: 2017. P. 1–9. DOI: 10.13009/EUCASS2017–116
2. *Запьягаев В.И., Кавун И.Н., Кундасев С.Г.* Расчетно-экспериментальное исследование газодинамической структуры сверхзвуковой перерасширенной струи // Вестник НГУ. Сер. Физика. 2013. Т. 8. №. 4. С. 84–92.
3. *Запьягаев В.И., Кавун И.Н., Кундасев С.Г.* Расчетно-экспериментальное исследование сверхзвуковой неизобарической струи, истекающей из сопла с косым срезом // Вестник НГУ. Сер. Физика. 2014. Т. 9. №. 2. С. 75–83.
4. *Запьягаев В.И., Киселев Н.П., Кундасев С.Г.* Структура течения при взаимодействии сверхзвуковой перерасширенной струи с плоской наклонной преградой // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2016. №. 2 (45). С. 32-49. DOI: 10.15593/2224-9982/2016.45.02

## ХИМИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА РАДИКАЛОВ В АРГОН-СИЛАНОВОЙ ПЛАЗМЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ

**А.А. Ляхов**

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Россия  
E-mail: lyah@rambler.ru

**Аннотация.** Проведен численный анализ химической кинетики нейтральных компонент аргон-силановой плазмы пониженного давления. Основу модели составляет система уравнений диффузии для реактора цилиндрической геометрии с учетом газофазных реакций. Анализ кинетики химических реакций влияющих на генерацию радикала SiH<sub>3</sub> показывает, что диссоциация электронным ударом превалирует только в на-

чальных стадиях плазмохимического процесса, а при  $t > 1$  мс основной вклад обусловлен диссоциацией метастабильными частицами аргона. Анализируется парциальный вклад наиболее существенных реакций в прирост и убыль других продуктов разложения. Высшие силаны и их радикалы не оказывают существенного влияния на кинетику основных компонентов при  $t < 10$  мс.

**Ключевые слова:** аргон-силановая плазма, кинетика силановых радикалов, реакционно-диффузионные процессы в плазме.

## CHEMICAL KINETICS OF RADICALS IN ARGON-SILANE LOW-PRESSURE RF PLASMAS

A. Lyahov

Dostoevsky Omsk State University, Russian Federation

E-mail: lyah@rambler.ru

**Abstract.** The numerical analysis of chemical kinetics of neutrals in argon-silane low-pressure plasmas is considered. The set of diffusion equations in cylindrical geometry with gas-phase chemical reactions is a model's framework. Temporal analysis of chemical reactions influenced on the yield of  $\text{SiH}_3$  (mainly interested radical for film deposition) shows, that the electron dissociation of monosilane is leading only at the early stage, while the dissociation by argon metastables becomes predominant later ( $t > 1$  ms). The contribution of principal chemical reactions on entire source and sink of other silane decomposition products are also discussed. The role of higher silanes and its radicals on the chemical kinetics of base components is not significant up to 10 ms.

**Keywords:** argon-silane plasma, chemical kinetics of silane radicals, reactive diffusion processes in plasmas.

В настоящее время при разработке плазмохимических систем широко применяются методы математического моделирования. Наряду с разработкой комплексных моделей газовых разрядов сохраняют актуальность более простые расчеты, в которых моделируются отдельные подсистемы плазменных сред [1]. В данной работе на основе модели диффузионного переноса реагирующего газа проведен анализ кинетики реакций, ответственных за образование и убыль нейтральных компонентов аргон-силановой плазмы, которая применяется для получения пленок аморфного и микрокристаллического кремния. В модель включено 20 компонент и около 60 химических реакций для условий, соответствующих осаждению пленок аморфного кремния. Константы скоростей реакций электронного удара вычисляются с использованием подпрограммы решения электронного уравнения Больцмана. Более подробное описание модели, учитываемых химических реакций дано в [2].

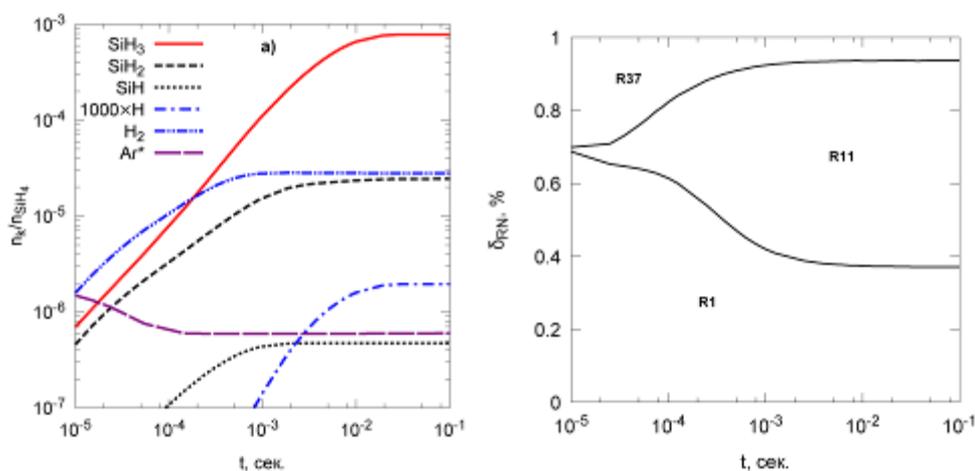


Рис. 1. а) Относительные концентрации компонентов аргон-силановой плазмы в зависимости от времени пребывания газа б) удельный вклад химических реакций в образовании радикала SiH<sub>3</sub>. R1: e + SiH<sub>4</sub> → e + SiH<sub>3</sub> + H; R11: e + SiH<sub>4</sub> → e + SiH<sub>3</sub> + H; R37: Ar\* + SiH<sub>4</sub> → SiH<sub>3</sub> + H + Ar

Расчеты выполнялись для плазмохимического реактора цилиндрической геометрии с радиусом R=6 см длиной L=3 см. Внешние параметры: рабочий газ Ar+5% SiH<sub>4</sub>, давление газа p=0.1 Торр, температура T=500 К. Решение уравнения Больцмана для электронов выполнялось при величине приведенного поля E/N=10<sup>-15</sup> В·см<sup>2</sup> и частоте f = 13,56 МГц. Концентрация электронов принималась равной n<sub>e</sub>=10<sup>9</sup> см<sup>-3</sup>, а относительная заселенность метастабильных состояний аргона Ar\* – n<sub>Ar\*</sub>/n<sub>Ar</sub> = 10<sup>-6</sup>. Интервал моделирования ограничивался временем T=0,1 с.

Зависимости относительных концентраций компонентов (нормированных на начальную концентрацию моносилана) от времени приведены на рис.1,а. Концентрация SiH<sub>3</sub>, наиболее важного радикала для осаждения пленок, а также атомарный водород выходят на стационарный уровень в течение 10<sup>-2</sup> с. Концентрации радикала SiH и молекулярного водорода, который имеет значительное содержание в составе плазмы, принимают стационарные значения в течение ~10<sup>-3</sup> с. Несколько позже устанавливается концентрация SiH<sub>2</sub>. На рис.1,б приведены удельные вклады реакций, ответственных за прирост радикала SiH<sub>3</sub> из которого видно, что с течением времени из-за постепенного накопления водорода в реакторе возрастает роль реакции R11.

На основе проведенного анализа кинетики реакций образования и гибели основных компонентов аргон-силановой плазмы: SiH<sub>x</sub> (x=1-4), H, H<sub>2</sub>, Ar\* , можно заключить, что для t<10<sup>-4</sup> с плазмохимический процесс осуществляется, в основном, электронным ударом и реакциями с участием метастабильных частиц аргона. В дальнейшем значительную роль начинают играть процессы с участием атомарного водорода, а также реакции полимеризации моносилана.

## Литература

1. *Kushner M.J.* A model for discharge kinetics and plasma chemistry during plasma enhanced chemical vapor deposition of amorphous silicon // *J. Appl. Phys.* 1988. Vol. 63. P. 2532-2551.

2. *Ляхов А.А., Струнин В.И.* Численный анализ кинетики химических реакций в аргон-силановой плазме тлеющего разряда // *Вестник ТГУ. Математика и механика.* 2017. №50. С. 79-89.

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ НЕЧЕТКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

**Я.С. Матюхина**

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика  
М.Ф. Решетнева, Россия  
E-mail: yanavaio@yandex.ru

**Аннотация.** В работе рассматривается метод самонастройки параметров генетического алгоритма на основе нечеткого контроллера под управлением генетического алгоритма. Проведены сравнения средних значений надежности нечетких систем с разными методами самонастройки. В результате у нечеткой системы управления параметрами генетического алгоритма, настраиваемой с помощью генетического алгоритма, средние значения надежности больше, чем у стандартного генетического алгоритма.

**Ключевые слова:** эволюционный алгоритм, генетический алгоритм, нечеткий контроллер, самонастройка.

## THE AUTOMATED FUZZY CONTROL SYSTEM OF PARAMETERS OF A GENETIC ALGORITHM

**Y. Matyukhina**

Siberian State University of Science and Technology named after academician  
M.F. Reshetnev, Russian Federation  
E-mail: yanavaio@yandex.ru

**Abstract.** The paper considers a method of bootstrapping parameters of the genetic algorithm based on fuzzy controller under control of a genetic algorithm. Comparisons of the average values of reliability of fuzzy systems with different methods of bootstrapping. As a result of the genetic algorithm parameters fuzzy control system, adjusted with the genetic algorithm, the average values of reliability greater than that of a standard genetic algorithm.

**Keywords:** evolutionary algorithm, genetic algorithm, fuzzy controller, self-tuning.

Быстрый темп развития современных технологий позволяет моделировать различные процессы на компьютере, проектировать сложные системы, управлять ими. Однако для исследования характеристик любой систе-

мы математическими методами необходимо провести формализацию этого процесса, то есть, построить математическую модель. Проведение исследований с помощью математических моделей зачастую являются единственно возможным способом изучения и решения важнейших практических задач управления. Задача оптимизации параметров математической модели является одной из важнейших на сегодняшний день. Это произошло по той причине, что параметры математической модели далеко не всегда оптимальны, поэтому математическая модель не соответствует реальному процессу.

С увеличением уровня развития науки и техники, широкое распространение получили сложные задачи оптимизации, которые порой невозможно решить с помощью обычных методов оптимизации. Это приводит к необходимости в разработке и применении методов для решения сложных оптимизационных задач. К таким методам относятся эвристические алгоритмы.

На сегодняшний день эволюционные алгоритмы [1] доказали свою конкурентоспособность на большом количестве задач. Интеллектуальные информационные технологии применяются для решения задач моделирования, классификации и прогнозирования [2]. Проектирование информационных технологий является достаточно сложной интеллектуальной процедурой. Затруднение вызывает не только разработка интеллектуальных информационных технологий, но и процесс выбора их эффективных структур. Например, при проектировании генетического алгоритма необходимо осуществить выбор его оптимальных настроек. Не совсем удачно подобранные параметры для конкретной задачи могут существенно снизить эффективность работы генетического алгоритма. Это приводит к серьезным затруднениям для расширения возможности применения эволюционных алгоритмов [3, 4].

Именно по этой причине имеется необходимость в разработке методов самонастройки [7] и внедрения их в генетический алгоритм, не прибегая к подбору настроек алгоритма вручную.

Одним из методов управления настройками является применение нечеткого контроллера [8], который представляет собой регулятор, построенный на основе нечеткой логики. В основе операции нечеткого логического вывода лежат функции принадлежности для определенных лингвистических переменных и база правил, которая содержит нечеткие высказывания [5, 6]. Правильно составленная база правил для нечеткого контроллера способствует повышению эффективности алгоритма. Сформировав нечеткий контроллер один раз, можно его применять для широкого спектра задач оптимизации. Возникла идея использовать генетический алгоритм для выбора наилучшей базы правил для нечетких контроллеров управления вероятностью мутации, селекции и скрещивания, данная процедура была добавлена к основному генетическому алгоритму (рис. 1).

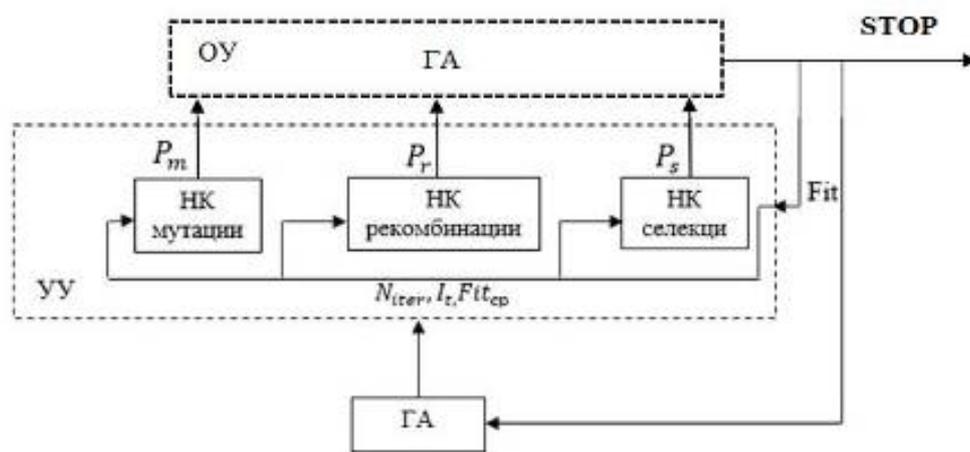


Рис. 1. Схема нечеткой системы управления параметрами генетического алгоритма, настраиваемая генетическим алгоритмом

Сравним средние надежности нечеткой системы управления генетическим алгоритмом и автоматизированной нечеткой системы управления параметрами генетического алгоритма (табл. 1)

Таблица 1. Средние надежности алгоритмов

Задача	НС управления ГА	НС упр. параметрами ГА, настраиваемая ГА
1	0,84	0,8811111111
2	0,88	0,9077777778
3	0,7	0,8037037037
4	0,72	0,7755555556
5	0,6	0,6977777778
6	0,66	0,7259259259
7	0,9	0,9177777778
8	0,92	0,9585185185
9	0,98	0,9792592593
10	0,98	1

Полученные результаты являются статистически значимыми ( $5,36738E-05 > 0.05$ ).

Полученные результаты показали, что автоматизированная нечеткая система управления параметрами генетического алгоритма имеет на всех функциях надежность значительно больше, чем стандартный генетический алгоритм.

## Литература

1. *Eiben A.E., Smith J.E.* Introduction to Evolutionary Computing. Springer Verlag Berlin, 2003.
2. *Haupt R.L., Haupt S.E.* Practical genetic algorithms. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004.
3. *Батищев Д.И.* Генетические алгоритмы решения экстремальных задач / под ред. Я.Е. Львовича: учеб. пособие. Воронеж, 1995. 69 с.
4. *Батищев Д.И., Скидкина Л.Н., Трапезникова Н.В.* Глобальная оптимизация с помощью эволюционно - генетических алгоритмов // Мужвуз. сборник, ВГТУ, Воронеж, 1994.
5. *Валландер Н.* Нечеткие множества. Нечеткая логика, 2004. 512 с.
6. *Кофман А.* Введение в теорию нечетких множеств. М.: Радио и связь, 1982. 432с.
7. *Матюхина Я.С.* Методы самонастройки в эволюционных алгоритмах // Решетневские чтения, 2016, Т.2, с. 63-64.
8. *Рутковская Д.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. М: Горячая линия-Телеком, 2006.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВЗВЕСИ ПЫЛИ В U-ОБРАЗНОМ КАНАЛЕ

**К.М. Моисеева, Д.А. Крайнов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
Томский политехнический университет  
Moiseeva\_KM@t-sk.ru

**Аннотация.** В настоящей работе было выполнено моделирование движения двухфазной среды в U-образном канале в двухмерной постановке задачи. Целью моделирования являлось исследование влияния размера частиц и скорости подачи смеси на входе в U-образный канал на концентрацию частиц в канале. Область течения представляла собой закрученный канал протяженностью 0.1 м, шириной 0.006 м. Решение задачи проводилось с использованием неявного алгоритма установления (Pressure-based).

Для расчета были выбраны частицы радиуса 100, 50, 10 мкм. Согласно результатам расчета имеет место высеивание частиц на стенки канала. В области поворота канала при высоких скоростях подачи смеси формируется вихрь, который способен отбросить частицы к стенкам канала на повороте. Влияние этого вихря существенно для крупных частиц, мелкие частицы увлекаются газом и движутся в направлении выхода канала. Таким образом, учитывать распределение частиц по поперечному сечению канала стоит при размерах частиц более 10 мкм и высоких скоростях течения смеси.

**Ключевые слова:** U-образный канал, газовзвесь, Ansys Fluent.

# SIMULATION OF A GAS DUST SUSPENSION FLOW IN A U-SHAPED CHANNEL

**K. Moiseeva and Dm. Krainov**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: Moiseeva\_KM@t-sk.ru

**Abstract.** In this paper, we simulated the motion of a two-phase medium in a U-shaped channel in a two-dimensional formulation of the problem. The aim of the simulation was to investigate the effect of the particle size and the rate of supply of the mixture at the entrance to the U-channel on the concentration of particles in the channel. The flow area was a swirling channel 0.1 m long, 0.006 m wide. The solution of the problem was carried out using an implicit pressure-based algorithm. For the calculation, particles of radius 100, 50, and 10  $\mu\text{m}$  were chosen. According to the results of the calculation, the particles are sown onto the walls of the channel. In the region of channel rotation at high feed rates of the mixture, a vortex is formed which is capable of scattering particles to the walls of the channel at the turn. The effect of this vortex is significant for large particles; small particles are entrained in the gas and move in the direction of the exit of the channel. Thus, it is necessary to take into account the distribution of particles along the cross section of the channel at particle sizes of more than 10  $\mu\text{m}$  and high flow rates of the mixture.

**Keywords:** U-shaped channel, gas suspension, Ansys Fluent.

Задача движения газозвеси возникает в ряде технических приложений, таких как задачи зажигания, детонации и горения газозвесей, задачи теплообмена и движения двухфазных сред в реакторах, соплах и горелках. Согласно научной литературе смесь газа и частиц перемещается с практически равной скоростью при малых размерах частиц, порядка 1  $\mu\text{m}$ , и малой запыленности газа. Увеличение размера частиц, а также усложнение формы канала может привести к появлению скоростного отставания частиц от газа.

Настоящая работа посвящена исследованию движения двухфазной среды в U-образном канале [1]. Целью моделирования является исследование влияния размера частиц и скорости подачи смеси на входе в U-образный канал на концентрацию частиц в канале.

Задача решалась в двухмерной постановке. Область течения представляет собой U-образный канал, представленный в работе [1] и показанный на рис. 1. Протяженность канала  $L = 0.1$  м, ширина канала  $d = 6 \cdot 10^{-3}$  м. Внешние стенки канала полагались теплоизолированными. Между внутренними стенками и смесью задавался идеальный тепловой контакт. Смесь газа и частиц подается в канал со стороны  $x = 0$ , проходит через верхнюю часть канала и на границе  $x = L$  меняет направление движения, на границе  $x = 2L$  смесь вытекает. При течении двухфазной смеси по каналу возможно попадание частиц в застойную зону или циркуляционную зону канала.

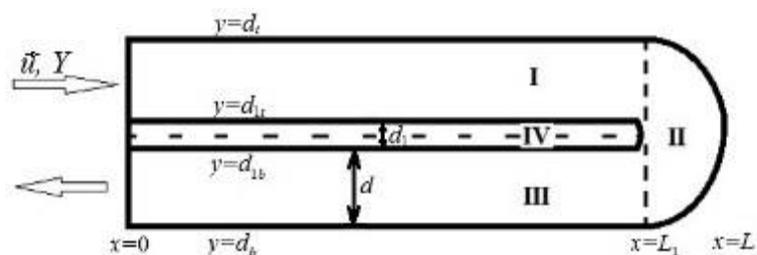


Рис. 1. Модель U-образного канала. I – входной канал, II – область поворота, III – выходной канал, IV – внутренняя вставка

Решение задачи проводилось в пакете ANSYS Fluent с использованием неявного алгоритма установления (Pressure-based). В качестве мультифазной модели была выбрана модель Эйлера (Eulerian multiphase model) совместно с моделью дискретной фазы (Discrete Phase Model). Для решения задачи была использована расчетная сетка с количеством ячеек более 18000 с максимальным размером ячейки  $9 \cdot 10^{-8}$  мм<sup>2</sup>. Решение проводилось до установления потока, контролировался размер невязок.

Для расчета были выбраны частицы радиуса  $10^{-4}$  м,  $5 \cdot 10^{-5}$  м,  $10^{-5}$  м с массовым содержанием частиц в смеси от 5 до 10%. Для таких размеров частиц, согласно литературе, скоростное отставание частиц от газа может оказаться существенным.

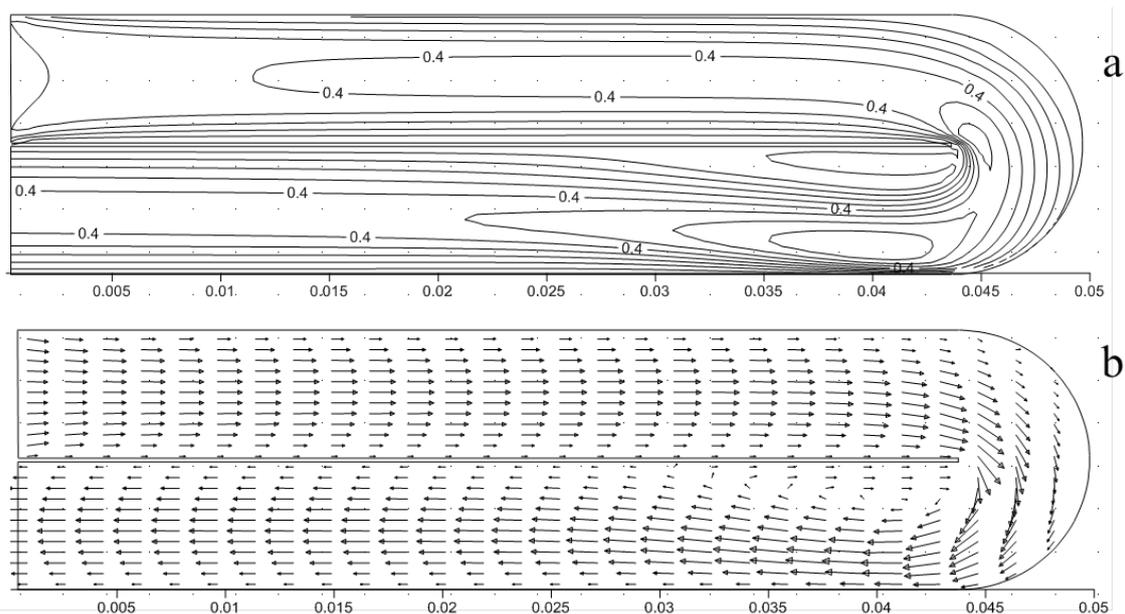


Рис. 2. Скорость движения частиц в канале, построенное в изолиниях (поле а) и векторах (поле б). Радиус частиц  $10^{-5}$  м, скорость смеси на входе в канал 0.03 м/с

Согласно результатам расчета имеет место высеивание частиц на стенки канала. В области поворота канала при высоких скоростях подачи смеси формируется вихрь, который способен отбросить частицы к стенкам канала на повороте. Влияние этого вихря существенно для крупных частиц.

Более мелкие частицы увлекаются газом и движутся в направлении выхода канала. Из расчетов следует, что при высоких скоростях подачи смеси основное скопление частиц наблюдается в окрестности внешней стенки выходного канала и в области поворота. При малых скоростях движения и крупные, и мелкие частицы скапливаются на внутренней стенке и в окрестности внешних стенок входного и выходного каналов. Пример полученных результатов представлен на рис. 2.

Таким образом, учитывать распределение частиц по поперечному сечению канала стоит при размерах частиц более  $10^{-5}$  м и высоких скоростях течения смеси. Распределение частиц по поперечному сечению канала может оказывать влияние на скорость горения двухфазных сред. В этом случае нужно привлекать двухмерные модели для расчета задач движения и химического реагирования газодисперсной среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-33-60091 мол\_a\_дк).

### Литература

1. *Крайнов А.Ю., Моисеева К.М.* Влияние скорости подачи газа на устойчивость горения метановоздушной смеси в щелевой горелке с внутренней вставкой // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2015. № 1(33). С. 63–71.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОГО ЕСТЕСТВЕННО-КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА В ПОМЕЩЕНИИ С ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИМИ ЦИЛИНДРАМИ

**К.М. Моисеева, Л.Л. Миньков, А.Ю. Крайнов, С.М. Губанов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: Moiseeva\_KM@t-sk.ru

**Аннотация.** Проведено моделирование стационарного турбулентного естественно-конвективного течения вязкого теплопроводного воздуха в помещении, содержащим тепловыделяющие цилиндры, расположенных группами попарно в пять ярусов, и имеющих на своей поверхности несколько зон различной температуры, которая поддерживается постоянной в каждой зоне. Теплые зоны нагревают окружающий их воздух, а холодные зоны охлаждают его, в результате чего в помещении возникает естественно-конвективное движение воздуха. Показано, что в помещении при наличии тепловыделяющих цилиндров может устанавливаться стационарное поле температур без дополнительного охлаждения.

**Ключевые слова:** теплообмен, естественная конвекция, моделирование.

# SIMULATION OF STATIONARY NATURAL-CONVECTIVE AIR FLOW IN A ROOM WITH HEAT GENERATING CYLINDERS

**K. Moiseeva, L. Minkov, A. Krainov and S. Gubanov**

National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: Moiseeva\_KM@t-sk.ru

**Abstract.** The simulation of the stationary turbulent natural convective flow of viscous heat-conducting air in the room containing heat-releasing cylinders arranged in groups of five tiers in pairs and having several zones of different temperatures which are kept a constant ones for each zone. Warm zones heat the air around them, and the cold zones cool it, as a result of which a naturally convective air movement arises in the room. It is shown that in the room in the presence of heat-generating cylinders a stationary temperature field can be established without additional cooling.

**Keywords:** heat exchange, natural convection, simulation.

Рассматривается стационарное турбулентное естественно-конвективное течение вязкого теплопроводного воздуха в помещении, содержащим тепловыделяющие цилиндры (ТЦ), которые расположены группами попарно в пять ярусов. Каждый ТЦ имеет несколько зон различной температуры, на поверхности которых поддерживается постоянная температура. Теплые зоны нагревают окружающий их воздух, а холодные зоны охлаждают его, в результате чего происходит естественно-конвективное движение воздуха.

Область, в которой исследуется естественно-конвективное течение, ограничена шестью плоскостями и представляет собой прямоугольный параллелепипед.

Стационарное турбулентное естественно-конвективное течение вязкого теплопроводного воздуха в помещении описывается трехмерными уравнениями Навье – Стокса для несжимаемого идеального газа с привлечением k-модели турбулентности, с учетом действия силы Архимеда. Система определяющих уравнений, включающая в себя уравнения сохранения массы, импульса, энергии, уравнения для кинетической энергии турбулентных пульсаций и скорости диссипации турбулентной энергии, замыкается уравнением состояния.

На внешних границах области, представляющих собой плоскости симметрии, задавались условия симметрии, на стенках ТЦ задавалось условие прилипания и значение температуры.

Для решения поставленной задачи привлекался вычислительный пакет Ansys Fluent. Система определяющих уравнений решалась численно с использованием метода Патанкара. Конвективные члены уравнений аппроксимировались с помощью противопоточной схемы второго порядка точности. Согласование полей скорости и давления осуществлялось по алгоритму SIMPLE на сдвинутой сетке (метод PRESTO!).

Расчетная область разбивалась на 960128 шестигранных ячеек. Точность расчета контролировалась балансом тепловых потоков и потоков массы.

После установления поля течения и поля температуры внутри помещения, воздух становится стратифицированным по высоте – более холодный воздух находится в нижней части помещения, а более теплый воздух – вверху помещения. При этом точность расчета составила 0.04 Вт. Диаграмма распределения тепловых потоков для различных зон ТЦ и ярусов показывает, что на нижнем ярусе верхняя часть ТЦ интенсивно отдает тепло в окружающий воздух, тогда как поток тепла в нижнюю ее часть незначителен. По мере продвижения вверх по ярусам интенсивность потока тепла в нижнюю часть ТЦ возрастает. Оценка теплового потока в целом по ТЦ показывает, что только ТЦ первого яруса и левый ТЦ третьего яруса отдают тепло в окружающий воздух, как более холодный относительно стенок ТЦ, тогда как все другие ТЦ забирают тепло.

Потоки тепла для двух соседних ТЦ (левого и правого рядов) могут существенно различаться, что может быть связано с гидродинамикой течения воздуха. Поле течения в окрестности каждого ТЦ носит сложный вихревой характер, но и имеется качественное сходство. Воздух, находящийся в контакте с более холодными зонами ТЦ, опускается вниз, а воздух, контактирующий с более теплыми зонами, поднимется вверх.

В отсутствии вентиляции температура воздуха в припотолочной области составляет 17.7 °С. Расчет, проведенный для случая, когда температура всех стенок выше на 2°С по сравнению с исходными данными, показал, что температура воздуха в припотолочной области составляет 20.5 °С. Увеличение температуры стенок зон 1, 2, 3 ТЦ еще на 2°С приводит к росту температуры воздуха в припотолочной области до 21.5°С.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-48-700732 р\_а.

## **РАСЧЕТ СКОРОСТИ РОСТА ДАВЛЕНИЯ ПРИ СГОРАНИИ МОНОДИСПЕРСНОЙ НАНОРАЗМЕРНОЙ ВЗВЕСИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ**

**С.Н. Новоселов, К.М. Моисеева**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: novosstepa@mail.ru

**Аннотация.** Работа посвящена расчету скорости роста давления при сгорании монодисперсной наноразмерной взвеси угольной пыли в замкнутом объеме. Постановка задачи учитывает зависимость коэффициента теплопроводности газа от температуры, выход летучих компонентов при нагреве частиц и дальнейшее их горение. Выполнено

параметрическое исследование. Задача решалась методом Рунге–Кутты–Мерсона с автоматическим выбором шага. Из результатов расчета определялась зависимость давления в объеме от времени.

**Ключевые слова:** монодисперсная, летучие компоненты.

## **CALCULATION OF THE RATE OF PRESSURE GROWTH DURING COMBUSTION OF A MONODISPERSE NANOSIZED COAL DUST SUSPENSION IN A CLOSED VOLUME**

**S. Novoselov and K. Moiseeva**

National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: novosstepa@mail.ru

**Abstract.** The work is devoted to the calculation of the rate of pressure growth during combustion of a monodisperse nanosized coal dust suspension in a closed volume. The formulation of the problem takes into account the dependence of the thermal conductivity of the gas on temperature, the yield of volatile components upon heating of the particles, and their subsequent combustion. A parametric study was performed. The problem was solved by the Runge-Kutta-Merson method with automatic step selection. From the calculation results, pressure versus time was determined as a function of pressure.

**Keywords:** monodisperse, volatiles.

Работа основана на экспериментах по сжиганию наноразмерного аэрозоля угольной пыли в замкнутом объеме [1] и математической модели [2]. В работе [1] было показано, что присутствие наноразмерного аэрозоля в метано-воздушной смеси приводит к увеличению скорости роста давления в замкнутом объеме. В работе [2] выполнено численное исследование сгорания полидисперсной взвеси угольной пыли в метано-воздушной смеси в замкнутом объеме, проанализировано влияние состава смеси на скорость роста давления в объеме.

В настоящей работе исследована задача сжигания наноразмерной монодисперсной взвеси угольной пыли в замкнутом объеме. Математическая постановка задачи учитывает выход летучих компонент при нагреве частиц и дальнейшее их горение; зависимость коэффициента теплопроводности газа от температуры. В постановке задачи учитывался расход окислителя на гетерогенную реакцию первого порядка на поверхности частиц и гомогенную реакцию второго порядка между кислородом и летучими в газе. Выход летучих компонент из частиц задавался реакцией первого порядка по закону Аррениуса. В отличие от работы [2] полагалось, что объем теплоизолирован, потерями тепла в окружающую среду пренебрегалось. Задача определяется уравнениями энергии для газа и частиц; парциальной плотности окислителя и летучих в газе; сохранения массы частиц, летучих компонент в частицах и смеси в объеме; в качестве замыкающих уравне-

ний использованы уравнение состояния для газа и уравнение расчета радиуса частиц.

Задача решалась методом Рунге–Кутты–Мерсона с автоматическим выбором шага. Параметры расчета соответствовали [2]. В расчетах варьировался размер частиц; массовая концентрация частиц в объеме; содержание летучих компонент в частицах. Из результатов расчета определялась зависимость давления в объеме от времени.

Результаты расчета показали, что при одних и тех же значениях радиуса и массовой концентрации частиц в объеме величина максимального давления, достигаемого в объеме, была выше для частиц с наибольшим содержанием летучих. Сравнение результатов расчета для частиц с одинаковым содержанием летучих и с одной массовой концентрацией взвеси пыли показало, что увеличение размера частиц приводит к увеличению времени сгорания аэровзвеси.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-20011).

### Литература

1. Валиулин С.В., Бакланов А.М., Дубцов С.Н., Замащиков В.В., Клишин В.И., Конторович А.Э., Коржавин А. А., Онищук А.А., Палеев Д.Ю., Пуртов П.А., Куйбида Л.В. Влияние наноаэрозольной фракции техногенной угольной пыли на горение метановоздушных смесей // Физика горения и взрыва. 2016. Т. 52, № 4. С. 36–50.

2. Крайнов А.Ю., Моисеева К.М., Палеев Д.Ю. Численное исследование сгорания полидисперсной газозвеси угольной пыли в сферическом объеме // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8. № 3. С. 531–539.

## К ПРОБИТИЮ ОДНОРОДНЫХ И ДВУХСЛОЙНЫХ СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН С УДАРНИКОМ С ЗАКРУГЛЕННОЙ ГОЛОВНОЙ ЧАСТЬЮ

**М.Ю. Орлов, Г.Н. Богомолов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: orloff\_m@mail.ru

**Аннотация.** В работе представлены результаты лабораторного эксперимента по нормальному пробитию однородных и двухслойных стальных пластин. Проведена высокоскоростная съемка процесса до 325 м/с. Отмечено сквозное пробитие пластин, количественно оценена деформация ударника и выявлены основные закономерности процесса пробития. Предпринята попытка измерить скорость лидирующих осколков и массы отрывной тарелки. Полученные результаты следует трактовать как качественные тесты.

**Ключевые слова:** Пробитие, ударник, стальная пластина, деформация, разрушение.

# ABOUT A PENETRATION OF HOMOGENEOUS AND TWO-LAYER STEEL BARRIERS BY PROJECTILE

M. Orlov and G. Bogomolov

National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: [orloff\\_m@mail.ru](mailto:orloff_m@mail.ru)

**Abstract.** The results of an impact test are presented. Penetration of single-layer and two-layer steel plate by projectile has been studied experimentally. High speed photography performed using the high-speed camera in the range of up to 325 m/s. Cross-cutting penetration of plates, the degree of deformation of the projectile and the main regularities of the destruction plate process were found. The results obtained should be interpreted as qualitative tests.

**Keywords:** post penetrating analysis, projectile, steel plate, deformation, destruction.

Постоянное совершенствование средств кинетического воздействия на защищаемые объекты заставляет разработчиков противоударных защит искать новые пути по повышению их ударной стойкости. В связи с тем, что в этой области возможности конструкционных материалов ограничены, возникает определенный научный интерес исследования свойств функционально-градиентных и пористых материалов, высокопрочных тканей, керамик и т.д. при динамическом нагружении. Рассматривается попытка использования упомянутых материалов в составах новейших защитных конструкций: слоисто-скрепленных и блочно-модульных, а также сэндвич-панелей. Наиболее свежие исследовательские работы доложены на различных научных конференциях и симпозиумах, в том числе «Light Weight Armour Group» (Международное научное сообщество по легко-весовой броне) [1].

В НИИ прикладной математики и механики систематически ведутся поисковые научные исследования о поведении структурно-неоднородных материалов при ударных и взрывных нагрузках. На основе классической сложной модели механики сплошных сред разработана физико-математическая модель деформирования и разрушения структурно-неоднородных материалов при ударных и взрывных нагрузках. Модель соответствует современным представлениям о деформировании и разрушении материалов при динамических нагрузках. На базе лагранжевого метода Джонсона Г.Р. развита методика моделирования, оригинальность которой заключается в новом способе выделения поверхностей разрыва сплошности материалов для решения указанного класса задач МДТТ. Развивается экспериментальная база (экспериментальный стенд с высокоточными приборами регистрации быстропротекающих процессов) и согласованный массив экспериментальных данных для апробации математических моделей и алгоритмов расчета.

В настоящей работе исследовано поведение тонких стальных пластин при нормальном соударении с ударниками оживальной формы при дозвуковых начальных скоростях. В качестве преград рассмотрены однородные и двухслойные стальные пластины (Ст. 3). Толщина пластины – 1 мм. Ударник – пуля от ПМ-9 со стальным сердечником в свинцовой рубашке (масса 6.1 гр, начальная скорость 325 м/с). Работа является логическим продолжением исследований из [2].



Рис. 1. Результаты лабораторного эксперимента: тыльная сторона стальной пластины и «пробка», ударник после пробития однослойной и двухслойной пластин

Детальный осмотр пластин после соударения показал следующее. Диаметр отверстия в пластине сопоставим с диаметром ударника в цилиндрической части. С лицевой стороны металлическая пластина была вогнута внутрь. Область пластического деформирования пластины (имеется в виду начало прогиба) не превышала двух диаметров ударника. Края пробоины были ровные и гладкие. Реконструкция процесса взаимодействия подтвердила данный факт. Никаких аномалий выявлено не было. Пробитие сопровождалось отрывом небольшой «пробки», размеры которой сопоставим с диаметром ударник. Высокоскоростная съемка зафиксировала факт наличия маленьких (около 1 мм) стальных осколков. Пробитие двухслойной пластины привело еще к большей деформации головной части ударника. В обоих случаях процесс пробития был сквозным. Данные результаты можно трактовать как качественные тесты, т.к. запреградная скорость ударника получена не была.

Авторы благодарны Междисциплинарной кафедре ТПУ и Обществу Практической Пулевой Стрельбы (Томское Отделение) за помощь в проведении исследований.

### Литература

1. Официальный сайт: Международного научного сообщества по легковесовой броне [Электронный ресурс] [http://dymat-assoc.com/groups/lightweight\\_armour\\_group.html](http://dymat-assoc.com/groups/lightweight_armour_group.html)
2. Maxim Yu. Orlov, et al Experimental study of the penetrating of plates by projectile at low initial speeds // Journal of Physics Conference Series 919(1) 012002

## ИМПУЛЬСНЫЙ РАСПЫЛИТЕЛЬ ПОРОШКОВ

**К.Г. Перфильева, В.А. Архипов, А.И. Коноваленко, В.И. Романдин**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: k.g.perfiljeva@yandex.ru

**Аннотация.** Рассмотрена новая схема устройства для распыления порошка, обеспечивающая повышение эффективности и надежности распыливания. Принцип действия устройства состоит в создании импульсного газоприхода продуктов сгорания твердотопливного газогенератора с пластинчатым составным зарядом и интенсификации процесса аэрации порошка в контейнере. Представлены результаты исследования расходных характеристик газогенератора в процессе распыления.

На основе полученных результатов показано, что для надежного функционирования устройства необходимо обеспечить сверхкритический режим истечения из газогенератора. При этом режиме параметры газа в контейнере не влияют на рабочие процессы в газогенераторе. Получена расчетная циклограмма изменения расхода газа из газогенератора в процессе его функционирования.

**Ключевые слова:** газогенератор, заряд твердого топлива, система аэрации порошка, газопорошковая смесь.

## IMPULSE FACILITY FOR POWDERS SPAYING

**V. Arkhipov, K. Perfiljeva, A. Konovalenko, V. Romandin**

National Research Tomsk State University; Russian Federation  
E-mail: k.g.perfiljeva@yandex.ru

**Abstract:** New scheme of the powders spaying facility providing the increase in efficiency and reliability of a spaying is considered. Principle of operation of the facility consists in creation of pulse gas-arrival of combustion products of a solid-propellant gas generator with a laminar compound charge and intensification of process of aeration of powder in a container. Research results of account characteristics of a gas generator in the course of spaying are presented. On the basis of the received results it is shown that for reliable functioning of the facility it is necessary to provide the supercritical behaviour of the expiration from a gas generator. At this mode gas parameters in a container don't influence working processes in a gas generator. The calculation cyclogram of change of a consumption of gas from a gas generator in the course of his functioning is received.

**Keywords:** gas generator, charge of solid propellant, system of aeration of powder, gas powder mix.

Устройства для распыления порошков в воздушной и газовой среде имеют широкое практическое применение: в модулях порошкового пожаротушения, в системах распыления сорбента при ликвидации разливов нефти, для перевода в аэрозольное состояние порошкообразных материалов, для получения модельных аэрозолей при лабораторных исследованиях в химической и металлургической отраслях промышленности.

Для повышения эффективности и надежности распыливания порошка путем создания импульсного газопритока продуктов сгорания газогенератора и интенсификации процесса аэрации порошка предлагается новая схема устройства для распыления порошков [1]. Для этого заряд твердого топлива газогенератора выполнен в виде чередующихся сплошных и канальных дисков, что позволяет получить колебание давления в газогенераторе и, следовательно, колебание расхода газа из газогенератора. При иницировании пиротехнического воспламенителя поджигается торцевая поверхность первого сплошного диска. Продукты сгорания диска, горящего со стороны торца, через диафрагму, сопло и газовод поступают в трубку системы аэрации. При истечении продуктов сгорания через тангенциальные перфорации, выполненные на боковой поверхности трубки, происходит аэрация порошка противоположно закрученными потоками газа. При достижении рабочего давления в корпусе срезается мембрана и происходит вытеснение газопорошковой смеси через сопло. После сгорания первого сплошного диска, продукты сгорания через центральное отверстие в первом канальном диске проникают в систему радиально-концентрических канавок, поджигая две противоположные торцевые поверхности канального диска и торцевую поверхность следующего сплошного диска. При этом площадь поверхности горения увеличивается в три раза и, соответственно, увеличивается расход продуктов сгорания в систему аэрации порошка. После сгорания канального диска, площадь поверхности горения уменьшается до площади поверхности сплошного диска и уменьшается расход продуктов сгорания в систему аэрации порошка. При сгорании второго сплошного диска, цикл работы газогенератора повторяется.

Было проведено исследование расходных характеристик газогенератора в процессе распыления. Для этого рассмотрен заряд твердого топлива (порох Н) [2], состоящий из 11-ти дисков диаметром  $D=5\text{ см}$  (шести сплошных и пяти канальных). Заряд составляется в последовательности (от сопла газогенератора): сплошной диск, канальный диск и т.д.

Расчетная циклограмма изменения расхода газа из газогенератора во время работы приведена на рис. 2. Циклограмма расхода газа, поступающего на аэрацию порошка, представляет собой рабочий режим  $t_{\text{раб}}$  (при горении сплошного диска) с наложенными на него пульсациями повышенного расхода  $t_{\text{имп}}$  (при совместном горении сплошного и канального дисков). Частота следования импульсов повышенного расхода газа и их длительность зависит от толщин канальных и сплошных дисков.

Таким образом, в предлагаемом устройстве реализуется импульсный режим подачи газа, что обеспечивает эффективное и надежное аэрирование и распыливание порошка.

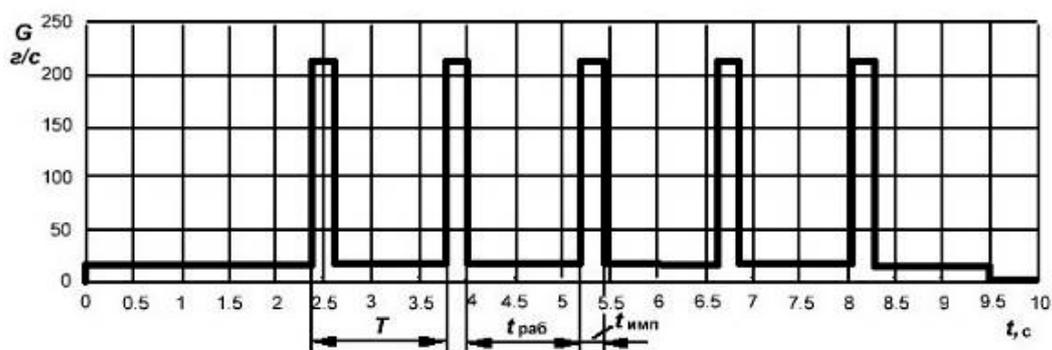


Рис. 1. Циклограмма изменения расхода газа из газогенератора во время работы

### Литература

1. Заявка на патент РФ № 2017116914, с приоритетом от 15.05.2017. Устройство для распыления порошков, МПК В05В 7/14, А62С 35/00 / В.А. Архипов, А.И. Коноваленко, К.Г. Перфильева, В.И. Романдин.

2. Шишков А.А., Панин С.Д., Румянцев Б.В. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива: справочник. М.: Машиностроение, 1998. 240 с.

## О МАКСИМАЛЬНО ВОЗМОЖНОМ РАДИАЦИОННОМ КПД ИНФРАКРАСНЫХ ГОРЕЛОК

**Н.С. Пичугин, А.С. Мазной, А.И. Кирдяшкин**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: pichugin.n.s@inbox.ru

**Аннотация.** Приведены оценки максимально возможного радиационного КПД инфракрасных горелок в зависимости от условий работы: состава топливной смеси (для топлив: ацетилен, пропан, метан, водород, аммиак), удельной мощности, коэффициента черноты пористой излучателя. Показано, что при заданных условиях можно обеспечить радиационный КПД до 90%.

**Ключевые слова:** радиационная горелка, пористая горелка, инфракрасная горелка, КПД.

## RADIANT BURNERS WITH MAXIMAL RADIATION EFFICIENCY

**N. Pichugin, A. Maznoy and A. Kirdychkin**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: pichugin.n.s@inbox.ru

**Abstract.** Estimations of the maximum possible radiation efficiency of infrared burners are given depending on the operating conditions: the composition of the fuel mixture (for fuels: acetylene, propane, methane, hydrogen, ammonia), firing rate, emissivity of the porous emitter. It is shown that it is possible to provide a radiation efficiency of up to 90%.

**Key words:** radiant burner, porous burner, infrared burner, efficiency.

Радиационные горелки успешно используются для отопления рабочих зон промышленных объектов, а также во множестве технологических процессов, где необходим нагрев поверхностей. Основным принципом работы радиационной горелки является стабилизация зоны горения на поверхности или в объеме газопроницаемого материала-излучателя, через который фильтруется топливная смесь. В результате теплообмена продуктов сгорания с телом излучателя, последний нагревается до высоких температур, что приводит к генерации мощных потоков инфракрасного излучения. Коэффициент полезного действия радиационных горелок определяют как долю мощности, перешедшей в инфракрасный поток. Источниками ИК потока могут являться как газообразные продукты сгорания, так пористый проницаемый излучатель горелки, поэтому радиационный КПД существенно зависит от вида топливной смеси, дизайна горелки и способа реализации горения газа в ней. Если горение происходит над поверхностью излучателя (внешний режим горения), то радиационный КПД обычно не выше 30%, так как теплообмен между продуктами горения и телом излучателя ограничен. При организации горения под изучающей поверхностью горелки (внутренний режим горения) радиационный КПД горелок существенно выше, до 60%. Достижение максимально возможного радиационного КПД позволит более эффективно использовать горелки для различных технологических процессов. Целью настоящей работы является теоретическая оценка максимально возможного радиационного КПД при сжигании таких топливо-воздушных и топливо-кислородных смесей на основе метана, пропана, водорода, ацетилен и аммиака.

Для расчёта радиационного КПД рассматривалось уравнение сохранения энергии, где в левой части исходная энергия системы (затраченная на предварительный подогрев реакционной смеси и выделившаяся при сгорании газа), а в правой сумма энергии лучистого потока с поверхности горелки (согласно закону Стефана-Больцмана) и количества тепла газообразных продуктов сгорания. Обширные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что максимально возможный радиационный КПД будет достигаться при равенстве температур уходящих продуктов сгорания  $T_g$  и поверхности излучателя  $T_s$ . Используя известные зависимости удельных теплоёмкостей компонентов газовых смесей и продуктов сгорания от температуры согласно NIST Chemistry WebBook, а также принимая  $T_s = T_g$  был проведен расчёт максимально возможного радиационного КПД горелки. Использовались следующие допущения:

1. Топливная смесь полностью реагирует в объёме излучателя радиационной горелки с образованием равновесных продуктов сгорания, компоненты которых являются несжимаемыми и не подвергаются диссоциации при высоких температурах;
2. Предварительный подогрев топливной смеси возможен только за счёт внешних источников энергии;

3. Излучатель горелки является однородно нагретым серым телом, мощность ИК потока с поверхности которого зависит только от температуры его приповерхностных слоёв.

4. Не учитывается вклад излучения паров воды и двуокиси углерода из газовой оболочки, сформированной продуктами сгорания вокруг излучателя горелки. Это связано с невозможностью корректно учесть толщину газового слоя над поверхностью излучателя, которая определяется конкретными условиями эксплуатации оборудования. С учётом этого, приведённые ниже оценки максимально возможного радиационного КПД являются оценкой снизу.

В результате моделирования было установлено, что радиационный КПД горелок при сжигании пропана, метана или водорода примерно одинаков. Так при сжигании топливо-воздушных смесей при удельной мощности  $100 \text{ кВт/м}^2$  радиационный КПД составляет порядка 67-70%, а при мощности  $800 \text{ кВт/м}^2$  снижается до 41–45%. При этом сжигание в кислороде с удельной мощностью  $100 \text{ кВт/м}^2$  позволило увеличить радиационный КПД до 87–88%, а при мощности  $800 \text{ кВт/м}^2$  – до 73–75%.

Расчёты показали, что наибольший радиационный КПД реализуется при сжигании ацетилен. Например, при сжигании с воздухом при удельной мощности в  $100 \text{ кВт/м}^2$  радиационный КПД равен 74%, а при использовании кислорода КПД стал более 90%. При удельной мощности  $800 \text{ кВт/м}^2$  и сжигании с воздухом, радиационный КПД составил 51%, в кислороде – порядка 81%.

Радиационный КПД при сжигании аммиачно-воздушной смеси с удельной мощностью  $100 \text{ кВт/м}^2$  составил 64%, в кислороде этот показатель вырос до 82%. При сжигании аммиака в воздухе, с удельной мощностью в  $800 \text{ кВт/м}^2$ , радиационный КПД составил 36%, в кислороде 64%. Исходя из этого, можно сделать вывод, что аммиак является наименее предпочтительным топливом для генерации излучения пористыми горелками, так как показатель радиационного КПД по сравнению с другими топливами минимален.

Рассмотрим в деталях зависимости радиационного КПД метано-воздушных смесей, наиболее востребованных на практике. Установлено, что для обеспечения максимально возможного радиационного КПД необходимо использовать излучатели с коэффициентом черноты, близким к единице. Расчёты показывают, что увеличение коэффициента избытка воздуха уменьшает, а подогрев реакционной смеси увеличивает радиационный КПД. Так, увеличение коэффициента избытка воздуха до 1,3 понижает КПД на 10%, а подогрев стехиометрического состава на 300 К увеличивает КПД на 10%. В случае подогрева исходной смеси на 300 градусов при удельной мощности порядка  $70 \text{ кВт/м}^2$ , радиационный КПД горелки может превышать 80%. Подтверждение данному факту не было найдено в научной литературе, однако достижение радиационного КПД более 80%

заявлено флагманом отрасли по производству инфракрасных газовых отопителей – фирмой Schwank. Так, для горелок модели supraSchwank, в которых осуществляется подогрев топливо-воздушной смеси на 300 К за счёт рекуперации тепла продуктов сгорания и части ИК потока, декларируется радиационный КПД 80,9%. Следует отметить, что при сжигании метано-воздушных смесей с типичными концентрациями двуокиси углерода 7–9 об.%, паров воды 14–19 об.% и толщинами газовых слоёв 1–5 см, для которых эффективный коэффициент черноты 2-3%, излучением газа можно пренебречь. Эксперименты подтверждают, что полученные оценки радиационного КПД для метано-воздушных смесей качественно и количественно совпадают с КПД горелок, в которых происходит идеальный теплообмен с обеспечением равенства температур уходящих газов и продуктов сгорания.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФТОРИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ВОЛЬФРАМА В ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧИ**

**А.Ю. Порохнин, А.В. Шваб**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: porokhnin\_a@mail.ru

**Аннотация.** В настоящее время перспективным способом получения изделий из тугоплавких материалов определенной формы, к которым относится вольфрам и другие металлы, является метод, основанный на осаждении металла из парогазовой фазы с помощью восстановления его фторидов или хлоридов. Первой фазой данного способа является предварительное получение гексафторидного газа вольфрама, который образуется в результате протекания реакции между газовым фтором и порошком вольфрама. В работе проводится математическое моделирование гидродинамики и теплопереноса в химическом реакторе, активной зоной которого является достаточно протяженный канал прямоугольного сечения, в котором происходит процесс фторирования порошкового вольфрама. Этот процесс осуществляется за счет прохождения газообразного фтора над слоем порошкового вольфрама, расположенного на дне канала. Проходя через активную зону реактора, фтор взаимодействует с вольфрамовым порошком, образуя гексафторид вольфрама. Математическое моделирование этого физического явления проводится на основе решения трехмерных уравнений переноса импульса, теплоты и вещества в бинарной смеси с учетом гетерогенной реакции, проходящей на дне канала между порошком вольфрама и газовым фтором. Численное решение пространственного установившегося течения проводится на основе физического метода расщепления полей скорости и давления на разнесенной разностной сетке. Конвективные и диффузионные слагаемые в уравнениях переноса импульса, теплоты и вещества определяются с помощью экспоненциальной схемы на основе метода контрольного объема. Достоверность численных расчетов подтверждается тестовыми исследованиями и сравнениями с известными решениями других авторов.

**Ключевые слова:** фторирование вольфрама, скорость, давление, температура, концентрация.

# MODELING FLUORINATION PROCESS OF METAL TUNGSTEN IN THE SPATIAL FORMULATION OF THE PROBLEM

**A. Porokhnin and A. Shvab**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: porokhnin\_a@mail.ru

**Abstract.** Currently, promising way of obtaining products of certain refractory materials forms, which include tungsten and based on the metal deposition from the vapor phase by means of its restoring fluorides or chlorides. The first phase of the method is the preliminary preparation of tungsten hexafluoride-gas, which is formed by the reaction between fluorine gas and tungsten powder. In work carried out mathematical modeling of fluid flow and heat and mass transfer in the chemical reactor, the core of which is sufficiently long first section of the rectangular channel, in which the fluorination process powdered tungsten. This process is carried out by passing gaseous fluorine and above the layer of tungsten powder, located on the bottom of the channel. Passing through the reactor core, fluorine reacts with the tungsten powder to form tungsten hexafluoride. Mathematical modeling of this physical phenomenon is based on solving three-dimensional momentum transfer equations, warmth and matter in a binary mixture with the heterogeneous reaction of the channel extending between the bottom of the powder m tungsten and fluorine gas. Numerical solution of the spatial steady flow is based on the physical splitting method of velocity and pressure fields on the diversity difference grid. Convection and diffusion equations in terms of momentum transfer of heat and material determined using an exponential scheme based on control volume method. The reliability of numerical calculations is confirmed by test studies and comparisons with known solutions of other authors.

**Keywords:** fluorination of tungsten, velocity, pressure, temperature, concentration.

В настоящее время актуальной проблемой является получение износостойких покрытий, изделий из тугоплавких материалов сложной формы или других сложных частей аппаратов, работающих при больших температурах, давлениях и касательных напряжениях. Одним из перспективных тугоплавких материалов, который нашел широкое применение в авиационной, космической, химической и атомной промышленности, является, например, вольфрам. Как известно, на практике имеются большие проблемы при его механической обработке.

Однако в последнее время наиболее перспективным способом получения износостойких покрытий или непосредственно изделий из тугоплавких материалов является метод, основанный на осаждении его из парогазовой фазы с помощью восстановления его фторидов или хлоридов. Для реализации этого способа необходимо предварительное проведение процесса фторирования металлического материала. Процесс фторирования обычно проходит в химическом реакторе, активной зоной которого является достаточно протяженный канал, в котором происходит, процесс фторирования порошкового вольфрама. Этот процесс осуществляется за счет прохождения газообразного фтора над слоем порошкового вольфрама, расположен-

ного на дне канала. Проходя через активную зону реактора, фтор взаимодействует с вольфрамовым порошком, образуя гексафторид вольфрама.

Целью данной работы является исследование влияния гидродинамики и тепломассопереноса на процесс получения газообразного гексафторида металла. Для выяснения этого влияния в данной работе проведено численное моделирование классической системы трехмерных уравнений Навье-Стокса в приближении Буссенеска, т.е. в предположении, что плотность смеси не зависит от давления, но является функцией температуры и концентрации. Таким образом, математическая постановка задачи для двухкомпонентной смеси содержит трехмерные уравнения Навье-Стокса с учетом термических и концентрационных подъемных сил, уравнение переноса теплоты с учетом диффузионного переноса энтальпии, уравнение массообмена и уравнения неразрывности при установившемся режиме течения. Предполагается, что для молекулярных коэффициентов переноса теплоты и диффузии используется принцип аддитивности в бинарной смеси. На нижней поверхности канала в реакционной зоне имеет место гетерогенная реакция между металлическим порошком и газообразным фтором, причем в стационарных условиях, в соответствии со стехиометрическими коэффициентами химической реакции ставятся условия для вертикальной составляющей скорости. Так, например, для процесса фторирования вольфрама, в соответствии с химической реакцией, три молекулы фтора порождают одну молекулу гексафторида вольфрама, что приводит к уменьшению расхода смеси на выходе из реакционной зоны канала. В этом случае из баланса расхода смеси следует необходимость постановки отрицательного значения скорости на нижней стенке канала, которая пропорциональна концентрации образованного газа гексафторида вольфрама. Для определения концентрации ключевого компонента на поверхности реакции используется граничное условие третьего рода, в котором учитывается молекулярный диффузионный поток массы и скорость реакции первого порядка с учетом константы реакции, определяемой из эксперимента и, зависящей от температуры, энергии активации и размера частиц порошкового вольфрама. В качестве граничных условий на входе в канал задается постоянная скорость течения, температура и концентрация. В выходном сечении канала ставятся условия установления (условия Неймана) для всех искомых функций. На всех стенках канала, кроме зоны реакции, ставятся условия прилипания для всех составляющих вектора скорости и условия Неймана для температуры и концентрации. В зоне реакции для температуры задается постоянная температура, которая превышает температуру на входе в канал и, имеющая температуру, при которой может идти рассматриваемая химическая реакция. При фторировании вольфрама эта разница температур достигает 350 градусов по Цельсию.

Численное решение полученной стационарной системы уравнений с заданными краевыми условиями проводилось эволюционным методом на

основе решения нестационарных уравнений до установления по времени. Причем, для численного решения уравнений движения использовался метод физического расщепления полей скорости и давления, в результате которого система уравнений переноса импульса расщепилась на три уравнения количества движения для промежуточных сеточных значений составляющих скорости при градиенте давления, взятом на старом временном слое и уравнении Пуассона для поправки к давлению. При получении разностных аналогов уравнений переноса импульса, теплоты, вещества и уравнения для поправки к давлению использовалась разнесенная разностная сетка. Конвективные и диффузионные слагаемые в уравнениях переноса аппроксимировались с помощью известной экспоненциальной схемы и метода контрольного объема. Каждое нестационарное уравнение переноса полученной системы уравнений решалось с помощью известной неявной обобщенной схемы переменных направлений в «дельта» форме, которая для линейного уравнения имеет безусловную устойчивость, и второй порядок точности по времени.

Полученная система уравнений приводилась к безразмерной форме, в результате в уравнениях появились критерии подобия: Рейнольдса, Прандтля, диффузионного Прандтля, Грасгофа и диффузионного Грасгофа. На основе проведенных численных исследований получены закономерности в распределении полей скорости, температуры и концентрации компонентов в бинарной смеси. Получено также распределение интенсивности образования концентрации ключевого компонента смеси, которое образуется на поверхности реакционной зоны, в зависимости от длины этой зоны в протяженном канале с прямоугольной формой его сечения. Представлено сравнение решений с учетом действия термических и концентрационных подъемных сил и при их отсутствии, которое показало о необходимости учета этих сил. Проведено также исследование по влиянию геометрических и режимных параметров на интенсивность процесса фторирования металлического порошка в химическом реакторе. Достоверность численных расчетов подтверждается тестовыми исследованиями и сравнениями с известными решениями других авторов.

## **ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ШНЕКОВОЙ ОСАДИТЕЛЬНОЙ ЦЕНТРИФУГИ**

**А.Е. Соломаха, В.Н. Брендаков**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: solomahaartem@yandex.ru

**Аннотация.** В работе рассматривается физическая модель шнековой осадительной центрифуги. Записана математическая модель и приводится численный метод ее реше-

ния. Приведены результаты тестовых расчетов. Хорошее согласование результатов расчетов с аналитическим решением подтверждает адекватность созданной модели. Решение задачи течения вязкой несжимаемой жидкости строится в переменных «скорость – давление». Сформулированы начальные и граничные условия.

**Ключевые слова:** центробежная сила, вязкое течение, численный метод.

## NUMERICAL MODEL OF SCREW SETTLING CENTRIFUGE

**A. Solomakha and V. Brendakov**

National Research Tomsk State University, Russian Federation

E-mail: solomahaartem@yandex.ru

**Abstract.** The paper considers a physical model of the screw settling centrifuge. Written a mathematical model and provides a numerical method of its solution. The results of test calculations. Good agreement of computed results with the analytical solution confirms the adequacy of the created model. The solution of the problem of flow of a viscous incompressible fluid is constructed in the variables "velocity – pressure". Formulated initial and boundary conditions.

**Key words:** the centrifugal force, viscous flow, numerical method.

Осадительные центрифуги со шнековой выгрузкой осадка находят широкое применение в различных отраслях для разделения суспензий, содержащих твердую фазу с преобладанием частиц размером от 1 до 500 мкм. Эффективность центрифуг характеризуется фактором разделения, представляющего собой отношение центробежного ускорения к ускорению свободного падения. Значение этого параметра для некоторых центрифуг достигает нескольких тысяч. Технологическими преимуществами этих центрифуг являются: непрерывный процесс разделения, устойчивость работы при колебаниях качественного состава разделяемой суспензии, большая гибкость при выборе параметров процесса. Определенным недостатком этих центрифуг в некоторых случаях является повышенная влажность осадка. Учитывая, что осадок центрифуг зачастую подвергается термической сушке, актуальным является усовершенствование центрифуг с целью снижения энергетических затрат на сушку и уменьшения стоимости процесса обезвоживания в целом. В настоящее время задача снижения влажности осадка осадительных шнековых центрифуг решается в следующих основных направлениях: подбор оптимальных режимных параметров процесса разделения, совершенствование конструкции осадительных шнековых центрифуг, создание комбинированных центрифуг.

Схема управления в шнековых осадительных центрифугах позволяет изменять угловые скорости вращения ротора и шнека и, таким образом, менять режим работы центрифуги с целью получить максимально возможную степень очистки суспензии для конкретного вида сырья. Подбор оптимальных режимных параметров процесса разделения в основном сво-

дится к подбору частоты вращения ротора и относительного вращения шнека. Для получения максимально возможной очистки растворов от твердых примесей необходимо задать такое соотношение скоростей ротора и шнека, чтобы время осаждения частицы и уплотнения осадка на барабане ротора не превышало время транспортировки осадка к окнам разгрузки.

Значительную роль во внутрироторном течении жидкости играют силы вязкого трения. Поэтому для решения внутренней задачи гидродинамики, распределения поля скорости в объеме барабана центрифуги, и внешней задачи по осаждению частиц, необходимо строить численную модель шнековой осадительной центрифуги на основе течения вязкой несжимаемой жидкости.

В работе рассматривается численное моделирование течения суспензии на основе системы уравнений Навье – Стокса, записанных в цилиндрической системе координат. На первом этапе моделирования была решена гидродинамическая задача течения вязкой несжимаемой жидкости в круглой трубе.

Основной проблемой решения уравнений движения несжимаемой вязкой жидкости является присутствие в этих уравнениях неизвестной функции гидродинамического давления. В отличие от задач о течении сжимаемой среды, давление не может быть выражено через какие либо физические переменные. Так как в рассматриваемой системе уравнений не присутствует частной производной от давления по времени, то для него нельзя сформулировать задачу с начальными условиями. В настоящее время наиболее перспективным подходом является метод решения уравнений переноса импульса в физических переменных «скорость – давление».

Одним из эффективных способов решения уравнений движения несжимаемой среды в переменных «скорость – давление» является метод физического расщепления по времени полей скорости и давления.

В работе численная модель, представляющая собой систему дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка, аппроксимировалась методом конечных разностей. Полученная система алгебраических уравнений решалась численно на разнесенной разностной сетке при заданных начальных и граничных условиях. Неявная схема уравнений записывалась в «дельта» форме и решалось с помощью численного метода продольно-поперечной прогонки.

Для оценки адекватности созданной численной модели были выполнены тестовые расчеты течения в трубе. Хорошее соответствие между численными и аналитическими решениями позволяют сделать вывод о возможности использовать данную численную модель в дальнейших численных исследованиях режимов работы шнековой осадительной центрифуги.

# ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЛЕЙ ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

**Е.Г. Сугатов, М.А. Матюк, Н.В. Газенаур**

Кемеровский государственный университет, Россия  
E-mail: gazenaur@kemsu.ru

**Аннотация.** В работе представлены результаты физического моделирования процесса кристаллизации некоторых неорганических солей (хлориды, бромиды, азиды серебра, натрия и калия) в постоянном бесконтактном электрическом поле. Показано и экспериментально подтверждено влияние электрического поля на процесс зародышеобразования и дисперсионные характеристики получаемых кристаллов. Предложена методика микрокристаллизации, позволяющая *in situ* проводить исследования процесса кристаллизации неорганических солей. Обнаружено, что электрическое поле способствует зарождению новых центров кристаллизации. Установлены основные факторы, влияющие на процесс кристаллизации данных материалов в электрическом поле (величина напряженности, время обработки). Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации условий кристаллизации широкого круга неорганических солей.

**Ключевые слова:** кристаллизация, электрическое поле, кристаллы, модель.

## PHYSICAL MODELING OF THE PROCESS OF CRYSTALLIZATION OF INORGANIC SALTS FROM AQUEOUS SOLUTIONS IN AN ELECTRIC FIELD

**E.G. Sugatov, M.A. Matyuk and N.V. Gazenaur**

Kemerovo State University, Russian Federation  
E-mail: ketigaz@yandex.ru

**Abstract.** The paper presents the results of physical modeling of the crystallization of certain inorganic salts (chlorides, bromides, azides of silver, sodium and potassium) in a constant contactless electric field. It is shown and experimentally confirmed: the effect of electric field on the nucleation and dispersion characteristics of the resulting crystals. The technique of microcrystallization, allowing *in situ* to study the process of crystallization of inorganic salts was proposed. Discovered that the electric field contributes to the emergence of new centers of crystallization. The main factors influencing the crystallization process of these materials in an electric field (the intensity of the processing time) was installed. The obtained results can be used for optimization of crystallization conditions for a wide range of inorganic salts.

**Key words:** crystallization, electric field, crystals, model.

Анализ опубликованных к настоящему времени работ по изучению и моделированию кристаллизации из растворов в электрическом поле показал отсутствие общепринятой модели процесса, тем не менее, большинство исследователей отмечают влияние электрического поля на процесс зарож-

дения кристаллов. В электрическом поле молекулы вещества, ориентируясь в одном направлении, создают анизотропную среду, во многом аналогичную кристаллической. Рост кристаллов из раствора включает, в качестве основных, следующие процессы: зародышеобразование кристаллов соли в растворе; рост, агрегация, срастание образовавшихся кристаллов в процессе кристаллизации. Предложенная в настоящей работе модель процесса кристаллизации в электрическом поле включает обе стадии кристаллизации с учетом: теории Полака, уравнения Смолуховского, подходов к прогнозированию числа образовавшихся в растворе кристаллов при кристаллизации из водных растворов в электрическом поле, основанных на экспериментально полученных зависимостях. Для выяснения характера действия бесконтактного постоянного электрического поля на процесс кристаллизации, были проведены экспериментальные исследования по выращиванию моно- и микрокристаллов различных неорганических солей, отличающихся по физико-химическим свойствам, по растворимости. Монокристаллы азидов, хлоридов и бромидов серебра, натрия, калия получали, помещая кристаллизатор с насыщенным раствором соответствующей соли, между пластинчатыми электродами в постоянное бесконтактное электрическое поле (напряженность поля варьировали в диапазоне от 100 В/м до 10–4 В/м) до полного испарения растворителя. Для визуализации процесса проводили микрокристаллоскопические исследования, которые полностью моделируют процесс кристаллизации. Микрокристаллы неорганических солей получали, помещая каплю насыщенного раствора соли (диаметром примерно 2 мм) на предметное стекло, расположенное между двумя электродами (в ячейке создавали однородное электрическое поле, напряженность которого варьировали). За процессом образования микрокристаллов наблюдали в микроскоп «Биолам» (окуляр с увеличением Ч120), проводили фото- и видеосъемку. Предложенная методика микроскопического *in situ* исследования позволила не только увидеть поэтапно рост кристаллов, путём прямых измерений их размеров определять скорости зародышеобразования и роста кристаллов на поверхности подложки; но и изучить влияние условий синтеза на форму и дисперсность получаемых микрокристаллов. Экспериментально подтверждено влияние бесконтактного постоянного электрического поля на индукционный период кристаллизации (время появления зародышей кристаллов). Обнаружено влияние слабого бесконтактного электрического поля на скорость и время начала процесса кристаллизации. Установлены и стабилизированы основные факторы, влияющие на процесс кристаллизации рассматриваемых неорганических солей в электрическом поле (величина напряженности, время обработки). Показано, что скорость появления новых центров кристаллизации на единицу площади прямо пропорциональна квадрату напряженности электрического поля. Дисперсионный анализ кристаллов, выращенных в электрическом поле, показал стремление к однотипности и однородности структурных

форм (коэффициент вариации – 15х30% в зависимости от напряженности поля при кристаллизации). Кристаллизация в электрическом поле позволила получать кристаллы, не имеющие видимых в оптический микроскоп объемных дефектов, оптически прозрачные, обладающие совершенной огранкой, размерами которых можно управлять варьированием, в указанном диапазоне, напряженности электрического поля при кристаллизации.

Проведенные исследования позволили выявить основные закономерности кристаллизации неорганических солей из водных растворов в электрическом поле, приблизиться к пониманию механизма влияния электрического поля на процесс кристаллизации. Разработка экспериментально и теоретически обоснованного механизма влияния электрического поля на процесс кристаллизации на уровне элементарных стадий является важнейшей задачей дальнейших исследований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-03-00313).

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИТОСФЕРНЫХ СТРУКТУРАХ ПРИ ИХ СТАТИЧЕСКОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ**

**И.С. Телятников**

Южный научный центр Российской академии наук (ЮНЦ РАН), Россия  
E-mail: ilux\_t@list.ru

**Аннотация.** Рассмотрена модель литосферных структур, контактирующих вдоль прямолинейных геологических разломов, в виде системы составных пластин на упругом основании. Предложено упрощение метода блочного элемента для разноразмерных блоков. Полученные представления решений описывают смещения поверхности и позволяют изучить влияние на напряженно-деформированное состояние структуры с разломами свойств ее элементов и характеристик разломов.

Полученные на основе описанного подхода теоретические результаты могут найти приложения в сейсмологии, геофизике, а также в инженерной практике, например, в судостроении и авиации при решении проблем образования трещин в широко применяемых многослойных покрытиях.

**Ключевые слова:** упругое основание, составное покрытие, статическая нагрузка, метод блочного элемента, факторизация.

# MODELING OF DEFORMATION PROCESSES IN LITHOSPHERIC STRUCTURES DURING THEIR STATIC INTERACTION

И. Telyatnikov

Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences (SSC RAS), Russian Federation  
E-mail: ilux\_t@list.ru

**Abstract.** A model of lithospheric structures contacting along straight geological faults is considered as a system of composite plates on an elastic foundation. A simplification of the block element method for different-sized blocks is proposed. Obtained solutions describing the displacement of the surface and allow one to study the effect on the stress-strain state of the structure with faults of the properties of its elements and the characteristics of the faults.

The theoretical results obtained on the basis of the described approach can find applications in seismology, geophysics, and also in engineering practice, for example, in shipbuilding and aviation in solving problems of crack formation in widely applied multilayer coatings.

**Key words:** elastic base, composite coating, static load, block element method, factorization.

Создание теории сейсмического процесса связано с установлением закономерностей деформационных процессов корового уровня. Верхняя часть земной коры, где сосредоточена деятельность человека, является важным для практики объектом изучения. Несмотря на редкие проявления сейсмичности в виде наведенных геомеханических процессов, экологический ущерб, нанесенный техногенными землетрясениями может быть значительным. Вызванная внешними воздействиями реакция зависит как от их интенсивности, так и от энергонасыщенности коровых структур коры, распределения и величины напряжений в них. Естественная неоднородность геологической среды, проявляющаяся в виде структурных дефектов (включения разного масштаба, множественные трещины, тектонические разломы и т.д.), обуславливает ее формирующие отклик на внешние воздействия свойства (прочностные и деформационные).

Цель настоящей работы – исследование напряженно-деформированного состояния литосферных структур, контактирующих вдоль прямолинейного разлома и моделируемых системой покрытие – подложка, при их статическом взаимодействии.

Рассмотрена модель литосферных структур, контактирующих вдоль прямолинейных геологических разломов, в виде системы составных пластин на упругом основании. Предложено упрощение метода блочного элемента для разноразмерных блоков. Получены представления решений, описывающие смещения поверхности и позволяющие изучить влияние на напряженно-деформированное состояние структуры свойств ее элементов и характеристик разломов.

Исследована статическая задача о взаимодействии протяженных пластин на поверхности упругого слоя при заданной локализованной поверх-

ностной нагрузке. Горизонтальная координатная плоскость совмещена со срединной поверхностью полуограниченных деформируемых пластин с усредненными по толщине параметрами, граничащих вдоль одной из горизонтальных осей. Смещения поверхности пластин описываются линейаризованными уравнениями, представленными в работе [1]. В области стыковки пластин задаются граничные условия, определяемые типом их взаимодействия в области контакта. Контакт между подложкой и покрытием считается идеальным.

Для упругого основания с использованием матрицы-функции Грина можно выписать интегральные соотношения на его поверхности, связывающие амплитуды напряжений и перемещений. Для моделей сред, обладающих сложными свойствами, эти соотношения, называемые также функциями влияния, могут быть получены экспериментально. Воспользовавшись интегральным преобразованием Фурье и используя функциональные соотношения для упругого слоя и условия сопряжения пластин с подложкой, получим систему функциональных уравнений относительно Фурье-образов контактных напряжений между покрытием и подложкой. Предложен алгоритм решения полученной системы нагруженных уравнений Винера – Хопфа.

Несмотря на универсальность топологического метода блочного элемента [2], для случая прямолинейных и плоских границ, когда краевые задачи для двух полуограниченных пластин на трехмерном основании рассматриваются в качестве моделей разноразмерной блочной структуры под действием локализованной стационарной поверхностной нагрузки, можно использовать упрощенный метод. Указанный метод открывает возможность изучения влияния свойств пластин и основания, а также различных граничных условий в области контакта составляющих покрытия на основные характеристики напряженно-деформированного состояния рассматриваемой блочной структуры при различных условиях контакта пластин на разломе.

Подход к построению модели многослойных протяженных пластин приводит к модели однослойной пластины с приведенными механическими характеристиками. Задачи для таких пластин на упругом основании могут быть решены по той же схеме, что и задачи для однородных, в соответствии с рассматриваемым режимом, как стационарным, так и установившимся.

Полученные на основе описанного подхода теоретические результаты могут найти приложения в сейсмологии, геофизике, а также в инженерной практике, например, в судостроении и авиации при решении проблем образования трещин в широко применяемых многослойных покрытиях.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и администрации Краснодарского края (грант 16-41-230184\_а).

## Литература

1. *Вольмир А.С.* Нелинейная динамика пластинок и оболочек. М.: Наука, 1972. 432 с.
2. *Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М.* Топологический метод решения граничных задач и блочные элементы ДАН. 2013. Т. 449, № 6. С. 657–660.

## ПАРАМЕТРЫ ДИНАМИЧЕСКОГО СЛОЯ СВЕРХЗВУКОВОГО ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ УГЛА СЖАТИЯ

**Л.П. Трубицына**

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
Сибирского отделения Российской академии наук, Россия  
E-mail: lukeria.trubitsyna@gmail.com

**Аннотация.** Исследовалась структура сверхзвукового отрывного течения в угле сжатия и недавно обнаруженный слой с высоким полным давлением, возникающий за линией присоединения над пограничным слоем – динамический слой. Целью работы является определение диапазона значений угла сжатия, в котором существует динамический слой, и установление зависимости характеристик динамического слоя от величины угла сжатия. Проведено экспериментальное исследование сверхзвукового отрывного течения в угле сжатия для моделей с углом уступа 20°, 40° и 50°. Для моделей с углом уступа 20° и 40° проведён также трёхмерный численный расчёт течения. Получены данные о структуре течения и распределении давления Пито в потоке. Наблюдается удовлетворительное соответствие численного расчёта с экспериментальными данными. Подтверждено существование высоконапорного динамического слоя для всех исследованных конфигураций угла сжатия. Установлено, что явление образования динамического слоя за линией присоединения потока имеет общий характер. Также проведено экспериментальное и численное исследование трёхмерной структуры течения в трансверсальном сечении. Установлено влияние продольных вихревых структур в области присоединения течения на параметры динамического слоя.

**Ключевые слова:** сверхзвуковой поток, отрывное течение, линия присоединения, высоконапорный слой.

## THE DYNAMIC LAYER PARAMETERS IN SUPERSONIC SEPARATED FLOW DEPENDING ON THE COMPRESSION CORNER ANGLE

**L. Trubitsyna**

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Russian Federation  
E-mail: lukeria.trubitsyna@gmail.com

**Abstract.** This study focuses on supersonic ramp flow structure and recently discovered high total pressure layer appearing behind the reattachment line and above the boundary lay-

er – the dynamic layer. The research objective was to define the range of the ramp angles for which the dynamic layer exists and to determine the dependence of dynamic layer parameters on the ramp angle value. Experimental study of the supersonic separated ramp flow was conducted for models with a 20°, 40° and 50° ramp angle. For the 20° and 40° degree models three-dimensional numerical computation was conducted as well. Obtained numerical data are in good agreement with the experimental results. The dynamic layer is confirmed to exist for all studied compression corners. The phenomenon of the dynamic layer formation behind the reattachment line is established to be universal. Experimental and numerical study of the three-dimensional transversal structure of the flow was conducted as well. Streamwise vortex structures in the reattachment zone are found to have influence on the dynamic layer parameters.

**Keywords:** supersonic flow, separated flow, reattachment line, high-pressure layer.

При разработке гиперзвуковых летательных аппаратов, таких как космические корабли многоразового использования, необходимо учитывать силовые и тепловые нагрузки на поверхность аппарата. Особенности сверхзвукового течения (отрыв и присоединение потока, продольные вихревые структуры в зоне присоединения, взаимодействие ударных волн с пограничным слоем) могут являться причиной сильного локального нагрева и резкого роста давления на поверхности тела.

Угол сжатия является моделью многих частей конструкции летательных аппаратов. Течение на угле сжатия традиционно описывается как двумерное, однако в реальности из-за конечных размеров угла сжатия происходит стекание газа со стенок модели и течение приобретает трёхмерную структуру, что влечёт за собой ряд особенностей. В работе [1] было обнаружено существование высоконапорного (динамического) слоя DL за линией присоединения сверхзвукового отрывного течения на угле сжатия (рис. 1).

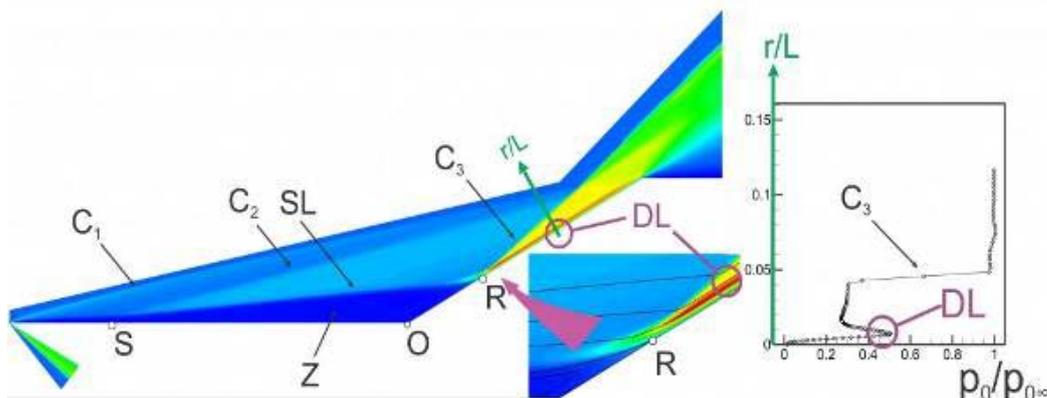


Рис. 1. Высоконапорный динамический слой [1]

Динамический слой расположен над пограничным слоем и характеризуется высоким уровнем полного давления (до 0.95 давления торможения набегающего потока). Высоконапорный динамический слой изменяет характеристики устойчивости течения в данной области за счёт резкого роста полного давления в нём. Кроме того, за счёт образования в динамическом слое трёхмерных вихревых структур [2] растут тепловые нагрузки на по-

верхность модели. Для получения точной картины трёхмерного течения на угле сжатия необходимо исследование параметров и условий возникновения динамического слоя.

Целью работы является определение диапазона значений угла сжатия, в котором существует динамический слой, и установление зависимости характеристик динамического слоя от величины угла сжатия. Для этого было проведено экспериментальное исследование течения для величины угла сжатия  $20^\circ$ ,  $40^\circ$  и  $50^\circ$ . Для моделей угла сжатия  $20^\circ$  и  $40^\circ$  также выполнен трёхмерный численный расчёт течения и проведено сравнение полученных данных с результатами экспериментов.

Исследовалась трёхмерная структура сверхзвукового течения для четырёх моделей с величиной угла сжатия от  $20^\circ$  до  $50^\circ$  с шагом  $10^\circ$ . Эксперимент проведён в гиперзвуковой аэродинамической трубе Т-326 ИТПМ СО РАН. Основные параметры эксперимента:  $M = 6$ , число Рейнольдса, вычисленное по длине горизонтальной пластины  $Re_L = 6.1 \cdot 10^5$ . Подробное описание моделей и экспериментального оборудования приведено в [3]. Измерения проводились при помощи приёмника полного давления перпендикулярно поверхности модели на разных расстояниях от линии присоединения, а также в поперечном сечении для разных значений трансверсальной координаты. Также была проведена шлирен-визуализация течения для всех моделей.

Расчёт выполнен в пакете ANSYS Fluent с использованием вычислительных ресурсов ИВЦ НГУ. Решались трёхмерные нестационарные уравнения Навье-Стокса в ламинарной постановке. Расчётная область содержала около 15 млн ячеек для модели угла сжатия  $20^\circ$  и около 8,4 млн ячеек для модели угла сжатия  $40^\circ$ . Размеры сеток совпадали с размерами соответствующих экспериментальных моделей. Параметры набегающего потока были заданы в соответствии с условиями экспериментов.

Получено экспериментальное распределение давления Пито в потоке за линией присоединения течения для моделей с углом сжатия  $20^\circ$ ,  $40^\circ$  и  $50^\circ$ . Для всех моделей в области, расположенной над пограничным слоем, наблюдается резкое локальное повышение давления Пито, соответствующее высоконапорному динамическому слою. Также проведено численное моделирование течения для углов сжатия  $20^\circ$  и  $40^\circ$ . Наблюдается удовлетворительное соответствие численного расчёта с экспериментальными данными. Таким образом, явление образования высоконапорного динамического слоя наблюдается для всех исследованных конфигураций угла сжатия и имеет общий характер.

Исследовано поведение продольных вихревых структур по типу вихрей Жину в области присоединения потока. Из полученных распределений давления Пито видно, что трёхмерная структура течения оказывает существенное влияние на форму и параметры динамического слоя.

Подтверждено образование динамического слоя для диапазона величины угла сжатия от  $20^\circ$  до  $50^\circ$ . Наблюдается удовлетворительное соответствие численного расчёта с экспериментальными данными. Установлено влияние трёхмерной структуры течения в области присоединения на параметры динамического слоя.

### Литература

1. Запрягаев В.И., Кавун И. Н., Липатов И. И. Возникновение высоконапорного слоя в угле сжатия при сверхзвуковой скорости потока.// Изв. РАН. Механика жидкости и газа, No 6, 2014. С. 149-158.

2. Запрягаев В.И., Кавун И. Н. Механизм формирования продольных вихрей за линией присоединения сверхзвукового отрывного течения в угле сжатия // Учёные записки ЦАГИ, 2016. Т. XLVII, No 3. С. 27-36.

3. Запрягаев В.И., Кавун И. Н., Трубицына Л.П. Структура ламинарного отрывного течения в области присоединения при обтекании угла сжатия сверхзвуковым потоком. DOI:10.13009/EUCASS2017-86

## ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ЗАКРУЧЕННОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ВИХРЕВОЙ КАМЕРЕ

**Р.Р. Турубаев, А.В. Шваб**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: roma.turubaev@gmail.com

**Аннотация.** В работе представлено численное моделирование аэродинамики закрученного турбулентного течения в вихревой камере комбинированного пневматического аппарата, с расположенным в верхней части ротором, состоящим из системы вращающихся лопаток. Численный анализ закрученного турбулентного течения позволил определить основные закономерности в поведении несущей среды в аппарате. В результате была предложена модификация формы лопаток ротора, которая позволила вносить необходимые изменения в распределение поля радиальной скорости. Численные исследования показали перспективность такого подхода для управления радиальной составляющей скорости в роторе, что является необходимым условием для эффективной работы сепаратора. Достоверность проведенных численных расчетов подтверждается тестовыми исследованиями и сравнением их с опытными данными.

**Ключевые слова:** вихревая камера, численное моделирование, скорость диссипации, турбулентное течение, «k- $\omega$ » модель Уилкокса, аэродинамика.

# INVESTIGATION OF THE SWIRLED TURBULENT FLOW AERODYNAMICS IN THE VORTEX CHAMBER

**R. Turubaev and A. Shvab**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: roma.turubaev@gmail.com

**Abstract.** In this work the numerical modeling of the swirled turbulent flow aerodynamics in the vortex chamber of combined pneumatic machine is demonstrated. The rotor, consisting of the system of rotating blades is located in the upper part of this vortex chamber. Numerical analysis of swirled turbulent flow enabled to define the main regularities of carrying medium behaviour in the machine. As the result, modified form of the rotor blades was recommended, which admitted to make needed changes in the distribution of radial velocity field. Numerical investigations showed the prospects of this approach to control the radial velocity in the rotor, which in turn is the necessary criterion for effective work of the separator. The validation of performed numerical computations is verified by the test studies and its comparison with the experimental findings.

**Key words:** vortex chamber, numerical modeling, dissipation rate, turbulent flow, «к-щ» Wilcox's model, aerodynamics.

Пневматические центробежные аппараты широко применяются при изучении процессов сепарации и классификации для получения порошков заданного гранулометрического состава. Помимо аддитивных технологий, которые сейчас активно развиваются, данные аппараты также используются в порошковой металлургии, химической, атомной и других отраслях промышленности. В данной работе исследуется устройство, в котором совмещены процессы измельчения и классификации порошковых материалов, что является их преимуществом.

Данный аппарат используется для дробления крупных частиц на более мелкие и дальнейшего их разделения по заданному размеру. Процесс отсеивания крупной фракции от мелкой происходит в два этапа. Первый этап отсеивания происходит в средней части аппарата, где расположен вращающийся дисковый элемент, крупные частицы отбиваются об него и падают вниз для дальнейшего измельчения, мелкие частицы его облетают.

Второй этап отсеивания имеет место в выходной части рабочей области, где разделение происходит с помощью ротора, который, благодаря центробежной силе отбрасывает крупные частицы на периферию для повторного измельчения.

Один из таких аппаратов созданный в НИИ ПММ ТГУ, у которого в выходной части рабочей области располагается ротор, состоящий из системы вращающихся лопаток имеющих прямоугольную форму.

Целью данной работы является численное моделирование аэродинамики закрученного турбулентного течения в вихревой камере, на основе которого возможно создание принципиально новой геометрии камеры с из-

мененной формой лопаток ротора, что позволяет увеличить остроту классификации.

При прямоугольной форме ротора, профиль радиальной составляющей скорости в выходной части аппарата имеет неравномерный характер. В качестве решения вышеизложенной проблемы было предложено численное решение задачи с модифицированной геометрической формой ротора, а именно, преобразование прямоугольной формы к трапецеидальной.

Моделирование аэродинамики в вихревой камере проводится в цилиндрической системе координат на основе уравнений Рейнольдса. Замыкание системы уравнений Рейнольдса, осуществляется на основе обобщенной гипотезы Буссинеска, согласно которой рейнольдсовы напряжения считаются пропорциональными скорости деформации осредненного течения с точностью до коэффициента турбулентной вязкости. В работе используется известная модель турбулентности Уилкокса. Численное решение полученной системы уравнений проводится эволюционным методом до установления по времени. Для решения каждого нестационарного уравнения переноса применяется обобщенный неявный метод переменных направлений. Конвективные и диффузионные слагаемые в уравнениях переноса аппроксимируются при помощи экспоненциальной схемы. Решение задачи проводится на разнесенной разностной сетке.

В результате анализа численных результатов выявлены характерные особенности в распределении полей вектора скорости, кинетической энергии турбулентности и ее удельной скорости диссипации. На основе численных исследований показана возможность профилированием формы лопаток ротора оказывать существенное влияние на радиальную составляющую вектора скорости и тем самым управлять балансом центробежных и аэродинамических сил для повышения эффективности процесса сепарации порошков.

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУБЛИМАЦИИ ПОРОШКООБРАЗНОГО МАТЕРИАЛА**

**М.Е. Шевченко, В.Н. Брендаков**

Северский технологический институт – филиал Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия  
E-mail: mehan94@mail.ru

**Аннотация.** В работе представлена разработанная математическая модель, описывающая процесс сублимации порошкообразного материала. При построении модели сделаны допущения, позволяющие упростить алгоритм решения рассматриваемой задачи. Нестационарное двухмерное уравнение для температуры записано в неявном виде в «дельта» форме и решается численно методом конечных разностей, путем интег-

рирования до полного установления на каждом шаге по времени. Изменение, в процессе сублимации, массы вещества учитывали путем задания на свободной поверхности переменных во времени условий Неймана. Хорошее соответствие рассчитанных по созданной математической модели средних по объему порошка температур как функции от времени процесса сублимации и экспериментальных данных доказывают возможность использование такого подхода при моделировании сложных технологических процессов. Созданная математическая модель может быть использована при создании новых аппаратов и оптимизации существующих.

**Ключевые слова:** сублимация, граничные условия, численный метод решения.

## MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF SUBSTITUTION OF POWDER MATERIAL

**M. Shevchenko and V. Brendakov**

National Research Nuclear University, Russian Federation  
E-mail: mehan94@mail.ru

**Abstract.** The article presents a developed mathematical model describing the process of sublimation of a powdery material. There are assumptions that make it possible to simplify the algorithm for solving the problem under consideration in the process of construction the model. The nonstationary two-dimensional equation for temperature is written in an implicit form in the "delta" form and solved numerically by means of the finite difference method, by integrating it until full establishment at each step in time. The change of the material weight in the process of sublimation was taken into account by setting time variables of the Neumann conditions on the free surface. The good match of average temperature by volume of the powder calculated on the basis of the created mathematical model as a function of the time of the sublimation process and experimental data prove the possibility of using this approach in modeling complex technological processes. The created mathematical model can be used while creating new devices and optimizing existing ones.

**Keywords:** sublimation, boundary conditions, numerical method of solution.

Математическое моделирование является важным инструментом при изучении различных химико-технологических процессов. Созданная адекватная математическая модель позволяет не только более полно понять рассматриваемый процесс и степень влияния на него различных факторов, но и строить прогнозы по реализации исследуемой технологии в новых режимных условиях и при новом аппаратном оформлении. В отличие от физического эксперимента, математическое моделирование имеет более низкие финансовые затраты и более короткие временные этапы. Все это ведет к тому, чтобы студенты старших курсов, вне зависимости от выбранной специализации, должны познакомиться с основами современных подходов к математическому моделированию в их предметной области.

От правильной организации тепловых режимов процесса сублимации летучих веществ в поверхностных сублиматорах зачастую зависит не только стабильность и эффективность работы сублимационного оборудо-

вания, но и экологическая безопасность производства. Для гетерогенных превращений общая скорость обычно есть функция скоростей двух процессов: химической реакции и диффузии. Большинство процессов по своему характеру являются промежуточными между этими двумя предельными случаями: скорости химических реакций сравнимы со скоростями процессов диффузии. Т.е., учет влияния диффузионных процессов переноса является важным моментом для корректного кинетического анализа исследуемого процесса. Поэтому важным аспектом, затрагиваемым в данной работе, является исследование диффузионных процессов массопереноса на примере сублимации.

Цель работы – на основе имеющихся экспериментальных данных создать математическую модель процесс сублимации, как с поверхности исследуемого объекта, так и объемной сублимации. Задачами настоящего исследования является изучение закономерностей процесса сублимации вещества для повышения его эффективности, а также для совершенствования сублимационного оборудования.

За основу для моделирования был выбран эксперимент, в котором были заданы физические и химические свойства порошкообразного вещества, а также тип металла и форма тигля, задан уровень засыпки порошка. В начальный момент времени порошок был при нормальных условиях. По мере нагревания тигля, тепло передавалось порошку и через некоторое время, за которое вещество успело прогреться до температуры сублимации, начинался процесс сублимации. Процесс поддержания температуры на внешней стороне тигля происходил до тех пор, пока все вещество не сублимировалось.

В работе рассматривается упрощенный вариант процесса сублимации, при котором переменная масса сублимируемого вещества в математической модели заменяется переменным граничным условием для потока теплоты на границе сублимирующего вещества. Таким образом, сделана попытка учесть изменяющийся во времени поток тепла из тигля за счет изменения массы сублимирующего вещества, через постановку нестационарных граничных условий по температуре на свободной поверхности вещества. С помощью такого приема удалось учесть процесс сублимации, как с поверхности исследуемого объема, так и внутри его. Постановка такой задачи возможно только для пористой среды, когда допустим процесса сублимации внутри объема вещества.

Для описания распределения температуры в заданной области пространства записано нестационарное двумерное уравнение теплопроводности, которое представляет собой дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка, при соответствующих начальных и граничных условиях.

Рассматриваемая в работе задача решалась численно на основе метода конечных разностей. Получаемая система алгебраических уравнений раз-

ностного аналога дифференциального уравнения записывалась в неявном виде. Обобщенную неявную двухслойную схему переменных направлений, представленную в «дельта» форме решали с помощью метода прогонки.

При решении нестационарной задачи записанную систему уравнений на каждом временном шаге решали методом установления, т.е. интегрировали по фиктивному времени до полного установления поля температуры на данном шаге по времени.

В качестве граничных условий по всей внешней границе тигля задавалось условие Дирихле. С учетом эндотермичности процесса сублимации на свободной поверхности порошкообразного вещества задавалось условие Неймана с переменным по времени коэффициентом теплоотдачи.

Методом численного эксперимента была найдена функциональная зависимость коэффициента теплоотдачи на свободной поверхности от времени протекания процесса сублимации.

Выполнены тестовые расчеты по определению средней по объему порошкообразного вещества температуры в зависимости от времени процесса. Хорошее согласование расчетных результатов с имеющимися экспериментальными данными, подтверждает адекватность и работоспособность созданной математической модели процесса сублимации порошкообразного материала.

## **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ**

**А.К. Шубин, В.Н. Брендаков**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: shubin\_andrey\_1996@mail.ru

**Аннотация.** В работе представлен один из возможных подходов к численному исследованию течения вязкой несжимаемой жидкости и процессов теплообмена в каналах сложной геометрической формы. Рассматривается метод установления для получения решений в задачах, описывающих стационарные процессы. Гидродинамика описывается в естественных переменных «скорость – давление», тепловые процессы моделируются на основе конвективного теплопереноса. Сравнение результатов тестовых расчетов с имеющимися экспериментальными данными и аналитическими решениями в простых геометрических формах, позволяют говорить о возможности использовать такой подход к более сложным случаям течения с теплообменом.

**Ключевые слова:** вычислительная гидродинамика, граничные условия, метод решения.

# NUMERICAL INVESTIGATION OF THERMAL AND HYDRODYNAMIC PROCESSES

A. Shubin and V. Brendakov

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: shubin\_andrey\_1996@mail.ru

**Abstract.** The paper presents one of the possible approaches to the numerical investigation of viscous incompressible fluid flow and heat exchange processes in channels of complex geometric shape. The method of establishment for obtaining solutions in problems describing stationary processes is considered. Hydrodynamics is described in natural "velocity-pressure" variables, thermal processes are modeled on the basis of convective heat transfer. Comparison of the results of test calculations with available experimental data and analytical solutions in simple geometric forms allows us to talk about the possibility of using this approach to more complicated cases of flow with heat exchange.

**Key words:** computational fluid dynamics, boundary conditions, solution method.

Технологии ядерного топливного цикла включают в себя производство ядерного топлива, подготовку его к использованию в ядерных реакторах и утилизацию отработанного ядерного топлива. Практически на всех этапах производственного цикла используются аэрогидродинамические процессы для переработки промежуточных продуктов, причем, часто эти процессы совмещаются с термодинамическими явлениями, т. е. нагреванием или охлаждением рабочего тела, циркулирующего материала или получаемого в процессе химической реакции продукта.

В представленной работе моделирование гидродинамики и теплообмена в исследуемом объеме проводится на основе уравнений Навье–Стокса, уравнения переноса тепла, которые представлены в цилиндрической системе координат и в безразмерной форме. Решение задачи проводится при использовании физических переменных «скорость-давление».

Численное решение задачи в переменных «скорость-давление» проводится на основе метода физического расщепления полей скорости и давления. Стационарное решение при таком подходе находится на основе эволюционного метода установления по времени. Нестационарные уравнения переноса интегрируются на основе обобщенного неявного метода переменных направлений в «дельта» форме, который имеет второй порядок точности по времени. Конвективные и диффузионные слагаемые уравнений переноса аппроксимируются с помощью трехточечной разностной схемы, снимающей ограничение с сеточного числа Рейнольдса, и имеющего второй порядок точности по координатам.

Достоверность решения поставленной задачи проводилось с помощью тестовых исследований на сеточную и итерационную сходимость, сравнением полученных численных решений с известными аналитическими зависимостями распределения скорости при установившемся течении.

В работе представлено подробное исследование полей скорости и температуры при изменении граничных условий и критериев Рейнольдса и Прандтля. В работе анализируются также наиболее важные с практической точки зрения вопросы по влиянию критериев на результат процесса теплового и динамического смешения потоков на выходе из канала с препятствием. Проведенное исследование может быть использовано в практических задачах химической технологии.

## **ЗАДАЧА О ПОИСКЕ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕРА ЖЕСТКОЙ ПЛАСТИНЫ В ЗАДАЧЕ О РАВНОВЕСИИ ДВУСЛОЙНОЙ КОНСТРУКЦИИ**

**И.В. Фанкина**

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Россия  
E-mail: fankina.iv@gmail.com

**Аннотация.** Рассматривается слоистая конструкция, которая состоит из двух пластин, упругой и жесткой. Пластины соединяются по линии, которая для жесткой пластины является частью границы. В упругой пластине вдоль линии склейки слоев присутствует трещина. Для конструкции, в соответствии с критерием Гриффитса, формулируется задача оптимального управления, которая заключается в нахождении оптимального параметра размера жесткой пластины, при котором производная функционала энергии конструкции по длине трещины принимает наибольшее значение. Доказано, что данная задача поиска оптимального размера жесткого слоя имеет решение. При этом оптимальный размер жесткой пластины может быть и нулевым. В этом случае наибольшее значение производной функционала энергии зависит от решения задачи, описывающей равновесие упругой пластины с тонким жестким включением и трещиной

**Ключевые слова:** двухслойная конструкция, оптимальное управление, упругая пластина, трещина, условия непроникания.

## **PROBLEM ON FINDING OPTIMAL SIZE FOR RIGID PLATE IN EQUILIBRIUM PROBLEM OF TWO-LAYER STRUCTURE**

**I. Fankina**

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of SB RAS, Russian Federation  
E-mail: fankina.iv@gmail.com

**Abstract.** A two-layer structure is under consideration. The structure consists of elastic and rigid plates. Plates are joined along a line, which is a part of the rigid plate boundary. There is a crack in the elastic plate along the join. For the structure, according to the Griffith's criterion, the optimal control problem is formulated. This problem consists in finding the optimal size parameter of the rigid plate, wherein the derivative of the energy functional of the structure with respect to the crack length takes on the largest value. It is proved that the given

problem on finding the optimal size for the rigid layer has a solution. In addition, the optimal size of the rigid plate can be equal to zero. In this case, the largest value of the derivative of the energy functional depends on the solution of the problem describing the equilibrium of an elastic plate with a thin rigid inclusion and a crack.

**Keywords:** Two-layer structure, optimal control problem, elastic plate, crack, non-penetration conditions.

Рассматривается двухслойная конструкция, которая состоит из пластин, склеенных по линии. Пластины имеют различную природу. Одна из пластин является упругой, вторая – жесткая. Для перемещений точек жесткой пластины задается структура поля перемещений. Вдоль линии склейки слоев в упругой пластине проходит трещина. Для рассматриваемой конструкции формулируется задача равновесия в виде задачи минимизации функционала потенциальной энергии на множестве допустимых перемещений, причем множество допустимых перемещений содержит нелинейное условие, предотвращающее взаимное проникание противоположных берегов трещины. Анализируется вопрос о дальнейшем развитии трещины, которое может зависеть от физических и геометрических параметров, характеризующих конструкцию. При этом используется критерий разрушения Гриффитса, в соответствии с которым трещина в упругой части конструкции начнет распространяться в том случае, если интенсивность высвобождающейся упругой энергии достигнет критической величины. Как известно, последняя величина постоянна и отрицательна. Кроме того, в рамках рассматриваемой задачи равновесия скорость высвобождения энергии представляет собой производную функционала энергии конструкции по длине трещины и является неположительной величиной. Поэтому задача поиска наиболее безопасного состояния равновесия конструкции относительно развития трещины формулируется в виде задачи нахождения оптимального параметра конструкции, при котором указанная производная принимает наибольшее значение. В данной работе рассматривается влияние размера жесткого слоя конструкции на возможный рост трещины. Поэтому производная функционала энергии по длине трещины максимизируется на множестве значений, которое пробегает параметр, характеризующий размер жесткой пластины. В результате установлено, что такая задача оптимизации размера жесткого слоя имеет решение. При этом оптимальный размер жесткой пластины может быть и нулевым. В этом случае наибольшее значение производной функционала энергии зависит от решения задачи, описывающей равновесие упругой пластины с тонким жестким включением и трещиной.

# СКОРОСТЬ ВЫСВОБОЖДЕНИЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЗАДАЧИ ОБ ОТСЛОЕНИИ ТОНКОГО ПРЕПЯТСТВИЯ ОТ ПЛАСТИНЫ

**А.И. Фурцев**

Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева Сибирского отделения  
Российской академии наук, Россия  
E-mail: al.furtsev@mail.ru

**Аннотация.** В данной работе рассматривается задача об изгибе упругой балки, контактирующей с упругой пластиной. Изучается задача равновесия пластины и препятствия под действием внешней силы.

Балку можно интерпретировать как тонкое препятствие. На части края препятствие скреплено с пластиной, а на части может отслаиваться. В зоне отслоения заданы краевые условия типа неравенств, не допускающие нежелательный эффект взаимного проникания контактирующих тел.

Доказано, что при фиксированном значении длины отслоения указанная задача имеет единственное решение, отвечающее минимуму потенциальной энергии. Когда длина отслоения варьируется, значение потенциальной энергии равновесного состояния меняется. Таким образом, скорость высвобождения энергии равна производной потенциальной энергии по длине отслоения.

Многие конструкции и строения состоят из пластин и балок, которые скреплены друг с другом. В подобных структурах часто происходит отслоение, рост длины которого может стать причиной их разрушения. Поскольку с ростом длины отслоения связано высвобождение энергии, то анализ скорости высвобождения энергии представляет большой интерес для инженеров и конструкторов.

Основным результатом работы является доказательство математической корректности производной потенциальной энергии в качестве скорости высвобождения энергии при росте длины отслоения. Более того, для указанной производной найдена явная формула. Используемый при этом подход основан на вариационных свойствах решения задачи равновесия.

**Ключевые слова:** отслоение, контакт, тонкое препятствие, изгиб, скорость высвобождения энергии.

## ENERGY RELEASE RATE FOR PROBLEM OF DELAMINATION OF THIN OBSTACLE FROM PLATE

**A. Furtsev**

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
Russian Federation  
E-mail: al.furtsev@mail.ru

**Abstract.** Many constructions and designs are composed of plates and beams which are bonded to each other. In such structures a delamination often takes place. An increase in a length of the delamination can lead to destruction of structures. Since the increase in the

length is associated with the release of energy, the analysis of an energy release rate is of great interest to engineers and designers.

In the present work we consider a bending problem for an elastic beam in contact with an elastic plate. The beam can be interpreted as a thin obstacle for the plate. The obstacle is bonded to the plate on the part of a boundary, and it can delaminate on the other part. Inequality type boundary conditions are imposed at the delamination zone to exclude mutual penetration. We study an equilibrium problem for given external forces. It is proved that for a fixed value of the delamination length this problem has a unique solution, corresponding to a minimum of a potential energy. When the length is varied, the value of the potential energy of equilibrium state changes. Thus, the energy release rate in fact is a derivative of the potential energy with respect to the delamination length.

The main result of the work is the proof of well-definiteness of the derivative of the potential energy as the energy release rate, taking place when the delamination length increases. Moreover, an explicit formula is derived for this energy release rate. The approach used is based on the variational properties of the solution of the equilibrium problem.

**Keywords:** delamination, contact, thin obstacle, bend, energy release rate.

Многие конструкции и строения состоят из пластин и балок, которые скреплены друг с другом. В подобных структурах часто происходит отслоение, рост длины которого может стать причиной их разрушения. Поскольку с ростом длины отслоения связано высвобождение энергии, то анализ скорости высвобождения энергии представляет большой интерес для инженеров и конструкторов.

В данной работе рассматривается задача об изгибе упругой балки, контактирующей с упругой пластиной. Балку можно интерпретировать как тонкое препятствие. На части края препятствие скреплено с пластиной, а на части может отслаиваться. В зоне отслоения заданы краевые условия типа неравенств, не допускающие нежелательный эффект взаимного проникания контактирующих тел. Изучается задача равновесия пластины и препятствия под действием внешней силы. Доказано, что при фиксированном значении длины отслоения указанная задача имеет единственное решение, отвечающее минимуму потенциальной энергии. Когда длина отслоения варьируется, значение потенциальной энергии равновесного состояния меняется. Таким образом, скорость высвобождения энергии равна производной потенциальной энергии по длине отслоения.

Основным результатом работы является доказательство математической корректности производной потенциальной энергии в качестве скорости высвобождения энергии при росте длины отслоения. Более того, для указанной производной найдена явная формула. Используемый при этом подход основан на вариационных свойствах решения задачи равновесия.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 17-71-10171).

# РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ПЛАСТИНЫ С ПОМОЩЬЮ ПРИКЛАДНОГО ПАКЕТА ANSYS FLUENT

**А.А. Хакимов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: akniet.khakimov@mail.ru

**Аннотация.** Проведено моделирование сверхзвукового обтекания пластины с помощью прикладного пакета Ansys Fluent. Рассчитаны температуры адиабатной стенки и коэффициента восстановления полной температуры. Сопоставлены полученные результаты со значениями, вычисленными по известным зависимостям коэффициента восстановления от числа Прандтля.

**Ключевые слова:** сверхзвуковое течение, Ansys Fluent, коэффициент восстановления.

## SOLUTION OF THE PROBLEM OF SUPERSONIC FLOW PAST A PLATE USING THE ANSYS FLUENT APPLICATION PACKAGE

**A. Khakimov**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: akniet.khakimov@mail.ru

**Abstract.** The simulation of supersonic flow past a plate using software package Ansys Fluent. The calculated adiabatic wall temperature and recovery factor the total temperature. Matched the obtained results with the values calculated by known dependencies of the coefficient of restitution of the Prandtl number.

**Keywords:** supersonic flow, Ansys Fluent, the coefficient of restitution.

В работе при помощи прикладного пакета Ansys Fluent решена задача об обтекании теплоизолированной пластины сверхзвуковым потоком газа.

Целью настоящей работы является отработка алгоритма решения задачи с использованием средств пакета Ansys Fluent, расчёт температуры адиабатной стенки и коэффициента восстановления полной температуры, сопоставление полученных значений коэффициента восстановления со значениями, вычисленными по известным зависимостям коэффициента восстановления от числа Прандтля.

Решение строится на основе математической модели, состоящей из: уравнений неразрывности, уравнения состояния газа, уравнения энергии, уравнений, описывающих k-ε модель турбулентности. Задача решалась в двухмерной осесимметричной стационарной постановке для следующих допущений: в качестве рабочего вещества рассматривался аргон, рабочее вещество полагалось вязкой, сжимаемой ньютоновской жидкостью. Рассматривается квадратная область длиной 30 мм и шириной 30 мм, ограни-

ченная с одной стороны теплоизолированной пластиной. Входящий газ имеет статическую температуру  $T=300\text{ K}$  и число Маха  $M=2$ . На входе задается условие – pressure-far-field. На выходе задается условие свободного вытекания. На оси симметрии задавалось условие идеального контакта, на внешней стенке задавались условия непротекания и тепловой изоляции газа.

Решение проводилось на основе решателя density-based. Был выбран неявный метод решения implicit Roe-FDS со вторым порядком точности. Для моделирования процессов турбулентного переноса выбрана двухпараметрическая модель – k – ε.

В расчете были использованы следующие параметры:  $M_g = 39,34\text{ кг / кмоль}$  – молярная масса газа,  $\mu = 0.2 \cdot 10^{-5}\text{ Па} \cdot \text{с}$  – коэффициент динамической вязкости газа,  $C_p = 520\text{ Дж/кг} \cdot \text{K}$  – теплоемкость газа при постоянном давлении,  $\lambda_g = 0.025\text{ Вт/м} \cdot \text{K}$  – теплопроводность газа,  $Pr = 0.442$  – число Прандтля.

В расчетах было определен коэффициент восстановления, который может быть рассчитан по формуле [1]:

$$r = (T_{cm} - T_0) / (T_n - T_0), \quad (1)$$

где  $T_{cm}$  – температура адиабатной стенки,  $T_0$  – термодинамическая температура потока,  $T_n$  – полная температура потока.

Для продольно обтекаемой плоской пластины при турбулентном течении газа с числом Прандтля  $Pr \approx 0.4$  [2] справедливо:

$$r = 0.9 Pr^{0.1}, \quad (2)$$

Из результатов решения было получено значение коэффициента восстановления температуры равное  $r = 0.81$ . Коэффициент восстановления температуры, полученный из расчётов по формуле (2) равен  $r = 0.829$ . Таким образом, погрешность расчёта с помощью Ansys Fluent составила 2.2%.

### Литература

1. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. 5-е изд. перераб. и доп. М.: Атомиздат, 1979, 416 с.
2. Макаров М.С. Газодинамическая температурная стратификация в сверхзвуковых потоках: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2007. 16 с.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗГАЗОВОГО ГОРЕНИЯ СИСТЕМЫ СОПРЯЖЕННЫХ СЛОЕВ, СОДЕРЖАЩЕЙ ТЕПЛОПРОВОДЯЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

**Т.И. Худякова**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
E-mail: tai\_hudikova@mail.ru

**Аннотация.** Выполнено численное моделирование безгазового горения системы сопряженных слоев, содержащей слоевые теплопроводящие элементы. Задача решалась методом покоординатного расщепления с использованием неявной схемы. Основной целью расчетов являлось определение минимального времени горения слоистой системы при определенных соотношениях объемного содержания смесей, толщины и количества слоев. Найдены оптимальные параметры слоевой системы, при которых скорость горения образца будет максимальной.

**Ключевые слова:** сопряженные слои, безгазовое горение, теплопроводящие элементы.

## MATHEMATICAL MODELING GASLESS COMBUSTION SYSTEM OF CONJUGATED LAYERS CONTAINING HEAT CONDUCTING ELEMENTS

**T. Khudiakova**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
E-mail: tai\_hudikova@mail.ru

**Abstract.** Numerical modeling of gasless combustion of a system of conjugated layers containing layered heat conducting elements. was simulated. This paper based on the method of coordinate wise splitting using an implicit scheme. The main purpose of this study was determined the minimum combustion time of the layered system for certain proportions of the volume content of the mixtures, the thickness and the number of layers. The optimal parameters of the layer system was obtained at which the combustion velocity of the sample will be maximum.

**Keywords:** conjugate layers, gasless combustion, heat conducting elements.

Предметом изучения в данной работе является безгазовое горение системы сопряженных слоев с различными теплофизическими характеристиками. Основная задача исследования заключалась в определении минимального времени горения слоистой системы при определенных соотношениях объемного содержания компонентов, толщины и количества слоев. Цель исследования – найти оптимальное соотношение высокотемпературных и теплопроводящих инертных слоев. С другой стороны, избыточное содержание инертного вещества в образце приводит к срыву горения. В работе рассматривается система сопряженных слоев, содержащая тепло-

проводящие элементы-слои, выполненные из материала с высокой теплопроводностью. Зажигание осуществляется одновременным контактом с накаливаемой поверхностью всех слоев системы. Противоположная плоскости зажигания поверхность образца теплоизолирована. Математическая модель в двумерной плоскосимметричной постановке представлена в [1]. Задача решалась численно методом покоординатного расщепления с использованием неявной схемы.

Время горения образца резко уменьшается с введением в образец высокотеплопроводящих слоев по сравнению с горением однородного образца. Так же время горения зависит от толщины теплопроводящих слоев. Наиболее высокая скорость горения слоевого образца достигается при  $N=6$ , где  $N$  - количество теплопроводящих слоев в образце с определенной толщиной много меньшей толщины прогретого слоя. С увеличением количества слоев срыв горения происходит при значительно меньшем разбавлении активной смеси инертным веществом, чем для двухслойного образца. Критическое содержание инертного вещества в случае  $N=2$  (два слоя), при котором слоистая система не горит, составляет примерно 45 %.

Для слоистых систем с теплопроводящими слоями характеристики горения сильно зависят от состава смеси, количества и числа слоев. Найдено оптимальное соотношение количества и толщины слоев, при котором происходит полное и наиболее быстрое горение образца.

#### Литература

1. Прокофьев В.Г., Смоляков В.К. Безгазовое горение системы термически сопряженных слоев // Физика горения и взрыва. 2016. Т. 52, №1. С. 70–75.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗВЛЕЧЕНИЯ МЕТАНА ИЗ ГИДРАТНОГО МАССИВА ЗАКАЧКОЙ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

А.С. Чиглинцева, С.В. Белова, О.В. Дударева

Бирский филиал Башкирского государственного университета  
Российская Федерация  
E-mail: [Changelina@rambler.ru](mailto:Changelina@rambler.ru)

**Аннотация.** Работа посвящена математическому моделированию процесса извлечения метана из газогидратного массива, в следствии закачки жидкого диоксида углерода. Предполагается, что будет происходить процесс вытеснения метана жидкой двуокисью углерода в области стабильного существования гидратов метана и диоксида углерода при отрицательной температуре. Предложена математическая модель описывающая процессы фильтрации и теплопереноса в газогидратном массиве, сопровождающегося формированием гидрата диоксида углерода. Построено автомодельное решение, описывающее распределение температуры и давления в массиве.

**Ключевые слова:** гидрат, процесс замещения, инжекция диоксида углерода.

# MATHEMATICAL MODELLING OF THE PROCESS EXTRACTION OF METHANE WITH HYDRATE IN THE MASSIF IN THE WAY INJECTION CARBON DIOXIDE

A.S. Chiglintseva, S.V. Belova and O.V. Dudareva

The Birsk Branch of Bashkir State University  
Russian Federation

E-mail: [Changelina@rambler.ru](mailto:Changelina@rambler.ru)

The work is devoted to mathematical modeling of the process of methane extraction from the gas hydrate massif, due to the injection of liquid carbon dioxide. It is assumed that there will be a process of displacement of methane by liquid carbon dioxide in the stable existence of methane and carbon dioxide hydrates at a negative temperature. A mathematical model describing the processes of filtration and heat transfer in the gas hydrate massif, accompanied by the formation of carbon dioxide hydrate, is proposed. A self-similar solution is constructed that describes the distribution of temperature and pressure in an massif.

**Keywords:** hydrate, substitution process, carbon dioxide injection, half-division method.

Согласно геологическим исследованиям известно, что в зонах вечной мерзлоты и в глубинах мирового океана сосредоточены большие объемы газа метана. В связи с этим становится интересной проблема освоения таких источников энергии. Кроме этого в настоящее время довольно быстро растет содержание диоксида углерода в атмосфере, что является серьезной проблемой. Поэтому становятся актуальными задачи вытеснения газа метана из гидратов путем заполнения их диоксидом углерода. Это возможно благодаря тому, что гидрат диоксида углерода более стабилен по сравнению с гидратом метана. В таком случае молекулы двуокиси углерода замещаются в гидрате молекулами метана [4]. Согласно экспериментальным работам, замещение метана в гидрате жидкой двуокисью углерода будет происходить при температурах и давлениях, отвечающих условиям стабильного существования гидрата [4]. Математические модели образования и разложения газогидратов, при инъекции того же газа, которым в исходном состоянии насыщен массив, рассмотрены в работах [1, 3]. Математическая модель инъекции углекислого газа в пористый пласт, в области положительных температур, представлена в работе [2].

В данной работе рассматривается горизонтальный массив, который в начальный момент времени, насыщен гидратом и газом метана в области отрицательных температур и давлении соответствующих условиям стабильного существования газогидрата метана. Пусть через границу подается жидкий диоксид углерода при температуре и давлении, которые соответствуют условиям фазового равновесия системы [2] и поддерживаются постоянными на этой границе.

Система основных уравнений описывающих процессы фильтрации и теплопереноса в газогидратном массиве для плоскоодномерного течения

представляет собой уравнения сохранения масс и энергии, линейный закон Дарси, уравнения состояния для газовой и жидкой фазы, а так же условия баланса массы и тепла на границе между областями. Поскольку, интенсивность массопереноса, определяющегося фильтрацией, существенно выше скорости массопереноса, лимитирующегося диффузией, можно предположить устойчивость фронта замещения метана двуокисью углерода. Процесс вытеснения будет проходить на подвижной фронтальной поверхности, разделяющей массив на две области: в ближней массив насыщен двуокисью углерода и его гидратом, а в дальней – газом и гидратом метана.

В результате была разработана математическая модель извлечения метана из гидратного массива путем закачки диоксида углерода. Получена система уравнений в автомодельных переменных, описывающая распределения температуры и давления в массиве при различных исходных значениях температуры закачиваемого диоксида углерода. Проведена оценка влияния исходных параметров на динамику процесса гидратообразования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-20001).

### Литература

1. *Цыпкин Г.Г.* Математическая модель диссоциации газовых гидратов, сосуществующих с газом в пластах // Докл. РАН, 2001. – Т. 381. № 1. – С. 56.
2. *Шагапов В.Ш., Хасанов М.К., Мусакаев Н.Г.* Инжекция жидкого диоксида углерода в частично насыщенный гидратом метана пласт // Прикладная механика и техническая физика, 2016. Т. 57. № 6 (340). С. 139–149.
3. *Шагапов В.Ш., Чиглинцева А.С., Русинов А.А.* Теоретическое моделирование процесса извлечения газа из пористого газогидратного пласта, частично насыщенного газом, с учетом теплового взаимодействия с окружающими породами // Теоретические основы химической технологии, 2016. Т. 50. № 4. С. 452–462.
4. *Espinoza D.N., Santamarina J.C.* P-Wave Monitoring of Hydrate-Bearing Sand During CH<sub>4</sub>–CO<sub>2</sub> Replacement // Int. J. Greenhouse Gas Control, 2011. V. 5. P. 1032.

## Именной указатель

### А

Абдулханова Р.Ф. 233  
Абузяров К.М. 250  
Абузяров М.Х. 250  
Адуев Б.П. 47  
Авдюшев В.А. 165, 222  
Азин А.В. 241  
Александрова А.Г. 165, 168, 227  
Ананьева М.В. 32  
Арсанов А.М. 30  
Астанина М.С. 244  
Ахметов А.Ж. 246  
Ахметиин Л.Р. 72, 248

### Б

Бабич Д.С. 67  
Баньщикова М.А. 178  
Батраев И.С. 151  
Баурин Н.О. 256  
Богомоллов Г.Н. 310  
Бордовицына Т.В. 10, 190, 222  
Басалаев А.В. 69  
Белова С.В. 346  
Белоусова Н.С. 98  
Блинова В.С. 171  
Бондарева Н.С. 254  
Бородулин Д.А. 127  
Брендаков В.Н. 275, 281, 288, 321, 334, 337  
Булдакова В.И. 174  
Буяков А.С. 154

### В

Васильев А.С. 98  
Васильева Е.О. 100  
Васькина А.Э. 200, 259

### Г

Гаврилов М.В. 30  
Газенаур Н.В. 32, 261, 324  
Галушина Т.Ю. 171, 195, 210  
Гибанов Н.С. 263  
Гимаева Н.Р. 176  
Гичёва Н.И. 266

Гольдина Н.В. 70  
Горбенко Т.И. 149  
Гречкосеев А.К. 234  
Григорьев А.С. 269  
Губанов С.М. 306  
Гурова 273  
Гуськов А.В. 120, 180

### Д

Далингер Е.В. 72  
Демьянов А.А. 275  
Домбраускас В.В. 42  
Дьяченко Ф.А. 101  
Дмитриева М.А. 158  
Дударева О.В. 346  
Дурнева Е.Ю. 178  
Дьяков Е.А. 266, 278  
Дьяченко Н.Н. 273  
Дубкова Я.А. 146

### Ж

Жуков И.А. 134, 146  
Журавлев А.А. 281  
Журковский М.Е. 107

### З

Закиров В.А. 77  
Запрягаев В.И. 294  
Заруев А.А. 229  
Земляк В.Л. 98, 256  
Зейналова Н.Р. 284  
Звегинцев В.И. 185, 200  
Звеков А.А. 32, 35, 53  
Зверев А.С. 53  
Зимоглядова О.А. 39  
Зингерман К.М. 81, 88

### Е

Евсеев Н.С. 14  
Евтушенко С.В. 229  
Егоров Р.И. 180  
Емельянова Е.С. 104

Еременко А.Н. 53  
Еремин М.О. 280  
Ерошенко А.Ю. 132

## И

Ипатов К.И. 256  
Исмагилов З.Р. 47

## К

Казакбаева А.А. 110  
Каленский А.В. 35  
Картавых А.А. 286  
Кваинёв А.А. 180  
Керимкулов Э.М. 114  
Ким В.В. 288  
Кинзерский В.В. 182  
Кирдяшкин А.И. 315  
Киселев Н.В. 117  
Киселев Н.П. 294  
Киселева Т.А. 291  
Кисловский В.А. 185  
Клинков С.В. 161  
Ковалев Р.Ю. 47  
Коловский И.К. 188  
Коноваленко А.И. 313  
Кормушкин М.А. 120  
Коробенков М.Р. 123  
Косарев В.Ф. 151  
Костюшин К.В. 79  
Коченова А.С. 125  
Кочетков А.В. 140, 250  
Красавин Д.С. 190  
Красновейкин В.А. 72, 127, 248  
Крафт Я.В. 47  
Крайнов А.Ю. 17, 59, 286, 306  
Крайнов Д.А. 303  
Кроткевич Д.Г. 45  
Кузьмина Л.В. 261  
Кузнецова А.А. 130  
Кульков С.Н. 123  
Кукурика М.В. 81  
Кундасев С.Г. 294

## Л

Левкина П.А. 193  
Левков Р.В. 123  
Лейцин В.Н. 123, 158

Леонтьев Н.В. 140  
Летнер О.Н. 195  
Лех Д.Ю. 229  
Ляхов А.А. 297

## М

Мазной А.С. 315  
Майрамбекова А.М. 132  
Максимов П.В. 67  
Марарескул Т.А. 182, 234  
Маслов Е.А. 26, 197, 216  
Матвеев А.Е. 134  
Матюк М.А. 324  
Матюхина Я.С. 300  
Мацкевич В.В. 197  
Мейснер С.Н. 101  
Меламед I61  
Мельников А.Ю. 200  
Механич А.А. 203  
Милевский К.Е. 120, 180  
Микушина В.А. 138  
Миньков Л.Л. 306  
Миронов Н.В. 151  
Михайличенко Ю.П. 15  
Модин И.А. 140  
Моисеева К.М. 17, 303, 306, 308  
Моисеенко Д.Д. 67  
Морозова О.Н. 206  
Москвичев Е.Н. 72, 127, 248  
Москвитина П.И. 143  
Мухин Л.Н. 20

## Н

Никитин А.П. 50  
Никитин П.Ю. 134, 146  
Новоселов С.Н. 308  
Нурмухаметов Д.Р. 35, 47, 53

## О

Орешина М.Д. 209  
Орлов М.Ю. 24, 83, 310  
Орлова М.П. 149  
Орлова Ю.Н. 56

## П

Перчаткина Е.В. 85

*Переворочаева Е.А.* 210  
*Перфильева К.Г.* 213  
*Платов В.В.* 146  
*Пичугин Н.С.* 315  
*Подолякин В.Н.* 188  
*Пономарев С.В.* 158  
*Попандопуло Н.А.* 180  
*Порохнин А.Ю.* 318  
*Порязов В.А.* 59  
*Прокофьев В.Г.* 241  
*Псахье С.Г.* 269  
*Промахов В.В.* 134

## **Р**

*Радионов С.В.* 256  
*Романдин В.И.* 313  
*Русинов А.А.* 91  
*Руссаков Д.М.* 53  
*Ряшин Н.С.* 151, 161

## **С**

*Саморокова Н.М.* 213  
*Савкина Н.В.* 26, 174, 216, 231  
*Седельникова М.Б.* 110  
*Сидоров А.Д.* 213  
*Сидоренко Ю.Н.* 143, 259  
*Синеокая С.А.* 273  
*Синяев С.В.* 206  
*Скибина Н.П.* 216, 231  
*Скрипняк В.А.* 104, 127, 269  
*Соломаха А.Е.* 321  
*Сугатов Е.Г.* 324  
*Сюсина О.М.* 219

## **Т**

*Телятников И.С.* 326  
*Товпинец А.О.* 158  
*Томилова И.В.* 168, 222, 224  
*Ткачев А.А.* 229  
*Ткачев Д.А.* 154  
*Трубицына Л.П.* 329  
*Турубаев Р.Р.* 332

## **У**

*Угодчикова А.В.* 63  
*Угольков М.А.* 237

## **Ф**

*Фанкина И.В.* 339  
*Фараонов В.В.* 26, 197, 216, 237  
*Фомин В.М.* 151  
*Федотов А.Н.* 237  
*Фурцев А.И.* 341

## **Х**

*Хакимов А.А.* 343  
*Худякова Т.И.* 345

## **Ц**

*Цыремпилова Н.С.* 234

## **Ч**

*Чиглинцева А.С.* 91, 346  
*Чувашов И.Н.* 190, 227  
*Чупашев А.В.* 197

## **Ш**

*Шавырин Д.А.* 88  
*Шадрин В.С.* 117  
*Шарков А.В.* 228  
*Шахиджанов А.К.* 232  
*Шваб А.В.* 74, 318, 332  
*Шевченко М.Е.* 334  
*Шеремет М.А.* 244, 263  
*Шикалов В.С.* 151, 161  
*Шилько Е.В.* 269  
*Шмаков Д.Н.* 188  
*Шубин А.К.* 337  
*Шепелькевич О.А.* 91  
*Шикалов В.С.* 151, 161

## **Я**

*Яковлев Е.В.* 101

## Author's index

### A

*Abdulkhanova R.*  
*Abuziarov K.*  
*Abuziarov M.*  
*Aduev B.*  
*Akhmetov A.*  
*Akhmetchin L.*  
*Aleksandrova A.*  
*Anan'eva M.*  
*Arsanov A.*  
*Arkipov V.*  
*Astanina M.*  
*Avdyushev V.*  
*Azin A.*

### B

*Babich D.*  
*Banshchikova M.*  
*Batraev I.*  
*Basalaev A.*  
*Baurin N.*  
*Belova S.*  
*Belousova N.*  
*Bogomolov G.*  
*Bondareva N.*  
*Bordovitsyna T.*  
*Borodulin D.*  
*Blinova V.*  
*Brendakov V.*  
*Buldakova V.*  
*Buyakov A.*

### C

*Chiglintseva A.*  
*Chupashev A.*  
*Chuvashov I.*

### D

*Dalinger E.*  
*Demyanov A.*  
*Dombrauskas V.*  
*Diykov E.*  
*Dmitrieva M.*

*Dychenko N.*  
*D'yachenko F.*  
*Dubkova Ya.*  
*Dudareva O.*  
*Durneva E.*

### E

*Egorov R.*  
*Emelianova E.*  
*Eremenko A.*  
*Eremin M.*  
*Eroshenko A.*  
*Evseev N.*  
*Evtushenko S.*

### F

*Fankina I.*  
*Faraponov V.*  
*Fedotov A.,*  
*Fomin V.*  
*Furtsev A.*

### G

*Galushina T.*  
*Gavrilov M.*  
*Gazenaur N.*  
*Gibanov N.*  
*Gicheva N.*  
*Gimayeva N.*  
*Gorbenko T.*  
*Gol'dina N.*  
*Grechkoseev A.*  
*Grigoriev A.*  
*Gubanov S.*  
*Gurova V.*  
*Guskov A.*

### I

*Ipatov K.*  
*Ismagilov Z.*

**K**

*Kazakbaeva A.*  
*Kalenskii A.*  
*Kartavyh A.,*  
*Kerimkulov E.*  
*Khakimov A*  
*Khudiakova T.*  
*Kim V.*  
*Kinzersky V.*  
*Kirdychkin A.*  
*Kiselev N.*  
*Kiseleva T.*  
*Kislovskiy V.*  
*Kolovsky I.*  
*Konovalenko A.*  
*Kormushkin M.*  
*Korobekov M.*  
*Kosarev V.*  
*Kostyushin K.*  
*Kochenova A.*  
*Kochetkov A.*  
*Kovalev R.*  
*Klinkov S.*  
*Krasavin D.*  
*Krasnoveikin V.*  
*Kraft Y.*  
*Krainov Al.*  
*Krainov Dm.*  
*Krotkevich D.*  
*Kukurika M.*  
*Kulkov S.*  
*Kundasev S.*  
*Kuznetsova A.*  
*Kuzmina L.*  
*Kvashnev A.*

**L**

*Lech Dm.*  
*Leitsin V.*  
*Leontiev N.*  
*Letner O.*  
*Levkov R.*  
*Levkina P.*  
*Lyahov A.*

**M**

*Mairambekova A.*

*Maksimov P.*  
*Maslov E.*  
*Matveev A.*  
*Marareskul T.*  
*Matskevich V.*  
*Matyuk M.*  
*Matyukhina Y.*  
*Maznoy A.*  
*Meisner S.*  
*Mekhanich A.*  
*Melamed B.*  
*Melnikov A.*  
*Mikhailichenko Yu.*  
*Mikushina V.*  
*Milevskiy K.*  
*Minkov L.*  
*Mironov N.*  
*Mockvichev E.*  
*Modin I.*  
*Moiseenko D.*  
*Moiseeva K.*  
*Morozova O.*  
*Moskvitina P.*  
*Mukhin L.*

**N**

*Nikitin A.*  
*Nikitin P.*  
*Novoselov S.*  
*Nurmuhametov D.*

**O**

*Oreshina M.*  
*Orlov Max.*  
*Orlova M.*  
*Orlova Yu.*

**P**

*Perchatkina E.*  
*Perevorochaeva E.*  
*Perfilieva K.*  
*Pichugin N.*  
*Podolyakin V.*  
*Ponomarev S.*  
*Popandopulo N.*  
*Porokhnin A.*  
*Poryazov V.*

*Platov V.*  
*Prokop'ev V.*  
*Promakhov V.*  
*Psakhie S.*

## **R**

*Rodionov S.*  
*Romandin V.*  
*Russakov D.*  
*Rusinov A.*  
*Ryashin N.*

## **S**

*Samokorova N.*  
*Savkina N.*  
*Shadrin V.*  
*Shahidzhanov A.*  
*Sharkov A.,*  
*Shavyrin D.*  
*Shepelkevich O.*  
*Sheremet M.*  
*Shevchenko M.*  
*Shikalov V.*  
*Shilko E.*  
*Shmakov D.*  
*Shvab A.*  
*Shubin A.*  
*Sedelnikova M.*  
*Sidorov A.*  
*Sidorenko Yu.*  
*Sineikay S.*  
*Sinyaev S.*  
*Skibina N.*  
*Skripnyk V.*  
*Solomakha A.*  
*Sugatov E.*  
*Syusina O.*

## **T**

*Telyatnikov I.*  
*Tkachev A.*  
*Tkachev D.*  
*Tomilova I.*  
*Tovpinets A.*  
*Trubitsyna L.*  
*Tsyrempilova N.*  
*Turubaev R.*

## **U**

*Ugodchikova A.*  
*Ugolkov M.*

## **V**

*Vasiliev Al.*  
*Vasileva E.*  
*Vaskina A.*

## **Y**

*Yakovlev E.*

## **Z**

*Zakirov V.*  
*Zapryagaev V.*  
*Zaruev A.,*  
*Zemlyak V.*  
*Zeynalova N.*  
*Zhukov I.*  
*Zhuravlev A.*  
*Zhurkovsky M.*  
*Zimoglyadova O.*  
*Zingerman K.*  
*Zvegintcev V.*  
*Zvekov A.*  
*Zverev A.*

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	8
-------------------	---

### ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

<i>Бордовицына Т.В.</i> 60 лет космической эры и развитие небесной механики.....	10
<i>Михайличенко Ю.П.</i> Из практики работы физкабинета ТГУ. Резонансы и автоколебания .....	15
<i>Моисеева К.М., Крайнов А.Ю.</i> Решение задач искрового зажигания и распространения пламени в реагирующих газовых и двухфазных средах.....	17
<i>Мухин Л.Н.</i> Возможности трудоустройства выпускников вузов физико-математических направлений подготовки .....	20
<i>Орлов М.Ю.</i> Исследования поведения твердых тел при ударных и взрывных нагрузках. Перспективы развития .....	24
<i>Савкина Н.В., Фарапонов В.В., Маслов Е.А.</i> Экспериментально-теоретическое исследование газодинамики проточной части модельного ГПВРД при обтекании сверхзвуковым потоком.....	26

### Секция 1. ВЗРЫВНЫЕ, ДЕТОНАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА ПРИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

<i>Гаврилов М.В., Арсанов А.М.</i> Численное моделирование процесса формирования гиперскоростного потока частиц при взрывном обжати трубки из корунда.....	30
<i>Газенаур Н.В., Ананьева М.В., Звеков А.А.</i> Зависимость критической плотности энергии инициирования взрывчатого разложения таблеток пентаэритриттетранитрата от радиуса включений наночастиц никеля.....	32
<i>Звеков А.А., Каленский А.В., Нурмухаметов Д.Р.</i> Закономерности инициирования взрывного разложения кристаллов азида серебра и прессованных таблеток тетранитрат пентаэритрита-наночастицы металлов импульсным лазерным излучением .....	35
<i>Зимоглядова О.А.</i> Численное моделирование физического процесса затухания детонации в зарядах малого диаметра .....	39
<i>Домбраускас В.В.</i> Применения бомбы постоянного объема для определения закона скорости горения.....	42
<i>Кроткевич Д.Г.</i> Влияние облучения протонами на структуру и механические свойства наноразмерного многослойного металлического покрытия Zr/Nb.....	45
<i>Крафт Я.В., Ковалев Р.Ю., Нурмухаметов Д.Р., Адуев Б.П., Исмагилов З.Р.</i> Исследование выхода летучих продуктов реакции воздействия лазерного излучения на угли методом масс-спектропии .....	47
<i>Никитин А.П.</i> Температурные зависимости оптических свойств композитов на основе прозрачной матрицы с включением наночастиц серебра.....	50
<i>Нурмухаметов Д.Р., Звеков А.А., Зверев А.С., Еременко А.Н., Руссаков Д.М.</i> Роль поверхностных плазмонов наночастиц золота в разложении энергетических материалов при лазерном воздействии .....	53
<i>Орлова Ю.Н.</i> Численное моделирование процесса внедрения крупногабаритного ударника в толстый лед .....	56

<i>Порязов В.А., Крайнов А.Ю.</i> Математическая модель и расчет окисления наночастицы алюминия на воздухе .....	59
<i>Угодчикова А.В.</i> Исследование влияния параметров процесса микродугового оксидирования на свойства кальцийфосфатных серебросодержащих биопокрытий	63

## **Секция 2. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ, ПРОГРАММЫ И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД**

<i>Бабич Д.С., Максимов П.В., Моисеенко Д.Д.</i> Дискретно-континуальное моделирование процесса рекристаллизации при интенсивной термической нагрузке .....	67
<i>Басалаев А.В.</i> Численное моделирование течения вязкой жидкости в круглой трубе с конструктивным элементом.....	69
<i>Гольдина Н.В.</i> Численное решение задачи о выгорании частиц углерода в воздушной среде.....	70
<i>Далингер Е.В., Ахметшин Л.Р., Красновейкин В.А., Москвичев Е.Н.</i> Моделирование деформации плоских алюминиевых образцов при обработке прессованием рифлением .....	72
<i>Евсеев Н.С., Шваб А.В.</i> Моделирование аэродинамики и процесса фракционного разделения мелкодисперсных частиц по размеру в центробежном классификаторе	74
<i>Закиров В.А.</i> Численное моделирование неизотермического течения вязкой жидкости в плоском канале с конструктивным элементом.....	77
<i>Костюшин К.В.</i> Программа расчета двумерных течений газа на расчетных сетках с заранее известной топологией .....	79
<i>Кукурика М.В., Зингерман К.М.</i> Зависимость скорости распространения поверхностей акустической волны от толщины поверхностного слоя .....	81
<i>Орлов М.Ю.</i> Численное моделирование процесса внедрения ударника с оживальной головной частью в стальную преграду с градиентной подложкой.....	83
<i>Перчаткина Е.В.</i> Численное решение задачи о сверхзвуковом течении газа в плоском канале с осциллирующей верхней стенкой.....	85
<i>Шавырин Д.А., Зингерман К.М.</i> Расчет напряженного состояния вблизи вязкоупругого включения при периодическом нагружении в случае конечных деформаций .....	88
<i>Шепелькевич О.А., Чиглинцева А.С., Русинов А.А.</i> Математическое моделирование процесса гидратообразования в снежном массиве при нагнетании холодного газ....	91

## **Секция 3. ИССЛЕДОВАНИЯ НОВЫХ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРИЛОЖЕНИЯХ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД**

<i>Белюсова Н.С.</i> Исследование горения монолитных частиц титана .....	95
<i>Васильев А.С., Земляк В.Л.</i> Численное и экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния ледовых образцов усиленных поверхностным армированием .....	98
<i>Васильева Е.О.</i> Структура и свойства керамического композиционного материала $ZrO_2(MgO)-MgO$ с бимодальной пористостью .....	100
<i>Мейснер С.Н., Яковлев Е.В., Дьяченко Ф.А.</i> Исследование физико-механических свойств поверхностных слоев никелида титана после электронно-ионно-плазменных модификаций .....	101
<i>Емельянова Е.С., Скрипняк В.А.</i> Численное моделирование деформации высокохромистых сталей в широком диапазоне температур .....	104

<i>Журковский М.Е.</i> Изменение гранулометрического состава взвешенных частиц .....	107
<i>Казакбаева А.А., Седельникова М.Б.</i> Модификация поверхности сплава Mg–0.8Ca методом микродугового оксидирования.....	110
<i>Керимкулов Э.М.</i> Исследование водоростойкости, механических и трибологических свойств циркониевого сплава Э110С покрытием нитрида титана, осажденного методом магнетронного распыления .....	114
<i>Киселев Н.В., Шадрин В.С.</i> Структура и свойства стали 20Х13, полученной методом инъекционного формования .....	117
<i>Кормушкин М.А., Гуськов А.В., Милевский К.Е.</i> Изучение физического процесса формирования узла трения в высокоскоростной баллистической установке .....	120
<i>Коробенков М.Р., Левков Р.В., Товпинец А.О., Лейцин В.Н., Кульков С.Н.</i> Исследование свойств керамического композита $ZrO_2(MgO)-Al_2O_3$ в широком диапазоне температур .....	123
<i>Коченова А.С., Коробенков М.В.</i> Структура и свойства композиционной смеси $ZrO_2(MgO)-Al_2O_3$ .....	125
<i>Красновейкин В.А., Москвичев Е.Н., Скрипняк В.А., Бородулин Д.А.</i> Влияние двух схем реализации интенсивной пластической деформации на физико-механические свойства алюминиевых сплавов.....	127
<i>Кузнецова А.А., Мухин Д.Д., Васильев А.А.</i> Моделирование деформирования акустической решетки под сосредоточенной нагрузкой .....	130
<i>Майрамбекова А.М., Ерошенко А.Ю.</i> Формирование ультрамелкозернистой структуры в биоинертном сплаве Ti-40 мас.% Nb в результате интенсивной пластической деформации.....	132
<i>Матвеев А.Е., Жуков И.А., Промахов В.В., Никитин П.Ю.</i> Фазовый состав СВС-лигатур системы Al–Ti–В и их влияние на механические свойства алюминиевых сплавов .....	134
<i>Микушина В.А.</i> Моделирование деформации и разрушения пористой керамики с использованием разных критериев разрушения .....	138
<i>Модин И.А., Кочетков А.В., Леонтьев Н.В.</i> Численное моделирование упругопластического сжатия гранулированных слоев из свинцовых шариков .....	140
<i>Москвитина П.И., Сидоренко Ю.Н.</i> Развитие методики моделирования пористых сред применительно к технологии создания композитов.....	143
<i>Никитин П.Ю., Дубкова Я.А., Платов В.В., Жуков И.А.</i> Исследование порошков боридов металлов, полученных методов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза .....	146
<i>Орлова М.П., Горбенко Т.И.</i> Исследование термодинамических характеристик термитов на основе иодата кальция .....	149
<i>Ряшин Н.С., Шикалов В.С., Батраев И.С., Миронов Н.В., В.Ф. Косарев В.Ф., Фомин В.М.</i> Холодное газодинамическое напыление смесей титана и керамики и микроструктура формируемых покрытий .....	151
<i>Ткачев Д.А., Буяков А.С.</i> Исследование прочностных свойств пористого композита $ZrO_2(MgO) - MgO$ при трехточечном изгибе .....	154
<i>Товпинец А.О., Лейцин В.Н., Дмитриева М.А., Пономарев С.В.</i> Прогнозирование структурно-механических характеристик и остаточных напряжений в матрице низкотемпературных композиционных материалов .....	158
<i>Шикалов В.С., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Ряшин Н.С., Меламед</i> Предварительные экспериментальные результаты оптимизации эжекторных сопел для холодного газодинамического напыления.....	161

#### Секция 4. БАЛЛИСТИКА И НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА

<i>Александрова А.Г., Авдюшев В.А.</i> Определение эффективной поверхности космического аппарата для моделирования светового давления.....	165
<i>Александрова А.Г., Томилова И.В.</i> Исследование особенностей совместного влияния вековых резонансов низких порядков и светового давления на движение околоземных космических объектов .....	168
<i>Блинова В.С., Галушина Т.Ю.</i> Применение программного комплекса “EROS” для поиска условий наблюдений потенциально опасных астероидов .....	171
<i>Булдакова В.И., Савкина Н.В.</i> Численное моделирование обтекания тела призматической формы сверхзвуковым потоком .....	174
<i>Гимаева Н.Р.</i> Исследование влияния изменения длины тела на аэродинамику.....	176
<i>Дурнева Е.Ю., Попандопуло Н.А., Баньщикова М.А.</i> Определение наилучших конфигураций орбит и даты запуска космических аппаратов .....	178
<i>Квашинёв А.А., Егоров Р.И., Милевский К.Е., Гуськов А.В.</i> Теоретическая возможность использования эффекта Коанда для стабилизации минометного выстрела в канале ствола .....	180
<i>Кинзерский В.В., Марарескул Т.А.</i> Численное интегрирование уравнений движения в бортовой модели космического аппарата ГЛОНАСС при прохождении полутеневых и теневых участков орбиты .....	182
<i>Кисловский В.А., Звезинцев В.И.</i> Параметрическое исследование поперечно выдуваемой реактивной газовой струи для управления движением сверхзвукового осесимметричного летательного аппарата .....	185
<i>Коловский И.К., Подолякин В.Н., Шмаков Д.Н.</i> Изучение устойчивости параметров орбиты космического аппарата «ГОНЕЦ-М» №37152.....	188
<i>Красавин Д.С., Чувашов И.Н., Бордовицына Т.В.</i> МEGHO-анализ динамической структуры высоких областей околоземного орбитального пространства .....	190
<i>Левкина П.А.</i> Характеристики малоразмерных фрагментов космического мусора по данным оптических наблюдений в ИНАСАН в 2016-2017 гг. ....	193
<i>Летнер О.Н., Галушина Т.Ю.</i> Выявление вековых резонансов в динамике нумерованных астероидов, тесно сближающихся с Землей.....	195
<i>Мацкевич В.В., Фарапонов В.В., Маслов Е.А., Чупашев А.В.</i> Экспериментальное определение коэффициента сопротивления тела сложной формы при обтекании сверхзвуковым потоком.....	197
<i>Мельников А.Ю., Звезинцев В.И.</i> Баллистическая установка для ускорения тяжелых тел до трансзвуковых и сверхзвуковых потоков.....	200
<i>Механич А.А.</i> Моделирование работы устройства синхронизации на основе электромагнитных измерительных рамок (ЭМИР) в канале ускорителя твердых тел .....	203
<i>Морозова О.Н., Синяев С.В.</i> Математическое моделирование работы электромеханической ступени сжатия легкого газа .....	206
<i>Орешина М.Д.</i> Расчет параметров траектории активно-реактивного снаряда осесимметричной формы на всем участке полета .....	209
<i>Переворочаева Е.А., Галушина Т.Ю.</i> Исследование эффективности использования различных параметров метода Эверхарта на примере возмущенной задачи двух тел .....	210
<i>Сидоров А.Д., Саморокова Н.М.</i> Анализ износа гладкоствольной лабораторной баллистической установки малого калибра.....	213
<i>Скибина Н.П., Фарапонов В.В., Савкина Н.В., Маслов Е.А.</i> Численный расчет аэродинамических и газодинамических параметров обтекания тела	

сверхзвуковым потоком при наличии локального вдува газа в пограничный слой...	216
<i>Сюсина О.М.</i> Влияние способа задания доверительной области на величину оценки вероятности столкновения астероида с Землей .....	219
<i>Томилова И.В., Авдюшев В.А., Бордовицына Т.В.</i> MEGNO-анализ динамической структуры окололунного орбитального пространства .....	222
<i>Томилова И.В., Александрова А.Г.</i> Поиск для отработавших объектов ГНСС орбит безопасных для функционирующих спутников с учетом светового давления.....	224
<i>Чувашов И.Н.</i> Определение орбит объектов с большой парусностью .....	227
<i>Милевский К.Е., Шарков А.В., Заруев А.А., Лех Д.Ю., Евтушенко С.В., Ткачев А.А.</i> Анализ перспектив и развития нелетального оружия .....	228
<i>Шахиджанов А.К., Фаранов В.В., Скибина Н.П., Савкина Н.В.</i> Комплекс программ для расчета аэродинамических коэффициентов вращающегося снаряда .....	232
<i>Цыремпилова Н.С., Гречкосеев А.К., Марарескул Т.А.</i> Модернизация алгоритма уточнения эфемерид навигационных космических аппаратов по межспутниковым измерениям на основе метода ортогонального визирования .....	234
<i>Угольков М.А., Федотов А.Н., Фаранов В.В.</i> Применение метода Теплера в аэрофизических экспериментах .....	237

## **Секция 5. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ**

<i>Абдулханова Р.Ф., Прокофьев В.Г.</i> Математическое моделирование SCS-синтеза ...	239
<i>Азин А.В.</i> Оценка напряженно-деформированного состояния электронных плат при эксплуатационных нагрузках .....	241
<i>Астанина М.С., Шеремет М.А.</i> Влияние переменной вязкости жидкости на конвективный тепломассоперенос в замкнутой частично пористой области с тепловыделяющим элементом .....	244
<i>Ахметов А.Ж.</i> Численное моделирование неупругой деформации и разрушения мезообъемов мрамора .....	246
<i>Ахметшин Л.Р., Красновейкин В.А., Москвичев Е.Н.</i> Моделирование перспективных схем обработки образцов из листового проката .....	248
<i>Абузьяров К.М., Абузьяров М.Х., Кочетков А.В.</i> Численное моделирование трехмерных процессов разгона деформируемых твердых тел продуктами взрыва зарядов сферической формы .....	250
<i>Бондарева Н.С.</i> Численное исследование сопряженного тепломассопереноса в системе, содержащей материал с изменяемым фазовым состоянием, с источником постоянного объемного тепловыделения .....	254
<i>Баурин Н.О., Земляк В.Л., Ипатов К.И., Радионов С.В.</i> Исследование влияние заторошенного ледяного покрова на параметры изгибно-гравитационных волн от движения подводного судна .....	256
<i>Васькина А.Э., Сидоренко Ю.Н.</i> Применение методов кластерного анализа к описанию структуры армирования композитов.....	259
<i>Газенаур Н.В., Кузьмина Л.В.</i> Физическое моделирование процесса электрополевого разложения азида серебра в магнитном поле .....	261
<i>Гибанов Н.С., Шеремет М.А.</i> Влияние расположения локального полуцилиндрического источника объемного тепловыделения на конвективный теплообмен в квадратном контуре .....	263
<i>Гичёва Н.И., Дьяков Е.А.</i> Моделирование процесса напыления вольфрама методом осаждения из парогазовой фазы .....	266

<i>Григорьев А.С., Шилько Е.В., Скрипняк В.А., Псахье С.Г.</i> Модель динамического механического поведения хрупких материалов, основанная на принципах кинетической теории прочности .....	269
<i>Гурова В.С., Синеокая С.А., Дьяченко Н.Н.</i> Параметрические исследования влияния гидрида алюминия на энергетические характеристики РДТТ .....	273
<i>Демьянов А.А., Брендаков В.Н.</i> Численное моделирование гидродинамики в реакторе осаждения вольфрама .....	275
<i>Дьяков Е.А., Гичева Н.И.</i> Исследование движение гранулированной среды в кольцевом бункере .....	278
<i>Еремин М.О.</i> Эволюция напряженно-деформированного состояния горного массива при ведении горных работ, посадки кровли и триггерные эффекты. Математическое моделирование .....	280
<i>Журавлев А.А., Брендаков В.Н.</i> Численное моделирование процесса фторирования порошкообразного вольфрама .....	281
<i>Зейналова Н.Р.</i> Численное моделирование температурного разделения газа в вихревой трубе Ранка – Хилша .....	284
<i>Картавых А.А., Крайнов А.Ю.</i> Экспериментальное определение эффективности воздушного охлаждения емкостей для десублимации фтористого водорода .....	286
<i>Ким В.В., Брендаков В.Н.</i> Математическая модель процесса разложения полиуретанов аммония .....	288
<i>Киселева Т.А.</i> Численное моделирование процесса формирования гиперскоростного потока частиц при взрывном обжати трубки из корунда .....	291
<i>Кундасев С.Г., Запрягаев В.И., Киселев Н.П.</i> Исследование ударно-волновой структуры свободных и импактных сверхзвуковых струй .....	294
<i>Ляхов А.А.</i> Химическая кинетика радикалов в аргон-силановой плазме высокочастотного разряда пониженного давления .....	297
<i>Матюхина Я.С.</i> Автоматизированная нечеткая система параметрического алгоритма .....	300
<i>Моисеева К.М., Крайнов Д.А.</i> Моделирование движения газозвеси пыли в U-образном канале .....	303
<i>Моисеева К.М., Миньков Л.Л., Крайнов А.Ю., Губанов С.М.</i> Моделирование стационарного естественно-конвективного течения воздуха в помещении с тепловыделяющими цилиндрами .....	306
<i>Новоселов С.Н., Моисеева К.М.</i> Расчет скорости роста давления при сгорании монодисперсной наноразмерной взвеси угольной пыли в замкнутом объеме .....	308
<i>Орлов М.Ю., Богомолов Г.Н.</i> К пробитию однородных и двухслойных стальных пластин с ударником с закругленной головной частью .....	310
<i>Перфильева К.Г., Архипов В.А., Коноваленко А.И., Романдин В.И.</i> Импульсный распылитель порошков .....	313
<i>Пичугин Н.С., Мазной А.С., Кирдяшкин А.И.</i> О максимально возможном радиационном КПД инфракрасных горелок .....	315
<i>Порохнин А.Ю., Шваб А.В.</i> Моделирование процесса фторирования металлического вольфрама в пространственной постановке задачи .....	318
<i>Соломаха А.Е., Брендаков В.Н.</i> Численная модель шнековой осадительной центрифуги .....	321
<i>Сугатов Е.Г., Матюк М.А., Газенаур Н.В.</i> Физическое моделирование процесса кристаллизации неорганических солей из водных растворов в электрическом поле .....	324
<i>Телятников И.С.</i> Моделирование деформационных процессов в литосферных структурах при их статическом взаимодействии .....	326

<i>Трубицына Л.П.</i> Параметры динамического слоя сверхзвукового отрывного течения в зависимости от величины угла сжатия .....	329
<i>Турубаев Р.Р., Шваб А.В.</i> Исследование аэродинамики закрученного турбулентного течения в вихревой камере.....	332
<i>Шевченко М.Е., Брендаков В.Н.</i> Математическое моделирование процесса сублимации порошкообразного материала .....	334
<i>Шубин А.К., Брендаков В.Н.</i> Численное исследование гидродинамических и тепловых процессов .....	337
<i>Фанкина И.В.</i> Задача о поиске оптимального размера жесткой пластины в задаче о равновесии двухслойной конструкции .....	339
<i>Фурцев А.И.</i> Скорость высвобождения энергии для задачи об отслоении тонкого препятствия от пластины.....	341
<i>Хакимов А.А.</i> Решение задачи сверхзвукового обтекания пластины с помощью прикладного пакета Ansys Fluent.....	343
<i>Худякова Т.И.</i> Математическое моделирование безгазового горения системы сопряженных слоев, содержащей теплопроводящие элементы .....	345
<i>Чиглинцева А.С., Белова С.В., Дударева О.В.</i> Моделирование процесса извлечения метана из гидратного массива закачкой диоксида углерода.....	346
ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ .....	349

## CONTENTS

<b>PREFACE</b> .....	9
----------------------	---

## PLENARY SESSION

<i>Bordovitsyna T.</i> 60 Years of the space age and the development of celestial mechanics... 10	
<i>Mikhailichenko Yu.</i> Physics lecture-demonstrations in Tomsk State University. Resonances and self-excited oscillations .....	15
<i>Moiseeva K., Krainov A.</i> Numerical solution of the problems of spark ignition and flame propagation in reacting gas and two-phase media .....	18
<i>Mukhin L.</i> Opportunities of employment of graduates – physicists and mathematicians... 21	
<i>Orlov M.</i> Study of behaviour of solids at shock and explosive load. Development prospects .....	24
<i>Savkina N., Faraponov V., Maslov E.</i> Experimental-theoretical investigation of the gas dynamics of the flow part of the model HRABE in supersonic flow .....	27

### Session 1. EXPLOSION, DETONATION PHENOMENA AND PROPERTIES OF MATTER AT HIGH-INTENSIVE

<i>Gavrilov M. and Arsanov A.</i> Numerical simulation of the process of forming the hyper-speed stream of particles in the explosive combination of a tube from corundum.....	30
<i>Gazenaур N., Anan'eva M., Zvekov A.</i> The dependence of the critical density of initiation energy of explosive decomposition of pentaerythritol tetranitrate tablets on the radius of the inclusions of nanoparticles of nickel.....	32

<i>Zvekov A., Kalensky and Nurmuhametov D.</i> The features of silver azide crystals and pentaerythritol tetranitrate - metal nanoparticles pressed pellets' explosion initiation with laser pulse irradiation.....	36
<i>Zimoglyadova Ol.</i> Numerical simulation of physical process of detonation sensation in charges of small diameter.....	40
<i>Dombrauskas V.</i> The use of a constant volume bomb to determine the law of the rate of combustion.....	43
<i>Krotkevich D.</i> Influence of proton irradiation on structure and mechanical properties of nanoscale multilayer metallic Zr/Nb coatings.....	45
<i>Kraft Y., Kovalev R., Nurmuhametov D., Aduiev B., Ismagilov Z.</i> Volatile matter yield of the reaction of laser radiation impact on the coal by mass-spectrometry method research.....	48
<i>Nikitin A.</i> The temperature dependence of the optical properties of composites based on a transparent matrix with inclusions of silver nanoparticles.....	50
<i>Nurmukhametov D., Zvekov A., Zverev A., Eremenko A. and Russakov D.</i> The role of surface plasmons of gold nanoparticles in the decomposition of energy materials under laser action .....	54
<i>Orlova Yu.</i> Numerical modeling of perforating of large-sized impactor into thick ice .....	57
<i>Poryazov V. and Krainov Al.</i> Mathematical model and numerical investigation on aluminum nanoparticles oxidation in the air .....	59
<i>Ugodchikova An.</i> Research of the effect of the parameters of the micro arc oxidation process on the properties of calcium phosphate silver-containing biocoatings .....	63

## **Session 2. NUMERICAL METHODS, ALGORITHMS, CODES, AND ACCURATE SOLUTIONS OF THE CONTINUUM MECHANICS**

<i>Babich D., Maksimov P. and Moiseenko D.</i> Dynamic recrystallization at crack surfaces at elevated temperatures - hybrid cellular automata simulation.....	67
<i>Basalaev A.</i> Numerical modeling of viscous fluid flow in a round pipe with a structural element .....	69
<i>Goldina N.</i> Numerical solution of combustion of carbon particles in atmosphere .....	70
<i>Dalinger E., Achmetchin L., Krasnoveikin V., Mockvichev E.</i> Numerical simulation of deformation of flat aluminum specimens under treatment by constrained groove pressing .....	72
<i>Evseev N., Shvab A.</i> Modeling of aerodynamics and process of fractional separation of finely dispersed particles in a centrifugal classifier.....	75
<i>Zakirov V.</i> Numerical simulation of a nonisothermal flow of a viscous fluid in a plate channel with a structural element.....	78
<i>Kostyushin K.</i> Computer program for calculating two-dimensional gas flow at the meshes with arbitrary number of cell faces .....	79
<i>Kukurika M., Zingerman K.</i> Dependence of the speed of the surface acoustic wave distribution from thickness of the surface layer .....	81
<i>Orlov M.</i> Numerical simulation of perforating steel plate with graded substrate by projectile.....	83
<i>Perchatkina E.</i> Numerical solution for the problem of supersonic gas flow in 2-d channel with the oscillating upper wall .....	86
<i>Shavyrin D., Zingerman K.</i> Analysis of stresses near a viscoelastic inclusion under periodical loading for finite strains .....	89
<i>Shepelkevich O., Chiglintseva A. and Rusinov A.</i> Mathematical modeling of the hydrate formation process in the snow massif with the injection of cold gas.....	92

**Session 3. INVESTIGATION OF ADVANCED  
MATERIALS IN APPLICATIONS OF CONTINUUM MECHANICS**

<i>Belousova N.</i> Investigation of monolithic titanium particles combustion .....	95
<i>Vasiliev Al. and Zemlyak V.</i> Numerical and experimental research of the stressed-deformed state of ice samples of reinforced surface reinforcement.....	98
<i>Vasileva E.</i> Structure and properties of ceramic composite material ZrO <sub>2</sub> (MgO)–MGO with bimodal porosity.....	100
<i>Meisner S., Yakovlev E., D'yachenko F.</i> Investigation of the physics and mechanical properties of the surface layer of nickel titanium alloy after electron-ion-plasma modifications .....	102
<i>Emelianova E. and Skripnyk V.</i> Numerical simulation deformation of high-chromium steels over a wide range of temperature .....	105
<i>Zhurkovsky M.</i> Change in granulometric composition of suspended particles during gravity settling.....	108
<i>Kazakbaeva A., Sedelnikova M.</i> Modification of the surface of the Mg-0.8Ca alloy by micro arc oxidation method.....	111
<i>Kerimkulov E.</i> Hydrogen resistance, mechanical and tribological properties of zirconium alloy E110 with titanium nitride coating deposited by magnetron sputtering .....	114
<i>Kiselev N., Shadrin V.</i> Structure and properties of steel 20X13, obtained by injection forming method .....	118
<i>Kormushkin M., Guskov A., Milevskiy K.</i> The study of the physical process of formation of a friction unit in high-speed ballistic installation.....	120
<i>Korobekov M., Levkov R., Tovpinets A., Leitsin V., Kulkov S.</i> The study of the properties of ceramic composites ZrO <sub>2</sub> (MgO)-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> in a wide temperature range .....	124
<i>Kochenova A. and Korobekov M.</i> Structure and properties of composite ZrO <sub>2</sub> (MgO)–Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	126
<i>Krasnovеikin V., Moskvichev E., Skripnyak V., Borodulin D.</i> Dependence of physics and mechanical properties of aluminum alloys on severe plastic deformation in two treatment schemes .....	128
<i>Kuznetsova A., Mukhin D., Vasiliev A.</i> Modeling of the deformation of auxetic lattice under a concentrated load.....	130
<i>Mairambekova A., Eroshenko A.</i> Production of the ultrafine-grained structure in the bioinert TI-40 WT.%Nb alloy as a result of severe plastic deformation .....	132
<i>Matveev A., Zhukov I., Promakhov V., Nikitin P.</i> Phase composition of SHS-ligatures of Al–Ti–B system and their impact on mechanical properties of aluminum alloys .....	135
<i>Mikushina V.</i> Modeling of strain and damage of porous ceramics using different fracture criteria.....	138
<i>Modin Iv., Kochetkov A., Leontiev N.</i> Numerical modeling of elastic plastic compression of granulated layers from plumbum balls .....	141
<i>Moskvitina P. and Sidorenko Yu.</i> Development of a technique for modeling porous media with reference to composite technology.....	143
<i>Nikitin P., Dubkova Y., Platov V., Zhukov Il.</i> Investigation of metal borides powders obtained by the self-propagating high-temperature synthesis.....	146
<i>Orlova M., Gorbenko T.</i> Study of thermodynamic characteristics of thermites based on calcium iodat .....	149
<i>Ryashin N., Shikalov V., Batraev I., Mironov N., Kosarev V. and Fomin V.</i> Cold spraying titanium and ceramics blends and microstructure of formed coatings.....	151
<i>Tkachev D. and Buyakov A.</i> Investigation of flexural strength of porous ZRO <sub>2</sub> (MGO) – MGO composite at three point bending .....	155

<i>Tovpinets A., Leitsin V., Dmitrieva M. and Ponomarev S.</i> Prediction of structural-mechanical characteristics and residual stresses in the matrix of low-temperature composite materials.....	159
<i>Shikalov V., Klinkov S., Kosarev V., Ryashin N. and Melamed B.</i> Preliminary experimental results of ejector nozzle optimization for cold spray .....	162

#### **Session 4. BALLISTICS AND CELESTIAL MECHANICS**

<i>Aleksandrova A., Avdyushev V.</i> Determination of the effective surface of a spent spacecraft for simulating the light pressure.....	165
<i>Aleksandrova A., Tomilova I.</i> Investigation of the collaborative influence of secular resonances of low orders and light pressure on the motion of near-earth space objects.....	169
<i>Blinova V., Galushina T.</i> Application of software «EROS» for search of observation conditions of potentially hazardous asteroids .....	172
<i>Buldakova V., Savkina N.</i> Computational modeling of supersonic flows over prismatic body .....	175
<i>Gimayeva N.</i> Research of the influence of changes in body length on aerodynamics.....	177
<i>Durneva E., Popandopulo N., Banshchikova M.</i> Determination of the best orbital configurations and launch dates of space vehicles.....	178
<i>Kvashnev A., Egorov R., Milevsky K. and Guskov A.</i> Theoretical possibility of using the Coanda's effect to stabilize a mortar shot in the barrel channel .....	181
<i>Kinzersky V., Marareskul T.</i> Numerical integration of equations of motion on the on-board model of the GLONASS satellite during the passage half-shadow and shadow areas of the orbit.....	183
<i>Kislovskiy V., Zvegintsev V.</i> Parametric study of a transversely blown reactive gas jet to control the motion of a supersonic axisymmetric vehicle .....	185
<i>Kolovsky I., Podolyakin V. and Shmakov D.</i> The investigation of the sustainability of the orbital parameters of the spacecraft «Gonets-M» № 37152.....	188
<i>Krasavin D., Chuvashov Iv. and Bordovitsyna T.</i> MEGNO-analysis of the dynamic structure of high regions of near-earth orbital space.....	191
<i>Levkina P.</i> Characteristics of small-sized space debris fragments using optical observations of INASAN in 2016-2017.....	193
<i>Letner Ol., Galushina T.</i> Identification of secular resonances in the dynamics of numbered asteroids closely approaching with the Earth.....	195
<i>Matskevich V., Faraponov V., Maslov E. and Chupashev A.</i> Experimental determination of the drag coefficient of a complex-shaped body in supersonic flow.....	198
<i>Melnikov A., Zvegintsev V.</i> Ballistic facility for accelerating heavy bodies to transonic and supersonic speeds.....	200
<i>Mekhanich A.</i> The modelling of functioning synchronization devices based on the electromagnetic measurement frame (EMMF) in the channel of the accelerator of solid bodies .....	204
<i>Morozova O. and Sinyaev S.</i> Mathematical modeling of work an electromechanical stage compressing a light gas .....	206
<i>Oreshina M.</i> The calculation of the trajectory parameters of the active-reactive shell axisymmetric shape for all phase of flight .....	209
<i>E. Perevorochaeva and T. Galushina</i> The efficiency research of various parameters' application of Everhart method on the example of perturbed two-body problem .....	211
<i>Sidorov A. and Samokorova N.</i> Analysis of the wear of a small-bore smooth-bore laboratory ballistic installation .....	214
<i>Skibina N., Faraponov V., Savkina N. and Maslov E.</i> Numerical calculation of	

aerodynamic and gas-dynamic parameters of a supersonic flow around a body with local injection into the boundary layer .....	216
<i>Syusina O.</i> The influence of the method of the construction of the confidence region on the value of the probability of asteroid collision with the Earth .....	219
<i>Tomilova I., Avdushev V. and Bordovitsyna T.</i> MEGNO-analysis of the dynamic structure of the near-Moon orbital space.....	222
<i>Tomilova I. and Aleksandrova A.</i> Search for end-of-life GNSS-objects orbits safe for operating satellites taking into account the light pressure .....	224
<i>Chuvashov Iv.</i> Determination of orbit objects with high area-to-mass ratio.....	227
<i>Sharkov A., Zaruev A., Lech Dm., Evtushenko S. and Tkachev A.</i> Analysis of the prospects and development of non-lethal weapons.....	229
<i>Shahidzhanov A., Faraponov V., Skibina N. and Savkina N.</i> Software package for calculating the aerodynamic coefficients of a rotating projectile .....	232
<i>Tsyrempilova N., Grechkoseev A. and Marareskul T.</i> Modernization of the ephemeris estimation algorithm of navigation satellites by crosslink satellite measurements in terms of orthogonal viewing algorithm.....	235
<i>Ugol'kov M., Fedotov A. and Faraponov V.</i> The application of the Thepler's method in aerophysical experiments .....	238

### **Session 5. MATHEMATICAL AND PHYSICAL MODELING OF TECHNICAL AND NATURAL SYSTEMS**

<i>Abdulkhanova R., Prokop'ev V.</i> Modelling of flame temperature of solution combustion synthesis.....	239
<i>Azin A.</i> Evaluation of the stress-strain state of the printed circuit boards under operational loads .....	241
<i>Astanina A. and Sheremet M.</i> Effect of fluid temperature-dependent viscosity on convective heat and mass transfer in a partially porous enclosure with a heat-generating element .....	245
<i>Akhmetov A.</i> Numerical simulation of non-elastic deformation and fracture of the marble's mesovolume .....	246
<i>Akhmetshin L., Krasnoveikin V. and Moskvichev E.</i> Numerical simulation of perspective treatment schemes of specimens from sheet product.....	248
<i>Abuziarov K., Abuziarov M. and Kochetkov A.</i> Numerical simulation of three-dimensional processes of the acceleration of deformable solids by product of explosion of spherical charges.....	250
<i>Belova S.</i> Mathematical modelling of the process extraction of methane with hydrate in the massif in the way injection carbon dioxide.....	254
<i>Bondareva N.</i> Numerical investigation of conjugate heat transfer in system containing phase change material with source of constant volume heat generation.....	255
<i>Baurin N., Zemlyak V., Ipatov K. and Rodionov S.</i> The research of the influence of the hummocked ice cover on the parameters of flexural-gravitational waves from the motion of a submarine vessel .....	256
<i>Vaskina A. and Sidorenko Yu.</i> The application of cluster analysis methods to the description of the structure of reinforcement of composites.....	259
<i>Gazenaurova N. and Kuzmina L.</i> Physical modeling of the process of decomposition of silver azide in magnetic field .....	261
<i>Gibanov N. and Sheremet M.</i> Influence of a semicylindrical volumetric heat generation source location on convective heat transfer within a square cavity .....	264

<i>Gicheva N. and Diykov E.</i> Modeling of tungsten coating process by chemical vapor deposition .....	267
<i>Grigoriev A., Shilko E., Skripnyak V. and Psakhie S.</i> Kinetic strength theory based dynamic model of brittle solids mechanical behavior.....	270
<i>Gurova V., S. Sineikay and Dychenko N.</i> Parametric studies of the influence of aluminum hydride on the energy characteristics of solid propellant .....	273
<i>Demyanov A. and Brendakov V.</i> Numerical simulation of hydrodynamics in a tungsten deposition reactor .....	276
<i>Dyakov E. and Gicheva N.</i> Research of motion of a granular medium in an annular hopper.....	278
<i>Eremin M.</i> Evolution of stress-strain state of rock mass at mining, roof collapses and trigger effects. Mathematical modeling.....	280
<i>Zhuravlev A. and Brendakov V.</i> Numerical simulation of process of fluoridation powdered tungsten.....	282
<i>Zeynalova N.</i> Numerical modeling of temperature gas separation in a Rank-Hilsh's vortex tube.....	284
<i>Kartavyh A. and Krainov A.</i> Experimental determination of the effectiveness of air cooling of vessels for desublimation hydrogen fluoride .....	286
<i>Kim V. and Brendakov V.</i> Mathematical model of the process of decomposition of ammonium polyuranates .....	289
<i>T. Kiseleva</i> On the effect of a subsonic argon jet on aerodynamic drag of a body in supersonic air flow .....	292
<i>Kundasev S. and Zapryagaev V. and Kiselev N.</i> Investigation of the shock-wave structure of free and impinging supersonic jets .....	295
<i>Lyahov A.</i> Chemical kinetics of radicals in argon-silane low-pressure RF plasmas.....	298
<i>Matyukhina Y.</i> The automated fuzzy control system of parameters a genetic algorithm....	300
<i>Moiseeva K. and Krainov Dm.</i> Simulation of a gas dust suspension flow in a U-shaped channe .....	304
<i>Moiseeva K., Minkov L., Krainov A. and Gubanov S.</i> Simulation of stationary natural-convective air flow in a room with heat generating cylinders.....	307
<i>Novoselov S. and Moiseeva K.</i> Calculation of the rate of pressure growth during combustion of a monodisperse nanosized coal dust suspension in a closed volume.....	309
<i>Orlov M. and Bogomolov G.</i> About a penetration of homogeneous and two-layer steel barriers by projectile .....	311
<i>Perfilieva K., Arkhipov V., Konovalenko A. and Romandin V.</i> Impulse facility for powders spaying.....	313
<i>Pichugin N., Maznoy A. and Kirdychkin A.</i> Radiant burners with maximal radiation efficiency.....	315
<i>Porokhnin A. and Shvab A.</i> Modeling fluorination process of metal tungsten in the spatial formulation of the problem .....	319
<i>Solomakha A. and Brendakov V.</i> Numerical model of screw settling centrifuge .....	322
<i>Sugatov E., Matyuk M. and Gazenaur N.</i> Physical modeling of the process of crystallization of inorganic salts from aqueous solutions in an electric field .....	324
<i>Telyatnikov Il.</i> Modeling of deformation processes in lithospheric structures during their static interaction .....	327
<i>Trubitsyna L.</i> The dynamic layer parameters in supersonic separated flow depending on the compression corner angle .....	329
<i>Turubaev R. and Shvab A.</i> Investigation of the swirled turbulent flow aerodynamics in the vortex chamber.....	333

<i>Shevchenko M. and Brendakov V.</i> Mathematical modeling of the process of substitution of powder material .....	335
<i>Shubin A. and Brendakov V.</i> Numerical investigation of thermal and hydrodynamic Processes .....	338
<i>Fankina I.</i> Problem on finding optimal size for rigid plate in equilibrium problem of Two-layer structure .....	339
<i>Furtsev A.</i> Energy release rate for problem of delamination of thin obstacle from plate ...	341
<i>Khakimov A.</i> Solution of the problem of supersonic flow past a plate using the Ansys Fluent application package.....	343
<i>Khudiakova T.</i> Mathematical modeling gasless combustion system of conjugated layers containing heat conducting elements.....	345
<i>Chiglintseva A.S., Belova S.V., Dudareva O.V.</i> Mathematical modelling of the process extraction of methane with hydrate in the massif in the way injection carbon dioxide.....	347
AUTHOR'S INDEX.....	352

## СПОНСОРЫ И ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ



Российский Фонд  
Фундаментальных  
Исследований (РФФИ)  
**Адрес:** Россия, 119991, г. Москва,  
Ленинский проспект, 32а, 20-21 этаж,  
В-334, ГСП-1.  
Т-н: (499) 586-00-45,  
Факс: (495) 938-19-31, <http://www.rfbr.ru>



Совет молодых учёных  
Томского государственного  
университета был утверждён  
приказом ректора ТГУ  
за № 527 от 13 ноября 2009 г.  
Россия, 634050, г. Томск,  
пр. Ленина, 36  
<http://smu.tsu.ru/OSovet>



СКОРОСТЬ  
ТОЧНОСТЬ  
БЕЗОПАСНОСТЬ



Российский информационный портал  
в области науки, медицины, технологии  
и образования.

На платформе аккумулируются полные  
тексты и рефераты научных статей и пуб-  
ликаций. По состоянию на январь 2014 г.  
в базе данных eLIBRARY.ru насчитыва-  
лось более 15 млн статей.

<http://elibrary.ru/defaultx.asp>,  
117105, г. Москва, ул. Нагатинская, д. 1,  
стр. 14, 1 подъезд, этаж 3

**АССОЦИАЦИЯ  
«СОЮЗВЗРЫВПРОМ»**

ООО Кузбасское специализированное  
управление по производству  
буровзрывных работ «КузбассСпец-  
Взрыв», производство взрывных работ и  
доставка взрывных материалов до места  
проведения взрывных работ  
Россия, 650905,  
г. Кемерово, ул. Баха, 15А,  
Тел/факс (3842) 71-25-34, бухг. 71-25-38,  
E-mail: [kvs158@mail.ru](mailto:kvs158@mail.ru), [kuzbassv@mail.ru](mailto:kuzbassv@mail.ru)

Томская региональная общественная  
организация «Ассоциация практической  
стрельбы», выполняющая функции  
Томского областного отделения  
ОСОО «ФПСР» и имеющая государствен-  
ную аккредитацию, приглашает в тир по  
адресу: г. Томск, ул. Бердская, 21.  
<http://strelok.tomsk.ru/>

Научное издание

VII Международная молодежная научная конференция  
«Актуальные проблемы современной механики  
сплошных сред и небесной механики»  
27–29 ноября 2017 г., Томск

Подписано в печать 26.08.2018 г.  
Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Печ. л. 22,9,1; усл. печ. л. 32,1; уч.-изд. л. 31,0.  
Тираж 100 экз.