



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



**VI Международная молодежная научная конференция  
«Актуальные проблемы современной механики  
сплошных сред и небесной механики – 2016»  
г. Томск, 16–18 ноября 2016 г.**

**VI International Scientific Conference  
«Current issues of  
continuum mechanics and celestial mechanics – 2016»,  
November, 16–18, 2016**

Томск-2016

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» 16–18 ноября 2016 г.: Материалы конференции / под ред. М.Ю. Орлова. – Томск. 2016. – 160 с.

ISBN 978-5-9906644-7-0

Представлены материалы конференции молодых ученых «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики», прошедшей 16–18 ноября 2016 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 16-31-10471 мол\_г.*

*Публикуется в авторской редакции*

ISBN 978-5-9906644-7-0

© Томский государственный университет, 2016

## ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ:

Председатели:

**Липанов Алексей Матвеевич**, д.ф.-м.н., академик РАН  
**Глазунов Анатолий Алексеевич**, д.ф.-м.н., профессор, ТГУ  
**Шрагер Эрнест Рафаилович**, д.ф.-м.н., профессор, ТГУ

**Архипов В.А.**, профессор, д.ф.-м.н., зав. отд. НИИ ПММ ТГУ

**Бордовицына Т.В.**, профессор, д.ф.-м.н., зав. отд. НИИ ПММ ТГУ

**Биматов В.И.**, профессор, зав. кафедрой ФТФ ТГУ

**Бутов В.Г.**, профессор, зав. отд. НИИ ПММ ТГУ

**Васенин И.М.**, Заслуженный деятель науки РФ, д.ф.-м.н., профессор ТГУ

**Васильев А.Н.** профессор С-Пб. политехнического университета им. Петра Великого

**Глазырин В.П.** профессор, д.ф.-м.н. зав. лаб. НИИ ПММ ТГУ

**Орлов М.Ю.** к.ф.-м.н., НИИ ПММ ТГУ

**Ищенко А.Н.**, профессор, д.ф.-м.н., зам. директора НИИ ПММ ТГУ

**Крайнов А.Ю.**, профессор, д.ф.-м.н. ТГУ

**Кульков С.Н.**, профессор, д.ф.-м.н. ТГУ

**Масловский В.И.**, доцент, директор МЦ ТГУ

**Разоренов С.В.**, профессор, д.ф.-м.н., ТГУ

**Скрипняк В.А.**, профессор, д.ф.-м.н., зав. кафедрой ФТФ ТГУ

**Шваб А.В.**, профессор, д.ф.-м.н., зав. кафедрой ФТФ ТГУ

**Шрагер Г.Р.**, профессор, д.ф.-м.н., зав. кафедрой ФТФ ТГУ

## 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. Букедова, Республика Казахстан)

**Ахмед Брара** (директор RIB, Алжир)

**Момчило Милинович** (Белградский университет, Сербия)

**Аль Карагулай Хуссам Али Халаф** (Ди Кар университет, Ирак)

**Паскаль Форкью** (Университет Ж. Форье, Франция)

**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)

## ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель:

**Орлов Максим Юрьевич**, к.ф.-м.н., научный сотрудник НИИ ПММ ТГУ

Секретари конференции:

**Сидоров А.Д.**, аспирант ТГУ; **Никитась О.С.**, студент ТГУ

**Савкина Н.В.**, к.ф.-м.н., доцент ТГУ; **Козулин А.А.**, к.ф.-м.н., доцент ТГУ; **Коробенков М.В.**, к.ф.-м.н.; **Рыжих Ю.Н.**, к.ф.-м.н., доцент ТГУ; **Борзенко Е.И.**, к.ф.-м.н., доцент ТГУ; **Пикушак Е.В.**, к.ф.-м.н., доцент ТГУ; **Хмелева М.Г.**, магистрант ТГУ; **Порязов В.А.**, к.ф.-м.н., доцент ТГУ; **Солоненко В.А.**, к.ф.-м.н., доцент ТГУ; **Кагенов А.М.**, аспирант ТГУ; **Моисеева К.М.**, к.ф.-м.н., ТГУ; **Хрусталева А.П.**, магистрант ТГУ; **Жуков И.А.**, к.ф.-м.н., НИИ ПММ ТГУ, **Промахов В.В.**, к.т.н., НИИ ПММ ТГУ

## **ОРГАНИЗАЦИИ, УЧАСТНИКИ КОНФЕРЕНЦИИ «АПМСС-2016»:**

Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск),

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики (Томск)

Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск),

НИ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (Н. Новгород),

Московский авиационный университет (Москва),

Институт Проблем Механики им. М.В. Келдыша (Москва),

Московский технический университет им. Н.Э. Баумана (Москва),

Институт космических исследований РАН (Москва),

Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения

Институт проблем прочности и материаловедения (Томск),

Новосибирский государственный технический университет (Новосибирск),

Томский университет систем управления и радиоэлектроники (Томск),

Кемеровский государственный университет (Кемерово),

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН (Кемерово)

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск),

Иркутский государственный университет (Иркутск)

Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема (Биробиджан),

РФЯЦ ВНИИ экспериментальной Физики (Саров),

Новокузнецкий институт (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кемеровский государственный университет» (Новокузнецк),

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева (Красноярск)

Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук (Красноярск)

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН (Кемерово)

Крыловский государственный научный центр (Санкт-Петербург)

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,

Крымский федеральный университет им. В.И.Вернадского (Симферополь)

Компьютерные системы (Томск)

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:  
<https://ftf.tsu.ru/konferentsii/>

**«Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics 2016»  
VI<sup>th</sup> International Youth Scientific Conference  
Tomsk, Russia, 16–18 November 2016**



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

International Youth Scientific Conference "Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics", November 16-18, 2016.: The conference proceedings / Ed. M.Yu. Orlov. - Tomsk. 2016. – 160 p.

For scientific workman, the teachers, graduate student and student.

@Tomsk State University  
Printed in the Russian Federation

VI International Youth Scientific Conference  
«Current issues of modern continuum mechanics and celestial mechanics –  
2016»:

**Co-Chairs:**

**Aleksey Lipanov**, Ph.D., academician of RAS

**Anatoly Glazunov**, Ph.D., professor, TSU

**Ernst Shrager**, Ph.D., professor, TSU

**Program Committee Members:**

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

**Organizing and Technical Committee Members:**

**M. Orlov** (Ph.D., RSI AMM, Committee Chair), **Alex. Sidorov** (TSU Conference Technical Secretary), **O. Nikitas** (TSU Conference Technical Secretary) **N. Savkina**, **A. Kozulin**, **Max. Korobnikov**, **Yu. Ryzhikh**, **E. Borzenko**, **E. Pikhchak**, **M. Hmeleva**, **V. Poryazov**, **V. Solonenko**, **K. Moiseva**, **A. Chrustalev**, **I. Gukov**, **Vlad. Promachov**

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

## Organizations

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),  
National Research Moscow Aviation Institute (Moscow),  
M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS (Moscow),  
Bauman Moscow State Technical University (Moscow),  
Space Research Institute (Moscow),  
Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (Tomsk),  
Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk),  
Tomsk State University of control system and Radioelectronics (Tomsk),  
Kemerovo State University (Kemerovo),  
SB RAS Kemerovo Science Center (Kemerovo),  
Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk),  
Irkutsk State University (Irkutsk),  
Amur State University named after Sholom Aleichem (Birobidjan),  
The Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics (Sarov),  
Siberian State Aerospace University (Krasnoyarsk),  
Institute of computational modelling SB RAS (Krasnoyarsk),  
SB RAS Kemerovo Science Center (Kemerovo),  
Krylov State Research Centre (S. Petersburg),  
Polzunov Altai State Technical University (Barnaul),  
V.I. Vernadsky Crimean Federal University (Simferopol)  
Computer Systems (Tomsk)

## ПРЕДИСЛОВИЕ

16–18 ноября 2016 г. на базе Национального исследовательского Томского государственного университета прошла ежегодная международная молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики». Конференция была приурочена ко Дню ракетно-артиллерийских войск РФ и проходила в Томске шестой раз. В работе конференции принимали участие молодые ученые из Томска, Москвы, Санкт-Петербурга, Симферополя, Сарова, Новосибирска, Барнаула, Н.Новгорода, Кемерово, Казани, Красноярска, Биробиджана, Новокузнецка, Иркутска и других городов.

Одной из основных целей конференции являлось привлечение и закрепление в сфере науки и инноваций молодых исследователей – будущего отечественной науки. Пленарные и секционные заседания проходили в течение нескольких дней и содержали более 100 докладов.

Работа конференции проходила в рамках 6 секций:

1. Взрывные, детонационные процессы и свойства вещества при высокоэнергетических воздействиях,
2. Численные методы, алгоритмы, программы и точные решения задач механики сплошных сред,
3. Исследования новых перспективных материалов в приложениях механики сплошных сред,
4. Баллистика и небесная механика,
5. Математическое и физическое моделирование технических и природных систем.
6. Математика, физика и информатика для юных исследователей и учащихся общеобразовательных школ и лицеев.

Программный и организационный комитет благодарит участников за интересные доклады и надеется на дальнейшее сотрудничество в рамках образовательных и научных программ.

Информация о конференции находится на веб-страницах:

<http://ftf.tsu.ru/node/818>

<https://vk.com/cicmcm>

До новых встреч!

Председатель Программного комитета конференции

Профессор Глазунов А.А.,

Председатель Организационного комитета конференции

К.ф.-м.н., Орлов М.Ю.

## PREFACE

16-18 November 2016 at the National Research Tomsk State University was held the annual International Youth Scientific Conference "Current issues of modern continuum mechanics and celestial mechanics". The conference was dated for to the Day of Russian rocket and artillery forces and held in Tomsk for the sixth time. The conference was attended by young scientists from Tomsk, Moscow, St. Petersburg, Simferopol, Sarov, Novosibirsk, Barnaul, N. Novogorod, Kemerovo, Kazan, Krasnoyarsk, Birobidzhan, Novokuznetsk, Irkutsk and other cities.

One of the main goals of the conference was to attract and retain in the field of science and innovations of young researchers - the future of Russian science. Plenary and parallel sessions were held for several days, and contained more than 100 reports.

The conference was held within the framework of six sections:

1. Explosion, detonation, phenomena and properties of matter at high intensive,
2. Numerical methods, algorithms, codes, and accurate solutions of the continuum mechanics,
3. Investigation of advanced materials in applications of continuum mechanics,
4. Ballistics and Celestial mechanics,
5. Mathematical and physical modeling of technical and natural systems,
6. Mathematics, physics and computer science for young researchers and students of secondary schools and lyceums.

Information about the Conference, including conference program and Proceedings, photo and video report are here:

<http://ftf.tsu.ru/node/818>

<https://vk.com/cicmcm>

Program and Organizing Committee thanked the participants for their interesting reports and looks forward to further cooperation in the educational and research programs.

Until next time!

Co-chairman Conference Program Committee

Prof. A.A. Glazunov

Chairman Conference Organizing Committee

Ph.D., M.Yu. Orlov

# ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

---

---

## PLENARY SESSION

### АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИНАМИКИ ОКОЛОЗЕМНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

**Т.В. Бордовицына**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
tvbord@sibmail.com

Обсуждаются следующие проблемы современной динамики околоземных космических объектов (ОКО): высокоточное моделирование движения объектов с учетом особенностей влияния светового давления; вероятностное описание движения и прогнозирование столкновений объектов в околоземном космическом пространстве (ОКП); исследование динамической структуры ОКП. Современным требованием к прогнозированию движения внеатмосферных ОКО является достижение субсантиметровой точности предсказания пространственных положений объекта. Численные модели движения ОКО способны, в принципе, давать такую точность.

Однако главным препятствием в большинстве случаев становится учет влияния светового давления на движение спутника. Этот возмущающий фактор способен кардинально менять орбитальную эволюцию объектов. Влияние радиационных сил сильно зависит от геометрических и физических свойств поверхности ОКО. Задача построения мгновенной модели освещенной поверхности объекта в настоящее время актуальна как для высокоточного прогнозирования движения действующих космических аппаратов сложной формы, таких как ГЛОНАСС и GPS, так и для объектов космического мусора, имеющих неизвестную, иногда весьма причудливую форму и трехосное вращение вокруг центра масс.

Второй проблемой динамики является вероятностное прогнозирование движения ОКО и предсказание возможных столкновений объектов. По своей сути все модели движения объектов, полученные по наблюдениям, являются вероятностными. Наблюдения, даже самые современные, имеют случайные ошибки. Поэтому параметры движения определяются методом наименьших квадратов, который позволяет получить не столько сами параметры, сколько вероятностный эллипсоид рассеяния в фазовом пространстве параметров, в который эти параметры попадают. Вероятность попадания истинного решения в эллипсоид рассеивания близка к единице при условии малости систематических ошибок в наблюдениях и модели движения. При таком подходе орбитальная эволюция представляет собой эволюцию областей возможного движения объекта.

Области возможных движений рассчитываются как совокупность эволюционирующих орбит многочисленных клонов исследуемого объекта, начальные параметры которых выбраны случайным образом из начального эллипсоида рассеяния. Точность представления тем выше, чем большее число клонов рассматривается. Вероятность столкновения объектов друг с другом оценивается как отношение числа столкнувшихся орбит к общему числу орбит клонов. Для получения надежной оценки нужно рассматривать орбитальную эволюцию не менее 100000 клонов.

Процесс очень трудоемкий и реализуемый только с использованием многопроцессорных вычислительных систем. Поэтому в настоящее время развиваются всевозможные быстрые методы и преобразования, ускоряющие процесс решения.

И, наконец, в последние десятилетия остро встала проблема знания динамической структуры ОКП в целом. Дело в том, что в течение 50 лет ОКП интенсивно пополняется отработавшими космическими аппаратами (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 20 000 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 (КМ), которые движутся по законам небесной механики и подчиняются тем динамическим закономерностям, которые характерны для соответствующей области ОКП. Это и делает необходимым знание динамических особенностей отдельных интенсивно используемых областей и всего ОКП. Краткий обзор результатов и перечень нерешенных вопросов по трем перечисленным выше проблемам представлен в настоящем докладе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 15-02-02868

## **ACTUAL PROBLEMS OF THE DYNAMICS OF NEAR-EARTH SPACE OBJECTS**

**T.V. Bordovicyna**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
tvbord@sibmail.com

We discuss the following issues of modern dynamics of near-Earth space objects (NEO): High-precision the motion simulation of objects taking into account features of the influence of the light pressure; Probabilistic description of the motion prediction and collision of objects in near-Earth space (NES); The study of the dynamical structure of the NES.

# **ВОЗМОЖНОСТИ ТРУДОУСТРОЙСТВА ВЫПУСКНИКОВ ВУЗОВ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОДГОТОВКИ**

**Л.Н. Мухин**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
cstv@mail.tsu.ru

Для подавляющего большинства молодых людей высшее образование это не самоцель, а инструмент для успешной трудовой деятельности, построения собственной карьеры. Поэтому задумываться о будущем трудоустройстве студент должен, начиная с первых дней первого курса. А возможностей выбора дальнейшей трудовой деятельности за годы 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. Все эти институты связывают с ТГУ многолетние научные контакты и многие десятки выпускников, работающие в различных направлениях.

Знакомство с будущим работодателем можно начать через Интернет. На сайте институтов, 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.

Наукой можно заниматься и на промышленных предприятиях, где теснее связь с производством и больше возможностей увидеть результаты своей работы «в железе». На их сайтах также есть вся информация.

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

В 2010-х гг. 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 Федеральные ядерные центры ВНИИТФ (г. Снежинск) и ВНИИЭФ (г. Саров), «Информационные спутниковые системы» (г. Железнодорожск) и многие другие.

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 область тоже может стать возможностью для занятости выпускника – математика.

Кроме собственных сайтов предприятий, в Интернете можно найти множество 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), [hh.ru](http://hh.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.

Еще одно направление поиска интересных вакансий – это социальные сети. В первую очередь, для специалистов это, конечно, LinkedIn. Эта сеть специально предназначена для встречи и профессиональных контактов специалистов. Некоторым отдаленным аналогом в России является сеть [professional.ru](http://professional.ru).

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.

## **OPPORTUNITIES OF EMPLOYMENT OF GRADUATES – PHYSICISTS AND MATHEMATICIANS**

**L.N. Mukhin**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk,  
cstv@mail.tsu.ru

Presents sources of information about vacancies and future prospects of employment of graduates. A list of companies that employ young professionals.

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ С ПОЗИЦИЙ САМООРГАНИЗАЦИИ**

**Ю.П. Михайличенко**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
mup@phys.tsu.ru

Образование упорядоченных структур, которые происходят в результате внутренней перестройки системы, не за счет внешнего воздействия, называется самоорганизацией. Самоорганизация – фундаментальное понятие, указывающее на развитие системы в направлении от менее сложных объектов к более сложным и упорядоченным формам организации. В каждом конкретном случае самоорганизация проявляется по-разному, что зависит от сложности и природы изучаемой системы. При этом с одной стороны различают равновесные формы организации, а с другой стороны в особый нелинейно-динамический класс самоорганизующихся структур объединяются практически все физические, химические и биологические структуры, которые раньше принципиально не сводились вместе.

Здесь мы ставим перед собой задачу рассмотреть ряд явлений и процессов из курсов физики, которые получают иную дополнительную трактовку как представители этого нелинейно-динамического класса. В результате такого рассмотрения возможен переход сложных по содержанию физических явлений в более простые учебные курсы.

Очень наглядна в гидродинамике демонстрация дорожки Кармана, которую мы, например, показывали ранее в курсе общей физики лишь как

иллюстрацию турбулентного течения. На опыте судить об устойчивости дорожки следует, пожалуй, не по двум парам ближайших вихрей, которые видны в обычной демонстрационной установке, а по гораздо большему числу вихрей.

В физкабинете ТГУ демонстрируются ячейки Бенара, которые образуются в слое масла, налитого в круглую металлическую кювету [1]. При нагреве этой кюветы возникает неустойчивость Релея – Тейлора когда теплые слои с меньшей плотностью находятся снизу, а сверху располагаются холодные слои с большей плотностью. В таких условиях возникает конвекция нагретой и холодной жидкостей с возникновением встречных потоков. При достижении параметров, определяемых числом Рэлея, в жидкости формируются ячейки, в центре которых нагретая жидкость поднимается вверх, а холодная жидкость по периферии опускается вниз. При правильной постановке опыта ячейки должны иметь оптимальную форму в виде шестиугольников. Если перемешать жидкость и разрушить возникшую структуру из регулярных шестиугольных ячеек, то через несколько мгновений она возникает снова по всему объему. Так демонстрируется кооперативность, как общая черта процессов самоорганизации.

В образовании ячеек Бенара определенную роль выполняют силы поверхностного натяжения [2]. Объяснение этих сил приводит нас к рассмотрению интересных вопросов об устойчивости мыльной пленки, которые в повседневной жизни обычно не возникают.

Вихри Тейлора образуются в жидкости, находящейся в зазоре между двумя вращающимися коаксиальными цилиндрами. В наиболее простом варианте достаточно вращать один внутренний цилиндр. При таких условиях возникает неустойчивое расслоение жидкости, так как частицы, находящиеся вблизи внутренней стенки, стремятся под действием центробежной силы переместиться в наружные слои. При постепенном увеличении скорости вращения, начиная с какого-то момента, в жидкости возникают правильно чередующиеся вихри в виде торов с правым и левым вращением. Условие возникновения тороидальных вихрей в этом случае выражается числом Тэйлора

Следует подчеркнуть, что рассмотренные гидродинамические явления наблюдаются и в огромных размерах в атмосфере Земли

### Литература

1. Аржаник А.Р., Михайличенко Ю.П.<sup>1</sup>, Сотиради Г. Н. Постановка демонстраций ячеек Бенара и вихрей Тейлора // Физическое образование в вузах «Серия Б». М.: Изд-во Москов. физ. общ., 2000, Т. 6, № 4. С. 60–67.
2. Саранин В.А. Равновесие жидкостей и его неустойчивость. Простая теория и доступные опыты. Ижевск: Изд-во Удм. ун-та, 1995. 173 с.

# PHYSICAL PHENOMENA FROM THE VIEWPOINT OF SELF ORGANIZATION

**Yu.P. Mikhailichenko**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
mup@phys.tsu.ru

We set ourselves the task to consider a number of phenomena and processes of physics courses that receive other additional treatment as the representatives of the non-linear dynamic class. Bénard convection is one of the most commonly studied convection phenomena because of its analytical and experimental accessibility. Taylor-Couette flow (toroidal Taylor vortices) is frequently studied because it is easy to produce in small closed systems. This phenomenon is beautiful to observe. As a result of this review, a number of complex phenomena can be explained with one position and consider phenomena in simple physics lessons.

## МОБИЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ «ВЗРЫВНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ». ИТОГИ ПЯТИЛЕТНЕЙ РАБОТЫ. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

**М.Ю. Орлов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
orloff\_m@mail.ru

Актуальность исследования поведения природных материалов при динамических нагрузках в настоящее время не вызывает сомнения. Поиск-вые научно-исследовательские работы по взрывному разрушению материалов постоянно ведутся в различных научных центрах планеты. Это обусловлено многими практическими приложениями. В НИИ прикладной математики и механики на базе отдела Механики деформируемого твердого тела организована мобильная лаборатория «Взрывное разрушение природных материалов». В настоящий момент моб. лаб. развивается как инициативный проект, основная цель которого является экспресс-анализ поведения природных материалов при взрывных нагрузках.

Мобильная лаборатория (моб.лаб.) была создана как альтернатива американской исследовательской программы SciIce, возобновленной в США несколько лет назад. Следует отметить, что объектами исследования помимо льда были природный известняк, и бетон. Около 5 лет назад под руководством автора была проведена первая экспедиция, для изучения за-

снежного ледяного покрова средней толщины. В качестве ВВ использовали эмульсионную взрывчатку Эмуласт АС-ФП (Россия). Осуществлен взрыв ВВ в воде подо льдом (UNDEX). В последующие годы изучены бесснежный ледяной покров, ледяной покров сэндвич структуры (Снег – Шуга – Лед) и ледяной покров по типу игольчатого льда. Получены диаметры взрывных майн в ледяном покрове, состояние кромки льда и морфология его разрушения. Общая масса подорванного ВВ более 200 кг в тротиловом эквиваленте. Результаты исследований доложены на международной конференции «Полярная механика».

Следующим объектом исследования был природный известняк – твердая горная порода. Проведен ряд взрывных экспериментов по подрыву известняка тремя типами ВВ, в том числе взрывной смесью. Помимо эмульсионного ВВ использовали аммонит ПЖВ-20 и гранулит ГС-5, а также взрывную смесь из данных компонентов.

Выявлены профили взрывных кратеров, их приблизительный диаметр, состояние кромки и глубина. Анализ состояния экспериментальных площадок после подрыва позволил установить тип ВВ после которого наблюдалось наибольшее количество мелких осколков (~10 см). Общая масса подорванного ВВ ~1500 кг. Результаты исследований доложены на международной конференции по Защитным Системам в Пекине.

Проведение экспериментальных исследований невозможно без нового оборудования. Автором и сотрудниками лаборатории запланирована закупка средств регистрации быстропотекающих процессов, сопутствующих взрывному нагружению. Для установления конкретного диаметра разлета осколков необходим квадрокоптер с высокоскоростной камерой. До настоящего момента полученные результаты можно рассматривать как качественные тесты.

Партнерами моб.лаб. являются МЧС РФ по ТО и ООО «КузбасСпецВзрыв».

## **MOBILE LABORATORY «EXPLOSIVE DESTRUCTION OF NATURAL MATERIALS». RESULTS OF THE FIVE-YEAR STUDIES. DEVELOPMENT PROSPECTS**

**M.Yu. Orlov**

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

The mobile laboratory "Explosive Loading of Natural Materials" is created. The river ice granite and limestone were objects of research. As explosive the Russian standard explosive was used. Diameters and depths of explosive craters

and Main are received. Mob. Lab. needs the new equipment, including high speed cameras and quadcopters.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ТЕЛ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ФОРМЫ**

**Е.А. Маслов**

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Российская Федерация, Томск  
maslov\_eugene@mail.ru

Ракетно-прямоточные двигатели (РПД) сочетают достоинства твердотопливных и воздушно-реактивных двигателей. В процессе работы РПД изменяются геометрические характеристики проточного тракта вследствие выгорания твердотопливного заряда. Одним из основных факторов, влияющих на внутрибаллистические характеристики РПД, является закон скорости горения твердого топлива в потоке воздуха.

В связи с этим важным этапом при разработке РПД является определение полей температуры, давления и скорости обдувающего потока в проточном тракте двигателя. Математическое моделирование динамики и теплообмена в тракте РПД позволяет получить информацию о структуре потока, о распределении газодинамических параметров по длине канала с учетом изменения его геометрических характеристик вследствие выгорания твердого топлива. Оценка адекватности используемых математических моделей базируется на результатах сравнительного анализа численных и экспериментальных данных, полученных на моделях РПД.

## **EXPERIMENTAL STUDY OF A SUPERSONIC FLOW OF BODIES AXISYMMETRIC SHAPE**

**E.A. Maslov**

National Research Tomsk Polytechnic University  
Russian Federation, Tomsk  
maslov\_eugene@mail.ru

Rocket ramjet engine (RAP) combines the advantages of solid-fuel, and jet engines. In the process of RAP vary the geometric characteristics of the flow path due to the burnout of the solid charge. One of the main factors affecting the internal ballistics characteristics of the RAP, is the law of the speed of solid fuel combustion in a stream of air. In this regard, an important step in the development of the RAP is to determine the fields of temperature, pressure and purge

flow rate in the flow path of the engine. Mathematical modeling of dynamics and heat transfer in the path of the RAP provides information on the flow pattern of the distribution of the gas-dynamic parameters along the channel, adjusting its geometric characteristics as a result of burning solid fuel. Evaluation of adequacy of mathematical models based on the results of the comparative analysis of numerical and experimental data obtained in the RPD model.

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**

**ИМПУЛЬСНЫЙ НАГРЕВ СРЕДЫ АНСАМБЛЯМИ ПОЛЫХ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРОВОДНИКОВ, ИНДУКЦИОННО  
НАГРЕВАЕМЫХ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ СОЛЕНОИДА**

**С.В. Синяев, С.И. Володченков**

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский  
институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ);  
Российская Федерация, г. Саров  
serg\_vol666@mail.ru

Представлены результаты математического моделирования процесса нагрева теплопроводной среды ансамблями тонкостенных полых цилиндрических проводников, которые нагреваются вихревыми токами в переменном магнитном поле соленоида. При постановке задачи использованы точные аналитические решения задач сопряженного теплообмена проводников со средой и генерации токов в проводниках при электрическом разряде конденсаторной батареи через соленоид. Анализируется влияние различных параметров проводников, их количества и расположения в соленоиде на эффективность и время нагрева примыкающих к ним слоев среды применительно к задаче многоочагового зажигания метательных зарядов.

**PULSED HEATING of a MEDIUM by ENSEMBLES OF THE HOLLOW  
CYLINDRICAL CONDUCTORS INDUCTIVELY HEATED  
IN MAGNETIC FIELD OF A SOLENOID**

**S.V. Sinyaev, S.I. Volodchenkov**

Russian Federal Nuclear Center – Institute of Experimental Physics  
Russian Federation, Sarov  
serg\_vol666@mail.ru

The results of mathematical modeling of induction heating of heat-conducting medium by ensembles of the hollow thin-walled cylindrical conductors heated by Foucault currents in variable magnetic field of solenoid are pre-

sented. Exact analytical solutions of problems of conjugate heat transfer from conductors to medium and electric current generation in the conductors during capacitor bank discharge through solenoid were used for target setting. Effect of different conductors' parameters, their number and position inside the solenoid on efficiency and heating time of adjacent medium layers is analyzed for multi-point throwing charge ignition problem.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ ЗАРЯДОВ ВВ МАЛОГО ДИАМЕТРА**

**О.А. Зимоглядова, Л.А. Мержиевский**

Новосибирский государственный технический университет  
Российская Федерация, г. Новосибирск  
zimogldv@rambler.ru

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 диаметров и длин, в которых эти гипотезы могут нарушаться. В данной работе численно моделируется процесс детонации малых цилиндрических зарядов малого диаметра и различной длины из взрывчатого вещества Comp В. Для моделирования используется пакет ANSYS AUTODYN 17.0. Анализируется процесс выхода детонационной волны на стационарный режим, формирование устойчивой кривизны фронта детонации, определяется критический диаметр зарядов.

## **DETONATION MODELING OF SMALL SIZE CHARGE**

**O.A. Zimoglyadova, L.A. Merzhievsky**

Novosibirsk State Technical University  
Russian Federation, Novosibirsk,  
zimogldv@rambler.ru

In this paper is investigated the dynamics of the output of the detonation process on steady state which is characterized by a constant velocity of the detonation and a constant curvature of the detonation front. The critical diameter of the charge is determined. For modeling package ANSYS AUTODYN 17.0. is used.

## **СЕНСИБИЛИЗАЦИЯ ПРЕССОВАННЫХ ТАБЛЕТОК PETN НАНОЧАСТИЦАМИ МЕТАЛЛОВ**

**Г.Э. Иващенко, К.А. Радченко, Е.В. Галкина**

Кемеровский государственный университет  
Российская Федерация, г. Кемерово  
kriger@kemsu.ru

С высоким временным разрешением исследованы процессы взрывного разложения прессованных таблеток PETN-наночастицы алюминия и никеля при иницировании основной гармоникой неодимового лазера длительностью 14 нс. Исследованы кинетические закономерности допороговых и взрывных режимов разложения образцов, определены эффективные константы наблюдаемого свечения. Сформулированы и исследованы механизмы рассматриваемых процессов, основанные на модели теплового взрыва в микроочаговом варианте. Показано согласие теоретических и экспериментальных результатов. Показано, что критическая температура очага зависит как от длительности импульса, так и от радиуса наночастицы. Получены аналитические выражения для зависимостей критических параметров иницирования реакции от радиуса и теплоемкости металлических наночастиц, критической температуры очага от длительности импульса. Обнаружен инвариант, связывающий критическую плотность энергии и характерное время развития реакции.

## **SENSITIZATION OF PETN PRESSED PELLETS OF NANOPARTICLES OF METALS**

**G.J. Ivashenko, K.A. Radchenko, E.V. Galkina**

Kemerovo State University  
Russian Federation, Kemerovo  
kriger@kemsu.ru

The explosive decomposition of PETN-aluminum and nickel nanoparticles pressed pellets initiated with the irradiation of 1st harmonics of the neodymium laser, pulse duration 14 ns, was studied experimentally with high temporal resolution. The glow kinetics in the explosion and under-threshold modes was researched into, the effective constants of the glow increasing were determined. The mechanisms of the processes observed based on the thermal hot-spot model of laser initiation were suggested and analyzed. The simulation and experimental results agree well with each other.

## **СОВРЕМЕННЫЙ ВАРИАНТ МОДЕЛИ ТЕПЛООВОГО ВЗРЫВА В МИКРООЧАГОВОМ ВАРИАНТЕ**

**Н.В. Газенаур, М.В. Ананьева, Е.В. Галкина**

Кемеровский государственный университет  
Российская Федерация, г. Кемерово,  
kriger@kemsu.ru

В работе рассматриваются основные пути модернизации микроочаговой модели теплового взрыва при нагревании наночастиц в матрице взрывчатого вещества лазерным импульсом. Учитываются: поглощение энергии излучения наночастицей в рамках теории Ми (индивидуальные оптические свойства) и теории переноса излучения (коллективные оптические свойства композита), теплоперенос в системе наночастица – матрица взрывчатого вещества, плавление материалов наночастицы и матрицы, экзотермическое разложение взрывчатого вещества. Учет зависимости оптических свойств наночастиц от радиуса позволило предсказать экстремальную зависимость порога инициирования от радиуса наночастицы, экспериментально обнаруженную в последнее время. Включение в модель эффектов многократного рассеяния света позволяет улучшить согласие теории и эксперимента при сравнении порогов инициирования излучением с различной длиной волны. Учет температурной зависимости оптических свойств наночастиц проявляется в увеличении сечения поглощения и уменьшении коэффициента освещенности в образце с ростом температуры. При учете плавления происходит увеличение рассчитанного значения критической плотности энергии инициирования. В случае большого радиуса наночастиц появляется необычный режим развития процесса: формирование очага реакции происходит до полного расплавления наночастицы, что может приводить к наличию участка его затвердевания до перехода к взрывному режиму.

## **THE MODERN VERSION OF THE MODEL OF THERMAL EXPLOSION IN A HOT-SPOT OPTION**

**N.V. Gazenaur, M.V. Anan'eva, E.V. Galkina**

Kemerovo State University  
Russian Federation, Kemerovo,  
kriger@kemsu.ru

The main ways of the thermal explosion hot-spot model modernization in the conditions of nanoparticles' laser heating in the explosive's volume are discussed. The energy absorption by individual nanoparticles in terms of Mie theory and radiative transport theory (collective optical properties of the composite), heat transport in the system nanoparticle – explosive's matrix, nanoparticles' and explosive's melting and explosive's exothermal decomposition are

taken into account. The nanoparticles' optic properties in the dependence on their radius consideration allowed us to predict the extremal dependence of the radius on the critical energy density of the laser pulse that was discovered experimentally recently. The introduction of the multiple light-scattering effects gives better agreement of the theoretical and experimental values of the explosion initiation threshold at different laser wavelength. The melting leads to the augmentation of the calculated critical energy density of laser initiation.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ КРИТЕРИИ РЕАЛИЗАЦИИ ЦЕПНОГО И ТЕПЛООВОГО ВЗРЫВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

**Н.В. Газенаур, М.В. Ананьева, А.А. Звекон**

Кемеровский государственный университет  
Российская Федерация, г. Кемерово  
kriger@kemsu.ru

В работе проведено сравнительное экспериментальное и теоретическое исследование процессов инициирования монокристаллов азида серебра (АС) и прессованных таблеток тетранитрата пентаэритрит (тэн) – наночастицы металлов импульсом неодимового лазера. Основные отличия взрывного разложения образцов связаны с отсутствием индукционного периода и наличием допороговых эффектов инициирования композитов на основе тэна. При инициировании монокристаллов АС, наоборот, всегда наблюдается индукционный период и отсутствуют допороговые эффекты.

Показано, что наблюдаемые экспериментальные различия закономерностей взрывного разложения связаны с тем, что в монокристаллах АС реализуется механизм цепного, а прессованных образцах тэн – наночастицы металлов – теплового взрыва в микроочаговом варианте. Проведенные в рамках существующих модельных представлений расчеты кинетики инициирования реакции согласуются с экспериментом.

Сформулированы экспериментальные критерии, позволяющие различить проявления механизмов цепного и теплового (в микроочаговом варианте) инициирования взрыва в условиях импульсного лазерного воздействия, согласно которым отсутствие индукционного периода и выраженное проявление допороговых эффектов является следствием развития теплового взрыва, а наличие индукционного периода и отсутствие допороговых эффектов – цепного взрыва.

## **EXPERIMENTAL PERFORMANCE CRITERIA OF CHAIN AND THERMAL EXPLOSION OF ENERGETIC MATERIALS BY PULSED LASER RADIATION**

**N.V. Gazenaur, M.V. Anan'eva, A.A. Zvekov**

Kemerovo State University  
Russian Federation, Kemerovo,  
kriger@kemsu.ru

The comparative experimental and theoretical study of the silver azide (SA) single crystals and pentaerythritol tetranitrate (petn) pressed pellets initiated with neodymium laser pulse was carried out. The experimental criterions allowing one to discern the appearance of thermal hot-spot and chain branching mechanisms were suggested. According to them, the absence of the time delay and apparent under-threshold effects are typical for thermal explosion, while the significant time delay and the absence of the under-threshold effects are key features of the chain branching explosion.

## **РЕЗОНАНСНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ ПАЛЛАДИЯ В ПРОЗРАЧНЫХ МАТРИЦАХ С РАЗЛИЧНЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ПРЕЛОМЛЕНИЯ**

**Н.В. Газенаур, М.В. Ананьева, Е.В. Галкина**

Кемеровский государственный университет  
Российская Федерация, г. Кемерово  
kriger@kemsu.ru

В работе рассчитаны спектральные закономерности коэффициента эффективности поглощения наночастиц палладия различного радиуса в прозрачных матрицах с показателями преломления 1, 1.5, 2 и 2.5. Показано, что плазмонный резонанс в наночастицах палладия в видимой части спектра возможен в двух последних матрицах. При этом максимальное значение коэффициента эффективности поглощения в матрице с показателем преломления 2 составляет 2.9224 для радиуса наночастицы 20.3 нм и длины волны 430 нм.

Результаты необходимы для оптимизации эффективности фотокатализа дожигания выхлопных газов и создания оптического детонатора.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (16-32-00286мол\_a).

# RESONANT ABSORPTION OF PALLADIUM NANOPARTICLES IN TRANSPARENT MATRICES WITH DIFFERENT REFRACTIVE INDICES

**N.V. Gazenaur, M.V. Anan'eva, E.V. Galkina**

Kemerovo State University  
Russian Federation, Kemerovo  
kriger@kemsu.ru

In this work the spectral dependence of the absorption efficiency coefficient of palladium nanoparticles with different radii in transparent matrices with refractive indices of 1, 1.5, 2 and 2.5 was calculated. It is shown that the plasmon resonance in palladium nanoparticles in the visible part of the spectrum possible in the last two matrices. The maximum value of the absorption efficiency coefficient in the matrix with a refractive index of 2 is 2.9224 for the radius of the nanoparticle 20.3 nm and the wavelength of 430 nm. For optimize the efficiency of photocatalysis afterburning of exhaust gases and the creation of optical detonator these results are necessary. The work is executed at support of RFBR (16-32-00286mol\_a).

## ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА

**А.П. Никитин**

Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты СО РАН  
Российская Федерация, г. Кемерово  
palich-xumuk@yandex.ru

Целью настоящей работы является расчет температурных зависимостей коэффициентов эффективности поглощения и рассеяния света наночастиц золота в матрицах бромида калия при варьировании радиуса и длины волны. Температурные зависимости показателей преломления наночастицы и матрицы выбирались в виде набора Лоренцевских осцилляторов, к которым добавлялось слагаемое, описывающее взаимодействие света с газом свободных электронов металла. Рассчитаны спектральные зависимости коэффициентов эффективности поглощения и рассеяния электромагнитного излучения наночастицами золота с радиусами от 10 до 150 нм при температурах 300–1000 К. Повышение температуры во всех случаях приводит к понижению коэффициента эффективности рассеяния света наночастицами золота. В случае малых наночастиц коэффициент эффективности поглощения в области плазмонной полосы поглощения уменьшается с ростом температуры. В остальных случаях рост температуры приводит к увеличению коэффициента эффективности поглощения. Проанализировано влия-

ние изменения показателя преломления матрицы на температурные зависимости коэффициентов эффективности поглощения и рассеяния света наночастицами золота. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментом.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (16-32-00286мол\_а), гранта президента РФ (МК-4331.2015.2) и Министерства образования и науки РФ (НИР № 3603 по заданию №64/2014).

## **THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE OPTICAL PROPERTIES OF GOLD NANOPARTICLES**

**A.P. Nikitin**

Federal Research Centre Coal and Coal Chemistry of SB RAS  
Russian Federation, Kemerovo  
palich-xumuk@yandex.ru

The target of the present work is to calculate the temperature dependencies of gold nanoparticles' in potassium bromide matrix scattering and absorption efficiencies with variation of wavelength and nanoparticles' radius. The spectral dependencies of absorption and scattering efficiencies of electromagnetic radiation by gold nanoparticles with radii from 10 to 150 nm in the temperature range 300–1000 K were calculated. It was elucidated that temperature increasing makes the scattering efficiency of gold nanoparticles decrease. This effect was observed in the entire range of radii and wavelengths studied. The absorption efficiency decreases as temperature rises for small particles in the area of plasmon resonance absorption. In other conditions the temperature augmentation causes the absorption efficiency increasing. The maximal relative increasing of the gold nanoparticles' absorption efficiency is observed in the infrared region where the albedo of single scattering is close to unity.

## **КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МИКРООЧАГОВОЙ МОДЕЛИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДЛИТЕЛЬНОСТЯХ ИМПУЛЬСА**

**А.П. Никитин**

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН  
Российская Федерация, г. Кемерово  
palich-xumuk@yandex.ru

В рамках микроочаговой модели проведены расчеты критерия инициирования составов азид свинца – свинец и PENTN-наночастицы кобальта при варьировании длительности импульса. В рамках модернизированной микроочаговой модели показано, что учет эффективности поглощения приводит к изменению критерия инициирования взрывного разложения при ма-

лых длительностях импульса. Им, в соответствии с экспериментом, становится плотность энергии импульса. При длительностях импульса менее 50 нс радиус наиболее прогретой наночастицы свинца изменяется менее чем на 15% и составляет 63 нм в пределе коротких длительностей импульса. В случае наночастиц кобальта в матрице PETN радиус наиболее прогретой наночастицы при  $t_i \rightarrow 0$  равен 85 нм (на основной гармонике неодимового лазера), что незначительно меньше радиуса наночастицы, поглощающей лазерное излучение используемой длины волны (1064 нм) с наибольшей эффективностью. Следовательно, в пределе малых длительностей импульса очаг взрывного разложения образуется на наночастицах с достаточно большим радиусом, а не стремящимися к 0. Сделан вывод, что учет зависимости коэффициента эффективности поглощения от радиуса наночастицы является достаточным для разрешения «парадокса малых частиц».

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 14-03-00534 А), гранта президента РФ (МК-4331.2015.2) и Министерства образования и науки РФ (НИР № 3603 по заданию №2014/64).

## **THE CRITICAL PARAMETERS OF THE HOT-SPOT MODEL AT VARIOUS DURATIONS OF THE PULSE**

**A.P. Nikitin**

SB RAS Kemerovo Science Center  
Russian Federation, Kemerovo  
palich-xumuk@yandex.ru

In terms of the micro hot-spot model the criterion of initiation compositions lead azide – lead nanoparticles and pentaerythritol tetranitrate (PETN) – cobalt nanoparticles were calculated. It was shown that the incorporation of the absorption efficiency coefficient dependence on the nanoparticles' radius changes the initiation criterion in the limit of the short pulse durations. This criterion becomes the critical energy density matching the experimental results. At the pulse durations less than 50 ns the radius of the optimally heated lead nanoparticles is varied in less than 15% and achieves 63 nm in the limit of the short pulse durations. In the case of cobalt nanoparticles in PETN the radius of the optimally heated nanoparticle in the limit  $t_i \rightarrow 0$  is 85 nm (on the main wavelength of the neodymium laser) which is slightly less than the radius of the nanoparticle most effectively absorbing the laser irradiation of the same wavelength. Therefore, in the limit of low pulse durations hearth explosive decomposition is formed by nanoparticles with a sufficiently large radius, while not tending to 0. It is concluded that consideration of dependency of the absorption efficiency coefficient of the radius of nanoparticles is sufficient to eliminate the "paradox of small particles". The work is executed at support of RFBR (№ 14-03-00534 А), grant of

President of RF (МК-4331.2015.2) and the Ministry of education and science of Russian Federation (research project No. 3603 task No. 2014/64).

## **МИКРООЧАГОВАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО ВЗРЫВА С УЧЕТОМ МНОГОКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА**

**А.П. Никитин**

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН  
Российская Федерация, г. Кемерово  
palich-xumuk@yandex.ru

Одним из эффектов, оказывающих влияние на процесс лазерного инициирования, является световой режим в объеме взрывчатого вещества, вызванный многократным рассеянием света. Цель работы: расчет коэффициентов освещенности и критической плотности энергии инициирования взрывного разложения компаундов PETN-наночастицы алюминия при учете процессов многократного рассеяния света. Расчеты проведены при двух значениях длины волны 1064 и 532 нм, соответствующих первой и второй гармоникам неодимового лазера. Радиусы наночастиц варьировались в диапазоне 20–200 нм. Показано, что минимум на зависимости плотности энергии инициирования взрывного разложения от массовой доли наночастиц может определяться оптимальной освещенностью в образце. Учет многократного рассеяния позволяет улучшить согласие теоретических оценок и результатов эксперимента и необходим при сравнении условий инициирования компаундов на основе прозрачных взрывчатых веществ с наночастицами металлов излучением различной длины волны.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (16-32-00286мол\_а) и Министерства образования и науки РФ (НИР № 3603 по заданию №64/2014).

## **THE HOT-SPOT MODEL OF THERMAL EXPLOSION WITH ACCOUNT FOR MULTIPLE LIGHT SCATTERING**

**A.P. Nikitin**

SB RAS Kemerovo Science Center  
Russian Federation, Kemerovo  
palich-xumuk@yandex.ru

One of the effects influencing the laser initiation is the irradiation mode in the explosive's volume that formed by multiple scattering. The aim of the present work is to calculate the optic properties including the radiance increasing factor and critical energy densities of PETN-aluminum nanoparticles explosion initiation considering the multiple scattering influence. The calculations were performed at the wavelength 1064 and 532 nm matching the first and second

harmonics of the neodymium laser. The nanoparticles' radii were varied in the range 20–200 nm. The multiple scattering consideration allows one to improve the agreement between theory and the experiment. The effect is essential when one compares the critical laser initiation conditions of transparent explosives containing metal nanoparticles at different wavelength.

## **МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ ГАДФИЛЬДА ПОСЛЕ НИЗКОСКОРОСТНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ И ОБРАБОТКОЙ ВЗРЫВОМ**

**А.В. Гуськов, А.С. Долматов, К.Е. Милевский, Ю.П. Яковлева**

Новосибирский государственный технический университет  
Российская Федерация, г. Новосибирск  
al.dolmatow88@yandex.ru

В статье проводится анализ изменения механических свойств стали Гадфильда после различных способов обработки. Методы обработки классифицированы на высокоскоростные и низкоскоростные (до и выше скорости звука). Изучены механические свойства стали после низкоскоростных обработок, таких как термомеханическая, ковка, накатка. Исследованы механические свойства высокоскоростной обработки после ударно-волнового нагружения (упрочнение взрывом).

## **MECHANICAL PROPERTIES OF HADFIELD STEEL AFTER LOW SPEED METHOD FOR PROCESSING AND HANDLING EXPLOSION PRESSURE**

**A.V. Gusikov, A.S. Dolmatov, K.E. Milevskiy, Yu.P. Yakovleva**

Novosibirsk State Technical University  
Russian Federation, Novosibirsk  
al.dolmatow88@yandex.ru

The article analysis of changes in the mechanical properties of Hadfield steel after the various processing methods. Processing methods classified on high-speed and low-speed (up to and above the speed of sound). The mechanical properties of the low-speed steel after treatments, such as thermo-mechanical forging, knurling. The mechanical properties of high-speed processing after shock-wave loading (hardening of the explosion).

## **УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПОДРЫВА ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ЭМУЛЬСИОННЫМ ВВ**

**М.Ю. Орлов, Б.С. Гусев**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
orloff\_m@mail.ru

В настоящее время актуальным является исследование поведения природных, технологических и конструкционных материалов при взрывном нагружении. Практическая значимость объясняется необходимостью создания новых средств защиты и поражения. Анализ научно-технической литературы указывает на то, что поисковые научно-исследовательские работы постоянно ведутся в ведущих мировых научных центрах, в том числе в нашей стране.

В Томском государственном университете на базе лаборатории 21 НИИ прикладной математики и механики организована мобильная лаборатория «Взрывное разрушение природных материалов». В настоящий момент лаборатория имеет статус инициативного проекта. Лаборатория организована три года назад и развивается как аналог американской исследовательской программы “SciIceExe”. При этом отечественный аналог не ограничивается только льдом как объектом исследования. В последнее время были изучены известняк и крупногабаритные тела вращения (масса более 200 кг). Партнерами лаборатории являются МЧС РФ по Томской Области и ООО «КузбасСпецВзрыв».

Основные возможности моб. лаб. – это экспресс-анализ поведения объектом исследования при взрывном нагружении, в том числе диаметр взрывных майн, состояние кромки кратеров взрыва, диаметр и высота разлета осколков, морфология разрушения (размеры и форма осколков). Результаты исследований можно использовать как качественные тесты при апробации разрабатываемых средств математического моделирования.

В настоящей работе разработано удерживающее устройство для подрыва речного льда средней толщины эмульсионным зарядом ВВ. Устройство позволяет располагать заряд перпендикулярно ледяному покрову на глубину до 50 см. В качестве заряда можно использовать штатное ВВ (Эмуласт Ас-ФП-90) массой 4, 6 кг соответственно. Возможный диаметр скважины от 11 до 16 см.

## **AN APPARATUS FOR BLASTING ICE EMULSION EXPLOSIVES**

**M.Yu. Orlov, B.S. Gusev**

National Research Tomsk State University

Russian Federation, Tomsk

orloff\_m@mail.ru

An apparatus for blasting ice by emulsion explosives have been developed. The device allows located explosives perpendicular to the ice cover. Explosive depth can reach 50.

## **НЕСТАЦИОНАРНЫЕ РЕЖИМЫ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ В ЗАМКНУТОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО ОБОГРЕВАЕМОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПОЛОСТИ**

**С.А. Михайленко, М.А. Шеремет**

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Российская Федерация, г. Томск

stepanmihaylenko@gmail.com

Целью настоящей работы является анализ влияния вращения на режимы смешанной конвекции в замкнутой квадратной области с изотермическими противоположными стенками. Изучение влияния вращения на конвективное движение дополняется исследованием временной зависимости числа Нуссельта на изотермических стенках при различных значениях внешних параметров. Сформулирована вычислительная модель решаемой задачи. Было получено достаточно хорошее сравнение распределений температуры и изолиний функции тока с экспериментальными и численными данными других авторов. Проведен численный анализ при следующих значениях безразмерных комплексов, характеризующих режимы конвективного теплопереноса:  $Ra = 120000$ ;  $Pr = 0.7$ ;  $Ta = 101023$ . Были получены изолинии функции тока и изотермы при углах поворота  $\alpha = 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315^\circ$ . В результате моделирования конвективного теплопереноса в полости была исследована интенсивность теплообмена на изотермических стенках. Так же было установлено, что вращение рассматриваемой полости системы приводит к периодическому изменению среднего числа Нуссельта при числе оборотов  $> 4$ .

# MIXED CONVECTION IN A DIFFERENTIALLY HEATED ROTATING ENCLOSURE

**S.A. Mikhaylenko, M.A. Sheremet**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
stepanmihaylenko@gmail.com

Convective heat transfer in rotating cavities is a wide-spread process in various engineering applications. The objective of the present work is a numerical analysis of fluid flow and heat transfer within rotating cavity having isothermal opposite walls. The formulated governing equations with corresponding initial and boundary conditions have been solved by finite difference method.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ ЛЬДА.

### ЧАСТЬ 3. ВЗРЫВ ЭМУЛЬСИОННЫХ ЗАРЯДОВ ВВ (>10 кг ТНТ)

**Ю.Н. Орлова**

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Российская Федерация, г. Томск  
orlovaun@mail.ru

В настоящее время исследование поведения льда при взрывных нагрузках является актуальной и сложной научно-технической задачей. Актуальность обусловлена многочисленными практическими приложениями, а сложность тем, что выбранный объект исследования является малоизученным природным материалом. Отклик льда на взрывные нагрузки не всегда может быть однозначным и требует подробного рассмотрения. Текущие исследования являются развитием кандидатской авторской диссертации «Комплексное теоретико-экспериментальное исследование процессов взрывного нагружения льда». Под развитием следует понимать получение новых экспериментальных данных для разрабатываемой реляционной базы данных. Постановка эксперимента, место проведение эксперимента и тип ВВ не меняются более 5 лет. В англоязычной литературе аналогичные эксперименты называются UNDEX.

В настоящей работе проведены полномасштабные эксперименты по подрыву речного льда средней толщины эмульсионным зарядом ВВ. В качестве ВВ использовалось эмульсионное штатное ВВ Эмуласт АС-ФП-90 (Россия). Конструкция ВВ состояла из трех зарядов, расположенных параллельно ледяному покрову (тротиловый эквивалент –10 кг). Специального удерживающего устройства не было.

Научная ценность работы заключается в сравнение результатов экспериментов подрыва игольчатого льда и льда сэндвич структуры (Снег – Шуга – Лед). Предметом сравнения являлся диаметр взрывной майны в ледяном покрове (в обоих случаях форма взрывной майны близка к окружности), кромка льда (ступенчатая или гладкая) и морфология разрушения льда (форма осколков льда).

Результаты получены в форме таблицы и видеоматериалов. Работа проведена средствами моб. лаб. «Взрывное разрушение природных материалов» при поддержке МЧС РФ по Томской Области и ООО «КузбасСпецВзрыв».

### **INVESTIGATION OF EXPLOSIVE LOADING OF ICE. PART 3. THE BLAST UP OF 10 kg OF TNT**

**Yu.N. Orlova**

National Research Tomsk Polytechnic University  
Russian Federation, Tomsk  
orlovaun@mail.ru

The results of systematic studies of explosive loading of ice were presented. The results blasting needle ice and ice sandwich structure were compared. HE weight was 10 kg of TNT. The subjects of comparison were the diameter of the lane in ice cover, ice edge and fracture morphology of both types of ice.

**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**

**ИНТЕГРО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ**  
**КОЛЕБАНИЙ УПРУГОГО СТЕРЖНЯ: РАЗРЕШИМОСТЬ**  
**НАЧАЛЬНО-КРАЕВЫХ ЗАДАЧ И ИХ ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ**

**С.С. Орлов**

Иркутский государственный университет  
Российская федерация, г. Иркутск  
orlov\_sergey@inbox.ru

Предполагаемый доклад посвящен результатам исследования вопроса однозначной разрешимости начально-краевых задач для линейного уравнения Буссинеска–Лява в интегро-дифференциальной форме, моделирующего продольные колебания упругого стержня с учетом инерции и массовой нагрузки. Рассматриваются два краевых режима: жесткое закрепление концов стержня и их свободное (незакрепленное) состояние. Изучаемый объект является уравнением соболевского типа, т.е. имеет при старшей производной по времени линейный дифференциальный оператор по пространственной переменной, необратимый при определенных значениях входящих в него параметров. Условия разрешимости начально-краевых задач для таких уравнений не укладываются в утверждения классических теорем, в связи с чем возникает необходимость разработки теории, позволяющей доказывать существование и единственность решений, и эффективных методов их построения. Предлагается редукция рассматриваемых задач к начальной задаче для интегро-дифференциального уравнения специального вида в банаховых пространствах. Последняя изучается методами теории фундаментальных оператор-функций вырожденных интегро-дифференциальных операторов, которая позволяет доказывать существование и единственность решений начальной задачи в классах распределений с ограниченным слева носителем и функций сильной гладкости, а также строить эти решения в явном виде. Условия однозначной разрешимости исходных начально-краевых задач и их точные решения вытекают как следствия из общих теорем.

# INTEGRO-DIFFERENTIAL EQUATION OF LONGITUDINAL OSCILLATIONS OF AN ELASTIC ROD: THE SOLVABILITY OF INITIAL BOUNDARY VALUE PROBLEMS AND THEIR EXACT SOLUTIONS

**S.S. Orlov**

Irkutsk State University  
Russian Federation, Irkutsk  
orlov\_sergey@inbox.ru

Expected report is devoted to the study of the unique solvability of initial boundary value problems for linear Boussinesq–Love equation in integro-differential form. This equation describes the longitudinal oscillations of an elastic rod taking into account of the inertia and mass load. We consider two boundary regimes: rigid fixation rod ends and their free (unfixed) state. Object of learning is an equation of Sobolev type, i. e. it has in the main part an irreversible linear differential operator in spatial variable. The classical theorems of the solvability of initial boundary value problems are inapplicable in this case. Thus, there is a need to the theorems of existence and uniqueness of solutions, and also effective methods for their construction. We offer a reduction of these problems to the initial problem for integro-differential equations of a special kind in Banach spaces. The abstract initial problem is studied by the methods of the theory of fundamental operator-functions of singular integro-differential operators. The unique solvability of the initial value problem in classes of distributions with left-bounded support and functions of strong smoothness is proved; explicit formulas of solutions are obtained. As a consequence of these statements the similar theorems for the original initial boundary value problems are formulated.

## МОНОТОННЫЙ МЕТОД ЧАСТИЦ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ДВУМЕРНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ С УЧЁТОМ УПРУГОПЛАСТИКИ И ГОРЕНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

**Ю.В. Янилкин, В.А. Шмелёв**

РФЯЦ ВНИИ экспериментальной Физики  
Российская Федерация, г. Саров  
Vovy-13@yandex.ru

Проблема корректного расчёта движения многокомпонентной среды является наиболее серьёзной для лагранжево-эйлеровых методик. Одним из способов решения данной проблемы является использование метода частиц. Достоинства этого метода связаны с лагранжевым представлением частиц и возможностью хранения информации о среде в них, что позволяет минимизировать погрешности эйлеровых методов, связанные с решени-

ем уравнения адвекции. Основным недостатком метода частиц является сильная немонотонность решения, связанная с дискретным переносом величин, отнесённых к частицам, из ячейки в ячейку. Процессы горения (в том числе и детонация) взрывчатых веществ и упругопластика представляют собой важные с практической точки зрения явления, требующие точного описания при численном моделировании ударноволновых течений, особенно при использовании неподвижных счётных сеток. В настоящей работе предлагается монотонный метод частиц, в котором решены проблемы, связанные с немонотонностью классических методов частиц. Реализация метода ММЧ осуществлена в рамках кода ЭГАК. Монотонность рассматриваемого метода частиц обеспечивается путём дробления частиц таким образом, чтобы вытекающий из ячейки объём соответствовал объёму, получающемуся при вычислении сеточным методом. Также приводится дальнейшее развитие монотонного метода частиц для расчёта задач с использованием кинетики горения взрывчатых веществ по модели Морозова и соавторов (МК) и учётом упругопластических свойств материалов.

Проведён ряд тестовых расчётов, результаты которых свидетельствуют о том, что монотонный метод частиц может успешно применяться для решения описанных выше классов задач.

## **MONOTONOUS PARTICLE METHOD FOR SOLVING 2D GAS-DYNAMIC PROBLEMS WITH ELASTICITY AND DETONATION OF EXPLOSIVE MATERIALS**

**Yu.V. Yanilkin, V.A. Shmelev**

The Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research  
Institute of Experimental Physics  
Russian federation, Sarov  
Vovy-13@yandex.ru

The problem of correct solving the movement of the multi-component matter is the most serious for the Lagrangian-Eulerian methods. One way of solving this problem is the use of particle method. The advantages of this method are associated with the Lagrangian representation of the particle and the ability to store information about the matter in them, which minimizes the errors of the Euler methods associated with the solution of the advection equation. The main disadvantage of particles is the strong unmonotonicity of results associated with discrete transfer quantities related to the particles from cell to cell. In this paper we propose a monotonous particle method, which solved the problems associated with unmonotonicity classical methods of particles.

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В МЕЖЛОПАТОЧНОМ НЕПОДВИЖНОМ КАНАЛЕ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА ЖРД

**Д.А. Жуйков, М.И. Толстопятов, К.Е. Буц**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Сибирский государственный аэрокосмический университет  
им. академика М.Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, г. Красноярск  
buts88@mail.ru

Разработка современных энергетически эффективных и высоконадежных летательных аппаратов нового поколения для ракетно-космической отрасли является важной научно-технической задачей.

Турбонасосные агрегаты (ТНА) современных жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) летательного аппарата являются важными высоконагруженными энергетическими узлами, основной задачей которых является стабильная подача компонентов топлива в камеру сгорания на всех режимах работы двигателя. В связи с требованиями к надежности, энергетической эффективности и ресурсу работы ЖРД становится актуальной задача расчета, проектирования и глубокой оптимизации ТНА. Корректный расчет и оптимизация агрегата возможен при наличии математических моделей всех элементов агрегата, позволяющих определить поле скоростей, давление и температуру в проточных трактах насосов и турбин ТНА.

Численная модель течения в рабочем колесе насоса состоит из решения задачи течения в ядре потока и решения течения в пограничном слое, в котором будут найдены напряжения трения, которые в свою очередь учитываются при решении течения в ядре потока по определению скоростей и давления вязкой жидкости. Определение поля скоростей в потоке основано на струйной теории лопаточных машин [1], в результате чего определяются значения всех скоростей в каждой точке координатной сетки. Основные уравнения численной модели представлены в [2,3]. Продольные напряжения трения определяются как для плоской пластины по степенному закону  $1/7$  [4].

На основе этой численной модели был разработан программный модуль «ASTROPET:InterstageChannel» для автоматизированной системы гидродинамического расчета [5].

Таким образом, рассмотренная численная модель течения жидкости в межлопаточном канале центробежного насоса и разработанная на ее основе методика расчета параметров потока позволяет определить гидравлические потери на трение и корректно установить поле скоростей и давления по радиусу диска, а, следовательно, определить действительный напор рабочего колеса центробежного насоса. Применяемый программный модуль

целесообразно использовать для автоматизации расчетных работ при проектировании турбонасосных агрегатов. По сравнению с другими численными методиками универсальный принцип построения программного модуля дает возможность использовать его также в компьютерных моделях, имитирующих работу ЖРД на различных, в том числе переходных режимах.

#### **Литература**

1. *Овсянников Б.В., Боровский Б.И.* Теория и расчет агрегатов питания ЖРД. М.: Машиностроение, 1986.

2. *Кишкин А.А., Зуев А.А., Черненко Е.В., Смирнов П.Н.* Вращение жидкости над неподвижным основанием по закону твердого тела: Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. / №1. 2011. С. 126–131.

3. *Черненко Д.В., Черненко Е.В., Зуев А.А., Шевченко Ю.Н.* К расчету пространственного пограничного слоя при развороте потока в круговом секторе // Изв. высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. № 1. 2009. С. 15–18.

4. *Степанов Г.Ю.* Гидродинамика решеток турбомашин. М.: Физматгиз, 1962.

5. *Кишкин А.А., Черненко Е.В., Жуйков Д.А., Делков А.В., Черненко Д.В.* Автоматизированная система термогазодинамического расчета и оптимизации параметров элементов турбомашин (ASTROPET): Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2013610054 от 09.01.2013. Заявка №2012619448 от 02.11.2

## **NUMERICAL SIMULATION OF THE FLOW IN THE INTERSCAPULAR CHANNEL STATIONARY CENTRIFUGAL PUMP ROCKET ENGINE.**

**D.A. Zhuikov, M.I. Tolstopyatov, K.E. Buts**

Siberian State Aerospace University

Russian Federation, Krasnoyarsk

buts88@mail.ru

The paper presents a method for numerical simulation of the flow in the interscapular channel stationary centrifugal pump of rocket engine based on the integral ratio of a spatial boundary layer.

# ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН В БЛОЧНЫХ СРЕДАХ

**М.А. Похабова**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук  
Российская Федерация, г. Красноярск  
pokhabova-mariya@mail.ru

Актуальность исследования распространения волн в блочных средах не оставляет сомнения. Ведь выяснение различных вопросов поведения неоднородных сред при землетрясениях, подземных взрывах и вибровоздействии является важнейшей задачей геомеханике. В настоящее время при моделировании горных пород учитывается концепция М.А. Садовского [1], согласно которой, горный массив имеет ярко выраженное структурно-неоднородное блочно-иерархическое строение. Такое строение проявляется на разных масштабных уровнях. Часто прослойки между блоками представлены более слабыми породами, а это сказывается на процессе распространения волн в такой среде.

Моделирование распространения сейсмических волн в блочном породном массиве при ударно-взрывном воздействии является достаточно сложной трехмерной задачей для исследования. Поэтому исследование проводилось на одномерной и двумерной задаче.

На основе реологического метода, учитывающего свойства материалов в блоках и прослойках, построены различные математические модели с упругим и вязкоупругим взаимодействием (модель Максвелла, модель Кельвина – Фойхта) между блоками. Двумерная задача была представлена моделью блочной среды. Для численного решения задач был использован параллельный вычислительный алгоритм, в котором реализован метод двуциклического расщепления по пространственным переменным [2]. При численном решении одномерных задач было проведено тестирование алгоритмов на точных решениях задачи об одномерном движении плоских волн и сравнение результатов с экспериментальными исследованиями в [3–4].

В результате расчетов одномерных и двумерных задач была подтверждена гипотеза о существовании волн маятникового типа. Большая серия методических расчетов позволила увидеть и проанализировать некоторые особенности распространения низкочастотных маятниковых волн.

В перспективе результаты исследований планируется использовать при разработке специальных технических устройств для своевременного прогнозирования ослабленной структуры горной породы в целях предотвращения аварийных ситуаций.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 14-01-00130).

## Литература

1. *Садовский М.А.* Естественная кусковатость горной породы // Докл. АН СССР. 1979. Т. 247, № 4. С. 829-831.
2. *Sadovskaya O.V., Sadovskii V.M., Pokhabova M.A.* Numerical Modeling of a Block Medium as an Orthotropic Cosserat Continuum. In: Finite Difference Methods, Theory and Applications. Series: Lecture Notes in Computer Science. V. 9045. Berlin – Heidelberg: Springer, 2015. P. 340–347.
3. *Курленя М.В., Опарин В.Н., Востриков В.И.* О формировании упругих волновых пакетов при импульсном возбуждении блочных сред. Волны маятникового типа // Докл. АН СССР. 1993. Т. 333, № 4. С. 3-13.
4. *Александрова Н.И., Черников А.Г., Шер Е.Н.* Экспериментальная проверка одномерной расчетной модели распространения волн в блочной среде // Физ.техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 2005. № 3. С. 46–55.

## NUMERICAL STUDY OF THE PROCESSES OF WAVE PROPAGATION IN A BLOCK MEDIA.

**M.A. Pokhabova**

Institute of computational modelling SB RAS  
Russian Federation, Krasnoyarsk  
pokhabova-mariya@mail.ru

As part of the process of wave propagation studies, taking into account the structure of the rock mass and complex rheological properties of the material layers different mathematical models are constructed. As a result of calculation of one-dimensional and two-dimensional problems it has confirmed the hypothesis of the existence of the pendulum wave and analyzed characteristics of wave propagation in blocky media.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ МЕТОДОМ VOF

**А.С. Фролов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
frolov\_a@ftf.tsu.ru

Работа посвящена численному моделированию процесса растекания вязкой жидкости по твердой стенке под действием силы тяжести. Математическая постановка задачи осложнена нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных и меняющейся во времени границей раздела фаз. Один из наиболее эффективных способов решения этой проблемы является алгоритм VoF (Volume of Fluid), основная идея которого заключается в введении функции  $F$ , показывающей долю контрольного объема занятого жидкостью. Динамика изменения  $F$  демонстрирует эво-

люцию свободной поверхности во времени. В результате работы была написана и отлажена программа расчета. Проведены исследования аппроксимационной сходимости алгоритма. Выполнены параметрические исследования эволюции свободной поверхности в зависимости от определяющих параметров.

## **NUMERICAL SIMULATION OF VISCOSITY FLUID FLOW WITH FREE BOUNDARIES BY A METHOD VOF.**

**A.S. Frolov**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
frolov\_a@ftf.tsu.ru

This work is devoted the numerical modeling of viscous fluid spreading process on a solid wall under gravity. Such problems are complicated by detecting of the free boundary evolution in time. VoF method is the most effective for this problem solution. As a result a program for calculations was written and debugged. The parametric investigations of the free boundary evolution in time as a function of basic parameters were carried out.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОМЕРНОГО СТАЦИОНАРНОГО НЕРАВНОВЕСНОГО ТЕЧЕНИЯ В ДВИГАТЕЛЕ С ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНОЙ**

**В.Ю. Гидаспов, Д.С. Кононов, Н.С. Северина**

Московский авиационный институт  
Российская Федерация, г. Москва  
dr.kononoff@yandex.ru

Важным этапом при создании двигателей является численное моделирование химико-физических процессов, протекающих в канале сопла. В настоящей работе рассчитываются термодинамические макро- и микропараметры сверхзвукового потока, проходящего через канал, имеющий форму сопла Лавалья. При этом в канале на пути потока встречается ударная волна (вопросы, связанные с причиной возникновения данного явления, не рассмотрены). Также не учитываются эффекты теплопроводности, вязкости и диффузии. Исследуемый поток состоит из водорода, кислорода и азота в соотношении 1:0.5:9. В качестве начальных данных заданы начальная скорость потока, начальная температура потока, начальное давление, форма исследуемого контура. Координата постановки ударной волны в контуре варьируется в различных численных экспериментах.

# **SIMULATION OF ONE-DIMENSIONAL STEADY-STATE NONEQUILIBRIUM FLOW IN THE ENGINE WITH DETONATION WAVE**

**V.Yu. Gidaspov, D.S. Kononov, N.S. Severina**

Moscow Aviation Institute  
Russian Federation, Moscow  
dr.kononoff@yandex.ru

An important step in the establishment of the engines is the numerical simulation of chemical and physical processes taking place in the channel of the nozzle. In this paper we calculated thermodynamic macro and microscopic parameters of supersonic flow through the channel-shaped Laval nozzle. At the same time in the channel in the flow path meets the shock wave (issues related to the cause of this phenomenon is not considered). The same effects are not captured thermal conductivity, viscosity and diffusion. The test consists of a stream of hydrogen, oxygen and nitrogen in a ratio of 1:0.5:9. As the initial data set the initial flow rate, the initial flow temperature, the initial pressure, the shape of the test circuit. Coordinate setting shock wave in the loop varies various numerical experiments

## **АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ АНИЗОГРИДНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО МАССЕ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОМ ЧИСЛЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ**

**О.А. Штейнбрехер**

Новокузнецкий институт (филиал) Кемеровского государственного университета, Российская Федерация, г. Новокузнецк,  
olga\_sht@mail.ru

Выбор оптимального варианта изделия, в том числе оптимальных значений геометрических параметров конструктивных элементов, является одним из этапов проектирования конструкции.

Анизогридные конструкции, получившие широкое применение в машиностроении, представляют собой регулярную структуру спиральных и кольцевых ребер. Особенностью оптимального проектирования таких конструкции является то, что они содержат большое число ограничений, выражаемых функциями, нелинейно зависящими от варьируемых факторов.

Использование традиционных методов решения затруднено особенностями области допустимых параметров, как правило, она является невыпуклой. Рассматриваемый алгоритм основан на алгоритме симплексного поиска, в котором для описания невыпуклых гладких участков границы строится частичный R-пре-дикат допустимой области, учитывающий только ближайшие к текущей точке участки границы (доминанты). Для коррек-

тировки направления перемещения симплекса, рассчитываются реакции упругих связей, которыми заменяются доминанты, действующих на перемещаемый симплекс аналогично пружине.

В данной работе рассматривается применение данного алгоритма к задаче поиска оптимальных геометрических параметров сечений спиральных и кольцевых ребер конической анизогридной конструкции при соблюдении минимума массы и ограничений по прочности и устойчивости. Для получения обратно пропорциональных зависимостей функций ограничений от варьируемых параметров используются методы вычислительного эксперимента. Полученные, в ходе применения оптимального алгоритма, геометрические размеры сечений с учетом ограничений технологии производства удовлетворяют установленным условиям по прочности и устойчивости конструкции.

### **ALGORITHM OF OPTIMIZATION OF ANISOGRID CONSTRUCTION FOR AN ARBITRARY NUMBER OF NON-LINEAR RESTRICTIONS IS OFFERED**

**O.A. Shteinbreher**

Kemerovo State University  
Russian Federation, Novokuzneck  
olga\_sht@mail.ru

Optimum projection of construction is one of the stages of design. In this paper the algorithm of problem solving of optimum projection of designs at the arbitrariness number of non-linear restrictions is offered. The task is reduced to unconstrained minimization of support function which is based of assumed target function and R-predicates of the arbitrariness number of restrictions.

The example of application of an algorithm of optimization to a problem of searching of optimum design data of a lattice shell.

### **ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СПЛАЙНОВОЙ РАЗНОСТНОЙ СХЕМЫ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ПЕРЕНОСА ПРИМЕСИ В АТМОСФЕРЕ**

**А.А. Семёнова**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация г. Томск  
semyonova.a@math.tsu.ru

Была разработана новая численная схема решения системы конвективно-диффузионно-кинетических уравнений математической модели переноса

са малых составляющих примеси с учетом их химических взаимодействий в атмосферном пограничном слое.

Для аппроксимации конвективных членов пользовалась монотонизированная сплайновая схема высокого порядка точности. Она строится основе локальных весовых кубических сплайнов, обладающих хорошей способностью воспроизводить монотонное распределение зависимой переменной на новом шаге по времени [1].

Численный эксперимент заключался в том, что на поверхности Земли в районе города в одной ячейке сетки рассматриваемой области происходит постоянное выделение примеси. Также в расчетах используется поле ветра на двое суток, предсказанное с помощью мезомасштабной модели. В центре области расположен участок, из которого с интенсивностью 10000 мг/с выделяется газообразная примесь. Требуется спрогнозировать изменение концентрации на имеющемся поле ветра на последующее время.

В результате ряда численных экспериментов был выявлен ряд её достоинств перед уже известными численными схемами 2 и 3-го порядка точности, применяемыми при решении данной задачи: MLU, MUSCL. Одно из них заключается в том, что сплайновая схема менее подвержена влиянию схемной диффузии, что позволяет на одной и той же сетке точнее предсказывать локальные максимумы в численном решении задач переноса примеси в атмосфере.

При реализации алгоритма были применены два подхода распараллеливания, основанные на двумерной декомпозиции расчетной области с использованием. Они основаны на синхронных или асинхронных методах межпроцессорной передачи данных для вычислительных систем с распределенной памятью [2].

Показана целесообразность применения опережающей рассылки вычисленных приграничных значений сеточной функции с помощью асинхронной передачи данных для повышения ускорения расчетов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 16-41-700178-р\_а).

#### Литература

1. Квасов Б.И. Методы изогеометрической аппроксимации сплайнами. М: Физматлит, 2006. 360 с.
2. Старченко А.В., Данилкин Е.А., Лаева В.И., Проханов С.А. Практикум по методам параллельных вычислений. М.: Изд-во МГУ, 2010. 200 с.

## **PARALLEL IMPLEMENTATION SPLINE DIFFERENCE SCHEME FOR SOLVING THE PROBLEM OF POLLUTANT TRANSPORT IN THE ATMOSPHERE**

**A.A. Semyonova**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
semyonova.a@math.tsu.ru

A new monotonized high-accuracy spline scheme is proposed to approximate the convective terms. It has been shown that this scheme has an advantage over the monotonized schemes of second or third order used to solve such problems. Various approaches to paralleling the computational algorithm are developed and tested. These approaches are based on a two-dimensional decomposition of the calculation domain with synchronous or asynchronous methods of interprocessor data transmission for distributed-memory computer systems.

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**Д.Ю. Гаврилов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет;  
Российская Федерация, г. Томск  
gavr131313@gmail.com

В современной науке уже несколько десятилетий используются цифровые приборы для проведения измерений. На обработку полученных с таких приборов данных иногда уходят крупные временные затраты. Это связано с несогласованностью программного обеспечения (ПО), структурирующего и сохраняющего результаты измерений, с приложениями осуществляющими их последующую обработку.

## **DATA PROCESSING AUTOMATION IN PHYSICS RESEARCH**

**D.Yu. Gavrilov**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
gavr131313@gmail.com

For many decades digital devices are widely used in science for measurements. A lot of time spends at data processing. It can be relate with disagreement of software that structure and save measurements results, with applications that carry out postprocessing

# **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ОКРЕСТНОСТИ СТЫКА ИЗОЛЯТОРА И ЭЛЕКТРОДА**

**Д.А. Майлюков, Р.К. Нариманов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
Dinislam.94@gmail.com

Применение математических моделей и численное решение их с использованием современной вычислительной техники позволяет не только экономить время и средства, требуемые для разработки радиоэлектронной аппаратуры, но часто является единственно возможным средством, позволяющим понять и наглядно представить физические процессы, протекающие в субмикронных структурах полупроводниковых приборов.

В данной работе рассматривается метод двумерного численного моделирования полупроводниковых приборов на основе решения дифференциальных уравнений в частных производных эллиптического типа с особенностями в граничных условиях. Указанный метод основан на альтернирующем методе Шварца.

Двумерный подход в рассмотрении электрического поля позволяет учитывать краевые эффекты на стыках электродов и изоляторов, проявляющиеся в возникновении областей высокой концентрации напряженности электрического поля. Необходимость в повышении точности расчета в окрестности стыка электрода и изолятора, связана с тем, что рассматриваемые эффекты характерны и в других практически значимых задачах.

## **ELECTROSTATIC FIELD MODELING IN REGION OF THE JUNCTION OF THE ELECTRODE AND INSULATOR**

**D.A. Maylyukov, R.K. Narimanov**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
Dinislam.94@gmail.com

The electrostatic field in area of the critical point is calculated by merging the numerical and analytical solution, based on alternating Schwartz method. The error was compared with respect to the exact solution.

# **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ВНУТРЕННЕЙ БАЛЛИСТИКИ РДТТ С ПОМОЩЬЮ ОБРАТНОГО МЕТОДА ЛАКСА–ВЕНДРОФФА**

**А.Е. Кирюшкин, Л.Л. Миньков**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
sashakir94@mail.ru

В данной работе рассматривается численное решение двумерных задач внутренней баллистики РДТТ на декартовой вычислительной сетке с помощью WENO-схем дискретизации по пространству и TVD Runge-Kutta метода интегрирования по времени. Как известно, WENO-схемы обладают широким шаблоном, а значит для точек, расположенных рядом с границей, часть шаблона находится вне вычислительной области.

Также граница пересекает линии декартовой вычислительной сетки произвольным образом. С помощью обратного метода Лакса–Вендроффа задаются значения в фиктивных точках рядом с границей области, что обеспечивает высокий порядок точности во всей области вычисления.

## **NUMERICAL SIMULATION OF SRM INTERNAL BALLISTICS PROBLEMS USING INVERSE LAX-WENDROFF PROCEDURE**

**A.A. Kiryushkin, L.L. Minikov**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
sashakir94@mail.ru

Numerical solution of 2D SRM internal ballistics problems on Cartesian mesh using WENO-schemes spatial discretization and TVD Runge-Kutta time discretization are considered in this paper.

As it is known, WENO-schemes have wide stencil. Therefore, part of stencil points near the boundary may lay outside the computational domain. In addition, boundary intersects the Cartesian grid in an arbitrary fashion. Ghost values are set in points near the boundary in order to provide high order accuracy inside the computational domain.

## **КРИТЕРИЙ СХОДИМОСТИ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА В ЗАДАЧАХ МИНИМИЗАЦИИ ПОЛИМОДАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ**

**А.Э. Васькина**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
bastet94@mail.ru

В работе рассматривается проблема оценки сходимости генетических алгоритмов решения задач минимизации функций. В качестве решения проблемы используется кластеризация решений, обеспечивающая надежную работу алгоритма. Работоспособность предложенного метода показана на примере функций, имеющими несколько минимумов (полимодальными), что подтверждают проведенные исследования на основе разработанного программного обеспечения.

## **CRITERION OF CONVERGENCE OF GENETIC ALGORITHM TO MINIMIZE THE PROBLEMS OF MULTIMODAL FUNCTION**

**A.E. Vaskina**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
bastet94@mail.ru

This paper considers the problem of the convergence of genetic problem algorithms for solving problems of minimization of functions. Use clustering solution providing reliable operation of the algorithm. The proposed method works with polymodal functions.

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ НАНОКОМПОЗИТОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

**А.Ю. Федоров, В.А. Скрипняк**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
anton4991@mail.ru

Численное моделирование процессов механического поведения хрупких гетерогенных сред позволяет расширить понимание закономерностей деформации, развития повреждений и разрушения перспективных керамических композиционных материалов в условиях интенсивных динамических воздействий, что необходимо при проектировании элементов конструкций и рационального использования материальных и энергетических затрат на производство керамических изделий. В данной работе для моделирования

механической реакции керамических композитов на импульсное воздействие был использован метод сглаженных частиц (SPH). Проанализированы процессы разрушения на мезоскопическом уровне композиционных материалов системы  $ZrB_2-B_4C$ . Методом численного моделирования исследованы зависимости пределов прочности наноструктурной  $ZrB_2$  керамики и нанокompозитов  $ZrB_2-B_4C$  от скорости деформации и температуры. Результаты показали, что при высокоскоростной деформации разрушение нанокompозита носит квазихрупкий характер. Трещины на мезоскопическом уровне в волне сжатия формируются вблизи пор и в пространстве между упрочняющими частицами.

## **NUMERICAL SIMULATION OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF CERAMIC NANOCOMPOSITES UNDER DYNAMIC LOADING**

**A.Yu. Fedorov, V.A. Skripnyak**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
anton4991@mail.ru

This paper reports our results on the investigation of dynamic failure of nanostructured  $ZrB_2-B_4C$  composites at the mesoscale level. 3D computer simulation of deformation and failure of structured volume of materials was carried out at the mesoscale level. It was shown that dynamic failure of  $ZrB_2-B_4C$  nanocomposite has quasi-brittle character.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СПЛАВОВ ZR-NB С УЧЕТОМ РАЗВИТИЯ ДЕФОРМАЦИИ И ПОВРЕЖДЕНИЙ НА МЕЗОСКОПИЧЕСКОМ И МИКРОСКОПИЧЕСКИХ УРОВНЯХ**

**В.А. Сербента, В.А. Скрипняк**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
Serbenta3@mail.ru

Совершенствование технологий изготовления оболочек ТВЭЛОВ и элементов оборудования ядерных реакторов связано с необходимостью прогноза структурных превращений и механических свойств радиационно-стойких сплавов  $Zr-Nb$ . Проблемой, на решение которой направлено данное научное исследование, является создание научных основ и разработка методов оценки механических свойств новых конструкционных материалов для ядерных реакторов IV поколения и компьютерного моделирования их механического поведения с использованием эффектов влияния химического состава и условий нагружения на механические свойства. Современ-

ные теоретические методы являются основой для моделирования процессов структурных превращений на микро- и мезоскопическом уровне с целью углубления понимания связи между внешними параметрами и физическими свойствами материалов. В настоящей работе представлены результаты по развитию теоретических методов оценки и прогнозирования механических и деформационных свойств, сплавов Zr–Nb.

Получены прогнозы закономерностей пределов прочности при растяжении сплавов Zr–Nb в широком диапазоне скоростей деформации и температуры. В данной работе представлены результаты моделирования механического поведения сплавов Zr–Nb с использованием определяющего уравнения KHL и учетом развития деформации и повреждений на микро- и мезоскопическом уровнях

## **MECHANICAL BEHAVIOR MODELING OF ZIRCONIUM-NIOBIUM ALLOYS WITH THE DEVELOPMENT OF DEFORMATION AND DAMAGE AT MESOSCOPIC AND MICROSCOPIC LEVELS**

**V.A. Serbenta, V.A. Skripnyak**  
National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
Serbenta3@mail.ru

This paper reports the results of the study and prediction of mechanical properties of Zr–Nb alloys. The regularities of the flow stress and the tensile strength of Zr–Nb in polycrystalline and ultrafine-grained state under loading in the temperature range from 297 K to 764 K were described by KHL (Khan-Huang-Liang) model. The results can be used in engineering analysis of designed technical systems for nuclear reactors.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ СТЕПЕННОЙ ЖИДКОСТИ В ПЛОСКОЙ ПОСТАНОВКЕ**

**М.П. Бессонова**  
Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
bessonova.mp@mail.ru

Процесс течения неньютоновской жидкости в канале широко распространен в различных отраслях промышленности. В частности течения такого типа реализуются в технологиях переработки полимерных материалов методом литья под давление.

В настоящей работе исследуется эволюция формы свободной поверхности неньютоновской жидкости при течении в плоском канале. Рассматривается случай, когда сила тяжести направлена против потока. Математиче-

ская постановка задачи в приближении ползущего течения включает уравнения Стокса и уравнение неразрывности. В качестве реологической модели используется степенная модель Оствальда-де Ваале, основным параметром которой является показатель нелинейности. На входной границе задается профиль скорости Пуазейля, соответствующий аналитическому решению для степенного закона. На твердых стенках выполняется условие прилипания. Свободная граница подчиняется динамическому и кинематическому граничным условиям [1].

Для численного решения поставленной задачи используется непрямой метод граничных элементов. Для аппроксимации гранично-интегральных уравнений используются постоянные элементы и ячейки. Система линейных алгебраических уравнений для потока ньютоновской жидкости решается методом Гаусса. Для решения системы нелинейных алгебраических уравнений используется метод простой итерации, для улучшения сходимости которого необходимо использовать процедуру релаксации.

В результате проведенного исследования получены установившиеся формы свободной поверхности для различных значений показателя нелинейности. Проведено исследование влияния параметров течения на структуру потока. Обнаружено появление неустойчивости формы свободной границы при низких значениях показателя нелинейности. Также показано, что увеличение влияния гравитационных сил позволяет избежать возникновения неустойчивости.

#### Литература

1. *Ponomareva M.A., Filina M.P., Yakutenok V.A.* The indirect boundary element method for the two-dimensional pressure- and gravity-driven free surface Stokes flow // WIT Transactions on Modelling and Simulation. 2014. Vol. No 57. P. 289.

## THE STUDY OF FREE SURFACE SHAPE OF POWER LAW FLUID IN PLANAR DOMAIN

**M.P. Bessonova**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
bessonova.mp@mail.ru

The free surface shape of power law fluid flow in planar domain is investigated. The mathematical model includes the Stokes equation, the continuity equation and the boundary conditions. The indirect boundary element method in combination with the simple iteration method is used for the numerical solution. It found the appearance of instability of the free surface shape at low values of the power-law index.

# **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНЫХ ВОЛН С ДЕФОРМИРУЕМЫМИ МНОГОСЛОЙНЫМИ ОРТОТРОПНЫМИ ПРЕГРАДАМИ**

**И.А. Турыгина**

Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского  
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского  
Российская Федерация, г. Нижний Новгород  
hodykinainna@gmail.com

Многослойные проницаемые преграды, представляющие собой слои металлических плетеных сеток, являются эффективным средством ослабления нагрузки от воздействия ударных волн. При интенсивных воздействиях преграда может испытывать деформации, в том числе пластические. Представлена численная методика, описывающая связанные процессы взаимодействия ударных волн с подобными преградами. Динамическое поведение пакета плетеных сеток, содержащего в своих порах газ, описывается с помощью уравнений динамики многоскоростных континуумов. Численное решение уравнений проводится по модифицированной схеме С.К. Годунова. Приведены результаты численного моделирования распространения ударной волны через цилиндрический пакет металлической плетеной сетки при внутреннем взрывном воздействии. Оцениваются эффекты снижения интенсивности ударной волны после взаимодействия с преградой.

Полученные результаты сравниваются с известными экспериментальными данными по параметрам проходящих волн.

## **NUMERICAL MODELLING OF SHOCK WAVE INTERACTION WITH DEFORMABLE MULTILAYERED ORTHOTROPIC BARRIERS**

**I.A. Turygina**

Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod  
Russian Federation, Nizhni Novgorod  
hodykinainna@gmail.com

Multilayered permeable barriers represent the layers of metal braided grids. It is effective way for weakening the load from the impact of shock waves. Presented numerical methods that describe the associated processes of interaction of shock waves with similar obstacles.

The obtained results are compared with known experimental data on the parameters of the passing wave.

# ОБ УЛУЧШЕНИИ СХОДИМОСТИ РЯДОВ В ЗАДАЧЕ О КОЛЕБАНИЯХ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ОРТОТРОПНОЙ ПРИЗМЫ

**А.Д. Ляшко**

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского  
Российская Федерация, г. Симферополь,  
knightLA@yandex.ru

Ортотропные призмы и пластинки являются одними из наиболее распространенных и современных элементов конструкций в машиностроении и строительстве. Теория регулярных бесконечных систем линейных алгебраических уравнений позволяет улучшать сходимость рядов и даже аналитически просуммировать все ряды в представлении решения.

Рассматривается плоская деформация прямоугольной ортотропной призмы  $2a \times 2b$ , плоскости упругой симметрии которой совпадают с плоскостями координат, которая подвергается действию нормальной нагрузки. Напряжения и перемещения связаны между собой обобщенным законом Гука при помощи технических коэффициентов  $\nu_1, \nu_2, E_1, E_2$  – соответственно коэффициентов Пуассона и модулей Юнга в направлении координатных осей  $Ox$  и  $Oy$ , а также модуля сдвига  $G$ .

В рамках поставленной задачи было получено новое аналитическое представление для амплитудных значений перемещений в форме тригонометрических рядов Фурье. После известной процедуры метода суперпозиции приводит к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений относительно неопределенных коэффициентов  $X_k, Y_k$  ( $k = 0, 1, 2, \dots, K$ ). Особенность представления решения заключается в том, что единичному решению бесконечной системы уравнений соответствует следующее элементарное аналитическое решение задачи об установившихся колебаниях ортотропной призмы:

$$u = \sqrt{\frac{1 + \nu_1}{1 - \nu_1 \nu_2}} \frac{1}{\Omega_{12}} \frac{\cos(\Omega_2 y \sqrt{G(1 + \nu_2) / E_2}) \sin(\Omega_2 x \sqrt{G(1 + \nu_2) / E_1})}{\sin(\Omega_2 b \sqrt{G(1 + \nu_2) / E_2}) \sin(\Omega_2 a \sqrt{G(1 + \nu_2) / E_1})} \cos \omega t,$$

$$v = -\sqrt{\frac{1 + \nu_2}{1 - \nu_1 \nu_2}} \frac{1}{\Omega_{11}} \frac{\sin(\Omega_2 y \sqrt{G(1 + \nu_2) / E_2}) \cos(\Omega_2 x \sqrt{G(1 + \nu_2) / E_1})}{\sin(\Omega_2 b \sqrt{G(1 + \nu_2) / E_2}) \sin(\Omega_2 a \sqrt{G(1 + \nu_2) / E_1})} \cos \omega t.$$

Здесь  $\Omega = \frac{2\omega}{\pi} \sqrt{\frac{\rho}{G}}$ ,  $\Omega_2 = \pi \Omega / 2$ ,  $\Omega_{11} = \Omega_2 \sqrt{G(1 - \nu_1 \nu_2) / E_1}$ ,

$$\Omega_{12} = \Omega_2 \sqrt{G(1 - \nu_1 \nu_2) / E_2}.$$

Благодаря этому при подстановке неизвестных все ряды в перемещениях и напряжениях суммируются к соответствующим выражениям. В частном случае изотропной призмы эти собственные частоты и элементарные собственные формы были найдены в монографии [1] и названы модами Ламе. Знание единичного решения бесконечной системы линейных алгебраических уравнений значительно облегчает исследование регулярности бесконечной системы. Также из того, что у системы имеется решение, которое стремится к ненулевой константе, можно сделать предположение о том, что и в общем случае  $\lim_{k \rightarrow \infty} X_k = \lim_{k \rightarrow \infty} Y_k = L$ . С учетом этого предположения, возможно применение метода улучшенной редукции.

Непосредственные вычисления показывают, что ряды для нормальных напряжений расходятся в угловых точках. Асимптотический закон вместе с известным единичным решением позволяет улучшить сходимость этих рядов во всей плоскости призмы. В докладе произведено сравнение напряжений на границе призмы с улучшением и без улучшения сходимости.

#### Литература

1. Гринченко В.Т., Мелешко В.В. Гармонические колебания и волны в упругих телах. К.: Наук. думка, 1981. 284 с.
2. Канторович Л.В., Крылов В.И. Приближенные методы высшего анализа. Л.: Физматгиз, 1962. 708 с.
3. Ляшко А.Д., Чехов В.Н. О регулярности бесконечных систем для установившихся вынужденных колебаний ортотропных прямоугольных призм // Динамические системы. Т. 5 (33), № 1–2, 2015. С. 105–116.
4. Папков С.О. Установившиеся вынужденные колебания прямоугольной ортотропной призмы // Мат. методы и физ.-мех. поля. 2012. № 2. С. 177–185.

### ON IMPROVEMENT OF THE SERIES CONVERGENCE IN THE PROBLEM OF THE VIBRATIONS OF ORTHOTROPIC RECTANGULAR PRISM

**A.D. Lyashko**

V.I. Vernadsky Crimean Federal University  
Russian Federation, Simferopol  
knightLA@yandex.ru

A new analytical presentation of the solution for steady-state oscillations of orthotropic rectangular prism is found and the corresponding infinite system of the linear algebraic equations has been deduced. A countable set of the elementary eigenforms is found for a rectangular orthotropic prism. The identities are found which allow to improve the convergence of all infinite series in the solution of the problem.

# ДИНАМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ГРАДИЕНТНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

**М.В. Коробенков<sup>1</sup>, Р.В. Левков<sup>2</sup>**

Российская Федерация, Томск, <sup>1</sup>Томский государственный университет

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

korobenkov@ftf.tsu.ru

Эффективная динамическая стойкость современных материалов немаловажна без использования в качестве защитного элемента конструкции конструкционных керамических материалов. Роль подобного класса материалов заключается в поглощении основной части кинетической энергии с последующим хрупким разрушением. Хрупкое поведение конструкционной керамики на основе оксида алюминия при динамическом воздействии приводит к его полному разрушению, однако варьируя технологическими параметрами изготовления, такими как давление прессования и температура спекания, можно получать материал с заданной структурой. Влияние параметров внутренней структуры исследовано в ряде работ [1].

В данной работе представлена оценка динамической стойкости градиентных керамических материалов на основе оксида алюминия при амплитуде воздействия от 2,5 до 10 ГПа. Использовался метод математического моделирования динамического нагружения модельного образца плоской ударной волной, основанный на математическом аппарате механики сплошных сред. Для описания механического поведения конденсированной фазы керамики использована модель Джонсона-Холмквиста, использующая концепцию, согласно которой процесс разрушения представляет собой зарождение и развития повреждения в хрупком материале. Для описания процесса разрушения использовалась модель Джонсона-Кука, согласно которой разрушение конечного элемента структурной сетки происходит, если параметр поврежденности  $D$ , определенный как сумма дискретных приращений параметра поврежденности в процессе нагружения за время  $\Delta t$ , становится равным единице [2]. Визуализация процесса разрушения реализовывалась с помощью эрозионной модели, концепция которой заключалась в автоматическом удалении из расчета элементов сетки, наиболее подверженных деформации, для обеспечения устойчивости решения.

Результаты расчета показали, что наличие градиента внутренней структуре ведет к увеличению прочностных характеристик конструкционной керамики при динамическом нагружении.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-31-60059 мол\_а\_дк.

### Литература

1. Скрипняк В.А., Скрипняк Е.Г., Козулин А.А., Пасько Е.Г., Скрипняк В.В., Коробенков М.В. Влияние поровой структуры хрупкой керамики на разрушение при динамическом нагружении // Изв. Томского политехнического университета, 2009, Т. 315, № 2, С. 113–117.

2. Korobekov M.V., Kulkov S.N., Naimark O.B., Khorechko U.V., Ruchina A.V. Deformation and damage accumulation in a ceramic composite under dynamic loading // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 2016, vol. 112, p. 012044.

## THE DYNAMIC RESISTANCE OF THE GRADED CERAMIC MATERIALS

**M.V. Korobekov<sup>1</sup>, R.V. Levkov<sup>2</sup>**

National Research Tomsk State University

<sup>2</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science ISPMS SB RAS

Russian Federation, Tomsk

korobekov@ftf.tsu.ru

The paper presents the estimation of the dynamic resistance of the graded ceramic materials when the amplitude of loading from 2,5 to 10 GPa. The method of modeling the dynamic loading of the model sample flat shock wave, based on the mathematical apparatus of continuum mechanic, are used. The model of Johnson-Holmquist are used for the description of the ceramics mechanical behavior. The model of Johnson-Cook are used to describe the processes of destruction. Visualization of the process of destruction was implemented using the erosion model.

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

---

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОСТИ ПОРОШКОВ  
АЛЮМИНИЯ НА ОКИСЛЕНИЕ И КИНЕТИЧЕСКИЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ  
THE STUDY OF THE EFFECT OF ALUMINUM POWDERS  
DISPERSION ON THEIR OXIDATION AND KINETIC  
CHARACTERISTICS**

**М.П. Орлова, Т.И. Горбенко, С.А. Волков**

Национальный исследовательский Томский государственный университет;  
Российская Федерация, г. Томск  
maria-orlova-93@mail.ru

В течение последних десятилетий постоянно расширяется использование порошкообразных металлов, с помощью которых можно улучшать энергетические и эксплуатационные характеристики двигательных установок. Алюминиевые порошки нашли широкое применение в качестве горючего компонента в энергетических конденсированных системах различного назначения, а также и в космической технике.

В настоящее время физико-кинетические свойства микроразмерного алюминия исследованы достаточно хорошо, но, несмотря на это многие авторы продолжают исследования по изучению механизма окисления порошков алюминия как микроразмерного, так и наноразмерного диапазона. В работе [1] проведено исследование влияния фазообразования на механизм окисления порошка алюминия, легированного кальцием. Полнота превращения легированного кальцием порошка в два и более раза выше, чем у чистого алюминия. Авторами работы [2] исследовано влияние бария на кинетику окисления порошка сплава на основе алюминия. Сравнение термограмм свидетельствует о том, что до температуры плавления порошок чистого алюминия окисляется энергичнее сплава. Максимальному экзотермическому пику соответствует удельное тепловыделение равное 9026 Дж/г. Легирование алюминия барием увеличивает полноту и скорость окисления алюминия. В этих работах авторы не исследовали влияние дис-

перности алюминия на закономерности окисления. Анализ литературных данных показал, что результаты разных авторов по кинетическим характеристикам окисления металлических порошков различаются. Можно предположить, что это связано с разными методами получения порошков алюминия, условиями хранения, содержанием примесей в них.

Настоящая работа посвящена изучению характеристик окисления порошков алюминия разной дисперсности с помощью дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрического анализа (ТГ).

В работе были исследованы порошки алюминия двух марок: ультрадисперсный порошок алюминия марки АСД-4, среднемассовый диаметр которого 7.34 мкм, и нанодисперсный порошок марки Alex, полученный методом электрического взрыва, со средним диаметром частиц 0.18 мкм. Удельная поверхность порошка АСД-4 составляла 0.5 м<sup>2</sup>/г, а порошка алюминия марки Alex – 13.9 м<sup>2</sup>/г. Содержание активного алюминия в порошках данных марок 98.0 и 85.8 % масс., соответственно [3].

Для исследования влияния дисперсности алюминия на окисление использовались методы ТГ, ДСК. Эксперимент проводился в интервале температур от комнатной до 1000 °С в условиях нагрева со скоростью 5, 10, 20 °С/мин в потоке воздуха. Эксперимент проводился на приборе NETZCH STA 409 PC/ PG.

На основе проведенного ТГ анализа было установлено, что темп нагрева влияет на начало окисления. У порошка алюминия марки АСД-4 (рис. 1) температура начала окисления варьируется от 571 до 576 °С, а для порошка Alex (рис.2) температура начала окисления находится в диапазоне 550–580, возрастая по мере увеличения темпа нагрева. Процесс окисления порошков алюминия можно разделить на две стадии: низкотемпературную (для АСД-4 – (571–650 °С), для Alex – (550–625)) и высокотемпературную (температура начала окисления ( $T_{н.ок}$ ). АСД-4 ~ 750–830 °С,  $T_{н.ок}$ . Alex ~ 705–740, в зависимости от темпа нагрева). При увеличении темпа нагрева прирост массы порошков алюминия уменьшается: для АСД-4 от 124.13 % до 113.21 %; для порошка алюминия марки Alex от 158.14 % до 144.03 %.

Анализ результатов, полученных с помощью ДСК анализа, показал, что энергия тепловыделения при окислении порошка алюминия марки АСД-4 по мере увеличения темпа нагрева падает, обретая более выпуклую, но узкую форму с 326.5 Дж/г до 248.8 Дж/г. При выше указанных условиях значение теплоты плавления для АСД-4 изменяется от –193 Дж/г до –178.2 Дж/г. Для порошка марки Alex энергия тепловыделения при окислении по мере увеличения темпа нагрева изменяется от 3655 Дж/г до 3367 Дж/г. Теплота плавления (при идентичных условиях) для Alex изменяется от –51.09 Дж/г до –14.45 Дж/г.

Данные, полученные с помощью ТГ и ДСК анализа можно представить в табличном виде:

**Таблица 1. Значения характеристик окисления порошка алюминия марки АСД-4**

Темп нагрева, °С/мин	Первая стадия окисления		Вторая стадия окисления		Тепловой эффект реакции	
	$T_{н.ок}$ , °С	$T_{к.ок}$ , °С	$T_{н.ок}$ , °С	$T_{к.ок}$ , °С	$\Delta H_{ок}$ , Дж/г	$\Delta H_{пл}$ , Дж/г
5	571	635	750	до 1000	326.5	-193.0
10	576	640	760	до 1000	255.4	-192.7
20	576	650	830	до 1000	248.8	-178.2

Примечание –  $\Delta H_{ок}$  -тепловой эффект реакции окисления,  $\Delta H_{пл}$  -тепловой эффект реакции плавления.

**Таблица 2. Значения характеристик окисления порошка алюминия марки Alex**

Темп нагрева, °С/мин	Первая стадия окисления		Вторая стадия окисления		Тепловой эффект реакции	
	$T_{н.ок}$ , °С	$T_{к.ок}$ , °С	$T_{н.ок}$ , °С	$T_{к.ок}$ , °С	$\Delta H_{ок}$ , Дж/г	$\Delta H_{пл}$ , Дж/г
5	550	625	705	до 1000	3655.0	-51.1
10	560	610	720	до 1000	3391.0	-44.1
20	580	625	740	до 1000	3467.0	-14.5

В ходе данной работы определено, что порошок алюминия марки Alex реагирует более полно, чем порошок алюминия марки АСД-4, при нагревании прирост массы оксида алюминия марки Alex в 1.3 раза выше по сравнению с порошком марки АСД-4 при идентичных условиях и соответствующих темпах нагрева. По результатам ТГ, ДСК анализов установлено влияние дисперсности порошков алюминия на процесс окисления, для порошка Alex все процессы окисления смещаются в область более низких температур. По результатам ТГ, ДСК анализов установлено влияние темпа нагрева на начало окисления, а также на величину энергии тепловыделения.

### Литература

1. Шевченко В.Г. Влияние кальция на кинетику окисления и фазовый состав продуктов взаимодействия порошков сплавов на основе алюминия / В.Г. Шевченко, Д.А. Еселевич, Б. П. Толочко // Журн. физика горения и взрыва. 2014. Т. 50, Вып. 5. С. 39–42.
2. Дизаджи Х.Б. Определение термокинетических констант порошков пищевых продуктов для их классификации по взрываемости / Х.Б. Дизаджи, Ф.Ф. Дизаджи, М. Бидабади // Журн. физика горения взрыва. 2014. Т.50, Вып. 2. С. 92–101.
3. Arkhipov V.A. Effect of Ultrafine Aluminum on the Combustion of Composite Solid Propellants at Subatmospheric Pressures / V.A. Arkhipov, T.I. Gorbenko, M.V. Gorbenko, L.A. Savel'eva Combustion, explosion, and Shock Waves, 2009. Vol. 45, No 1, P. 40–47

# THE STUDY OF THE EFFECT OF ALUMINUM POWDERS DISPERSION ON THEIR OXIDATION AND KINETIC CHARACTERISTICS

**M.P. Orlova, T.I. Gorbenko, S.A. Volkov**

National Research Tomsk State University

Russian Federation, Tomsk

maria-orlova-93@mail.ru

Micro-sized aluminum powder ASD-4 and nano-powder Alex have been studied by differential scanning calorimetry and thermogravimetric analysis. Alex powder is widely used in space technology. The activation energy and pre-exponential factor have been calculated.

## ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРИСТОГО КОМПОЗИТА $ZrO_2(MgO)-MgO$

**А.С. Буяков, С.Н. Кульков**

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Российская Федерация, г. Томск

Alesbuyakov@gmail.com

Пористые керамические материалы – особый класс материалов, эксплуатационные характеристики которых определяются объемом порового пространства и геометрией пор. Их области применения весьма обширны, что обусловлено их высокой коррозионной, химической, радиационной стойкостью и термостойкостью. Особое место занимают керамики на основе диоксида циркония ( $ZrO_2$ ), обладающего высокими эксплуатационными характеристиками, определяемые, в большой степени, стабилизирующими добавками. В работе изучены керамические композиционные материалы  $ZrO_2-MgO$  в широком диапазоне концентраций, с объемом порового пространства 50%, спеченные при температуре 1600°C. Исследованы тонкая кристаллическая структура и прочность материалов при сжатии. Показано, что предел прочности определяется напряжениями второго рода, возникающими на границах кристаллитов. Между макропрочностью и микронапряжениями в кристаллической решетке MgO зависимость линейна, в то время как от величины микронапряжений в решетке  $ZrO_2$  зависимость прочности установить не удалось.

# STUDY OF STRENGTH PARAMETERS DENSITY FROM COMPONENTS CONCENTRATION IN POROUS CERAMIC COMPOSITE $ZrO_2(MgO)-MgO$

**A.S. Buyakov, S.N. Kulkov**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
Alesbuyakov@gmail.com

Porous composite ceramic materials  $ZrO_2-MgO$  were studied. The main mechanical characteristics of the material were determined and compared with XRD-analysis results. It was shown, that they are determined by microstresses and in a most way by microstress in  $MgO$  crystal lattice.

## ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРИРОДНОГО ЦЕОЛИТА ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ

**А.Ю. Бузимов, С.Н. Кульков**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
buzimov92@gmail.com

Известно, что механическая активация в шаровых мельницах сопровождается изменениями морфологии, площади удельной поверхности и фазового состава цеолитов. Таким образом, исследование физико-химических свойств природного цеолита Токайского месторождения является актуальным. Порошок подвергался механической обработке в планетарной мельнице до 600 минут. Используются следующие методы исследования: элементный анализ, рентгеноструктурный анализ, метод растровой электронной микроскопии, метод определения удельной поверхности (БЭТ). Результаты элементного анализа показали, что природный цеолит состоит в основном из кремния, алюминия и различных элементов, таких как магний, калий, кальций, железо. Идентификация рентгенограмм природного цеолита показала, что в составе исходного порошка находится 7 фаз с различным содержанием минералов.

Согласно рентгенофазовому исследованию, количество аморфной фазы у исходного порошка составило 12.5%. В исходном состоянии площадь удельной поверхности порошка составила  $19.3 \text{ м}^2/\text{г}$ . Порошок представлен частицами неправильной формы, разных размеров, плотно прилегающих друг к другу, средний размер частиц составил 27 мкм.

Установлено, что в течение первых 60 минут, удельная площадь поверхности возрастает, достигая максимума  $32.9 \text{ м}^2/\text{г}$ . Дальнейшая механи-

ческая активация приводит к уменьшению удельной поверхности порошка. Процесс механической активации природного цеолита Токайского месторождения соответствует теоретическим линиям и разделяется на три зоны: 1 – зона измельчения, когда происходит увеличение удельной поверхности пропорционально времени измельчения; 2 – зона агрегации или переходная зона, где удельная поверхность не изменяется; 3 – зона агломерации, где наблюдается уменьшение площади удельной поверхности с ростом времени измельчения. Показано, что механическая обработка приводит к изменению не только удельной поверхности и размера частиц, но и к изменению фазового состава. Количественный фазовый анализ природного цеолита в процессе механической обработки до 600 мин, показал радикальные изменения минералогического состава. При этом, происходит увеличение количества аморфной фазы в порошке с 12,5 до 52%.

## **CHANGE OF THE PHYSICAL-CHEMICAL PROPERTIES OF NATURAL ZEOLITE AFTER MECHANICAL ACTIVATION**

**A.Y. Buzimov, S.N. Kul'kov**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk

The goal of this work was to study changes induced by mechanical activation on the structure and properties of natural zeolite Tokaj Mountain deposit. It has been shown that the amount of amorphous phase and the specific surface area depends on mechanical treatment. The mechanical activation in a planetary ball milling is a powerful method for obtaining the necessary specific surface.

## **ВЛИЯНИЕ ТЕРМОУДАРНЫХ НАГРУЖЕНИЙ НА СВОЙСТВА КЕРАМИКИ $Al_2O_3$ – $MgO$**

**С.П. Буякова, Ю.Л. Кретов**

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН  
kretov2005@yandex.ru  
buzimov92@gmail.com

В работе исследовано влияние термоударных нагрузжений на фазовый состав и механические свойства керамики состава  $MgO$ – $Al_2O_3$ , а также термостойкость данного материала. Установлено, что с увеличением числа термоударных нагрузжений не наблюдается изменений фазового состава данного композита. В ходе испытаний выявлен состав композита наиболее устойчивый к термоударным нагрузжениям. Также замечено, что термоудар не оказывает воздействия на механические свойства керамики  $MgO$ – $Al_2O_3$ .

# EFFECTS OF THERMAL SHOCK STRAINS ON THE PROPERTY OF ALUMINA-MAGNESIA CERAMICS

**S.P. Buyakova, Yu.L. Kretov**

Russian Federation

Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of RAS

kretov2005@yandex.ru

In work studied effect thermal shock loading on the phase composition and mechanical properties of the ceramic composition of MgO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and thermal shock resistance of the material. It was found that with the increasing number of thermal shock loads not observed changes in the phase composition of the composite. During the tests revealed the composition of the composite more resistant to thermal shock loading. Also found that the thermal shock loading does not affect on mechanical properties of the ceramic MgO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

## ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ПРИ ФОТОВОЗБУЖДЕНИИ

**И.Л. Лапина**

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Российская Федерация, г. Томск

inna\_lapina\_92@mail.ru

В работе были созданы методом полива пленки Пиррометена 597 в фотоотверждаемой эпоксидной смоле (OSSILA). Было установлено, что в пленке за счет эффекта полного внутреннего отражения формируется волновод, излучение которого выходит из торцов пленки. При этом если излучение волновода будет проходить через возбужденную пленку, то оно будет снимать инверсию, и волновод в этом случае будет выступать в роли резонатора. Волновод, образованный за счет явления ПВО, является вредным, так как приводит к снижению КПД генерации в продольном резонаторе. Однако, уменьшение площади возбуждения (введение диафрагмы, фокусировки) уменьшает нежелательные потери и вредное излучение с торцов пленки заметно ослабевает. Поэтому в данной работе была реализована схема экспериментальной установки по типу квази-продольного резонатора. Резонатор в ней сформирован селективным диэлектрическим зеркалом и глухим зеркалом. В схему введена диафрагма, при помощи которой можно точно варьировать геометрические размеры входного пучка. В такой схеме получена генерация при квази-продольной накачке на длине волны 578 нм, порог генерации составил 1,8 МВт/см<sup>2</sup>, полуширина полосы излучения составила 5 нм, КПД ≈ 3,4 %. Установлено, что КПД генерации пленочной ЛАС при продольной накачке зависит от площади накачки

Снак. Так, при больших Снак продольная генерация отсутствует. При размерах пятна накачки сопоставимых с толщиной пленки КПД генерации имеет максимальные значения.

Данная работа (№ 8.2.44.2015) выполнена при поддержке Программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета» в 2016 г.

## **STIMULATED EMISSION IN ORGANIC FILMS FOR PHOTOEXCITATION**

**I.L. Lapina**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
inna\_lapina\_92@mail.ru

In this paper the generation of Pirrometen 597 in transversal pumping and longitudinal types is investigated. Research was conducted at exaltation by the pulse laser (wavelength of excitement is 532 nm, duration of an impulse is 10 ns, pumping power density is 13 MW/cm<sup>2</sup>). Films doped with the dye were created by a watering method (concentration of days = 5 Ч 10 – 4 moll/l). Thickness of films was measured using the optical profilometer KLA – Tencor MicroXam 100 and was obtained 5.8 microns.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ВЗРЫВОСОПРОТИВЛЯЕМОСТИ ОБРАЗЦОВ ПКМ ПРИ НЕКОНТАКТНОМ ПОДВОДНОМ ВЗРЫВЕ**

**А.И. Дульнев, Е.А. Неклюдова**

ФГУП Крыловский государственный научный центр  
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург  
nekludik@mail.ru

Применение полимерных композиционных материалов для изготовления корпусных конструкций кораблей обуславливает необходимость исследования сопротивляемости таких материалов при воздействии различных видов динамических нагрузок.

В работе исследовалась сопротивляемость образцов из полимерного композиционного материала (ПКМ) на основе стеклоткани и винилэфирного связующего в условиях воздействия неконтактного подводного взрыва. На основе проведенных экспериментов получена оценка уровней взрывного воздействия, соответствующих различной степени повреждения материала (растрескивание связующего, разрыв отдельных волокон, образование пробоины). Получены экспериментальные зависимости «деформа-

ция – время», характеризующие напряженно-деформированное состояние (НДС) образцов.

С использованием программ LS-DYNA и AUTODYN проведено компьютерное моделирование воздействия подводного взрыва на образцы применительно к условиям испытаний. Получено хорошее соответствие результатов моделирования экспериментальным данным. Разработанные модели использованы для более детального анализа НДС образцов ПКМ в условиях подводного взрыва и выбора возможного критерия для оценки предельного состояния.

## **EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL BLAST RESISTANCE ASSESSMENT OF POLYMER COMPOSITE SAMPLES AT CONTACTLESS UNDERWATER EXPLOSION**

**A.I. Dulnev, E.A. Nekliudova**

Krylov State Research Center  
Russian Federation, St. Petersburg  
nekludik@mail.ru

The paper presents results of experimental research on fiberglass composite material resistance to explosion. Three levels of critical explosive load (matrix breaking, breaking of single fibers, hole) were obtained and strain levels in samples were estimated. The stress-strain state of composite sample loaded by the shock wave was analyzed using the finite element modeling (LS-DYNA and AUTODYN). FEM shows satisfactory agreement with the experimental data.

## **КОНТРОЛЬ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ KRCL- И XECL-ЭКСИЛАМПЕ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА МЕТОДОМ СКАЧКА ДАВЛЕНИЯ**

**М.В. Диденко**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
mari.dm28@mil.ru

Процессы рассеяния энергии в KrCl- и XeCl-эксиллампах барьерного разряда при различных напряжениях, частотах и длительностях импульсов напряжения выявлены методом скачка давления. Предложен и апробирован способ расчёта средней мощности излучения в условиях неоднородного заполнения разрядом колбой. Подтверждены данные предыдущих работ (Пикулев А.В., Соснин Э.А., 2010–2013).

Сформулирована закономерность о соответствии условий достижения наибольших значений мощности ультрафиолетового излучения условиям,

в которых рассеиваемой в плазме разряда тепловая мощность максимальна.

## **DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE KRCL- AND XECL-EXCILAMPS RADIATION POWER CONTROL BY PRESSURE JUMP METHOD**

**M. Didenko**

National Research Tomsk State University  
mari.dm28@mil.ru

The energy dissipation processes in dielectric barrier discharge KrCl- and XeCl-excimer lamps at various voltage, frequencies and pulse duration are revealed by a pressure jump method. It is offered and tested a way of radiation power calculation in conditions of non-uniform filling of device bulb by discharge plasma. The previous data (Pikulev A.A., Sosnin E.A., 2010-2013) are confirmed. It can be formulated the following conclusion based on pressure jump method: In barrier discharge excimer lamps, the conditions for achieving maximum values of average power and intensity of radiation meet the conditions of maximum heat emission in the discharge plasma.

## **ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ СЕНСОР ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ НИТРОСОЕДИНЕНИЙ**

**Ш.Т. Бердыбаева**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
mari.dm28@mil.ru

В работе исследована возможность создания люминесцентного сенсора на нитросоединения для мониторинга окружающей среды. Исследованные вещества: аналит – нитротолуол (NT), флюорофоры – 9,10-bis (trimethylsilylethynyl) anthracene (TMSA) и 9,10-bis (phenylethynyl) anthracene (ДФА). Была создана пленка сенсора, изменение люминесценции которого наблюдали при взаимодействии нитротолуола в газовой фазе. Известно, что тушение люминесценции флюорофора происходит благодаря возникновению комплекса с переносом заряда между молекулами сенсора и аналита. Получено, что интенсивность излучения ДФА падает в 2 раза в течение 2 мин, а интенсивность излучения TMSA – за 8 мин. Следовательно, ДФА является более перспективным веществом для создания люминесцентного сенсора на нитросоединения.

## **FLUORESCENT SENSOR FOR THE DETECTION NITROAROMATIC COMPOUNDS**

**S.T. Berdybaeva**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
mari.dm28@mail.ru

We have studied the possibility of creating a fluorescent sensor for the detection nitroaromatic compounds. Investigated material: analyte – nitrotoluene (NT), fluorophores – 9, 10-bis (trimethylsilylethynyl) anthracene (TMSA) and 9,10-bis (phenylethynyl) anthracene (DPA). The luminescence intensity of the DPA decreases by 2 times for 2 minutes.

## **НЕОДНОРОДНОСТЬ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ В БИМЕТАЛЛИЧЕСКОМ МАТЕРИАЛЕ**

**Ю.В. Ли, С.А. Баранникова, А.В. Бочкарева, А.Г. Лунев, Л.Б. Зуев**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
jul2207@mail.ru

В настоящее время биметаллы занимают важное место в современной промышленности, где в результате эксплуатации они подвержены влиянию сторонних механических воздействий. Изучение природы пластической деформации твердых тел привело к заключению о том, что пластическое течение неоднородно (локализовано) на любом своем этапе. В работе рассмотрены особенности распространения фронтов локализации пластической деформации в биметалле с использованием метода корреляции цифровых изображений. Анализ стадийности кривых нагружения по характеру изменения коэффициента деформационного упрочнения и показателя деформационного упрочнения показал, что характерной особенностью деформационных кривых рассматриваемого материала является наличие трех стадий пластического течения: стадии линейного деформационного упрочнения, стадии параболического деформационного (Тейлоровского) упрочнения и стадия предразрушения. Использование автоматизированного комплекса ALMEC-tv позволило определить основные пространственно-временные характеристики распространения зон локализации: скорость распространения  $V_{aw}$  и пространственный период  $l$ .

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Государственной академии наук в 2015–2020 гг. и Программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета» в 2016 г.

## **HETEROGENEITY OF THE PLASTIC FLOW IN THE BIMETALLIC MATERIAL**

**Yu. Li, S.A. Barannikova, A.V. Bochkareva, A.G. Lunev, L.B. Zuev**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
jul2207@mail.ru

In this work we study the evolution of the localization of the plastic deformation in bimetal carbon steel – stainless chromium-nickel steel metal composite. The images of the localization of the plastic deformation upon the uniaxial tension have been obtained by the digital image correlation method (DIC). The stages of the plastic flow curves have been analyzed, and the local deformation distribution parameters have been evaluated, as well.

## **ФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ TiAlN МЕТОДОМ ПРОСВЕЧИВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ**

**Е.М. Дымнич**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
dymnich\_95@mail.ru

Фазовый состав и микроструктура покрытия TiAlN, нанесенного на подложку из аустенитной стали 12X18H10T, исследовались методом просвечивающей дифракционной электронной микроскопии. Нанесение покрытия осуществлялось магнетронным методом распыления мишени в реакционной смеси газов аргона и азота. Подложка – аустенитная сталь 12X18H10T – подвергалась предварительной обработке ионным пучком титана. Сравнивались результаты, полученные при исследовании покрытия, нанесенного на обработанную ионным пучком титана подложку и покрытия, нанесенного на предварительно необработанную подложку. Выявлено, что увеличение длительности предварительной ионной обработки подложки ионами титана приводит к измельчению нанокристаллической столбчатой структуры покрытия TiAlN.

## **AN INVESTIGATION OF ELASTIC-PLASTIC PROPERTIES OF ALUMINUM ALLOYS AT HIGH STRAIN RATES**

**E. Dymnich**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
dymnich\_95@mail.ru

TiAlN coat plating-on austenitic steel was studied by transmission electron microscopy. The coat plating on steel substrate was by magnetron sputtering. Austenitic steel substrate was ion beam processed. The comparison of the obtained results between the coating plated on ion beam processed substrate and the coating on untreated steel substrate were made. It is perceived that preprocessing duration was influenced on nanocrystalline columnar structure refinement.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОВОЛОКОН ГЦК НИКЕЛЯ, СОДЕРЖАЩИХ ВОДОРОД**

**О.В. Яшин**

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова  
Российская Федерация, г. Барнаул  
frs22@mail.ru

В работе описаны результаты исследований процессов, наблюдаемых во время деформации нановолокон ГЦК Ni, содержащих атомы водорода. Полученные результаты показали более высокое значение откольной прочности для нановолокон Ni, содержащих водород, в сравнении с результатами, полученными для нановолокон чистого Ni.

## **THE INVESTIGATION OF METAL FCC NICKEL NANOFIBERS CONTAINING HYDROGEN**

**O.V. Yashin**

Polzunov Altai State Technical University  
Russian Federation, Barnaul  
frs22@mail.ru

In this study described results of process investigations, which observed during deformation FCC Ni nanofibers, containing hydrogen atoms. The results showed a higher value for tensile strength for Ni nanowires containing hydrogen as compared with the results for pure Ni nanowires.

## **ВЛИЯНИЕ ZRO<sub>2</sub> И SiC НА ПОРИСТОСТЬ КОМПОЗИТОВ ZrB<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>-SiC**

**А.Ю. Гусев**

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН  
Российская Федерация, г. Томск  
artemdvd@mail.ru

Композиты состава ZrB<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>-SiC относятся к классу высокотемпературных материалов, что предполагает возможность эксплуатации изделий и конструкций из них в условиях высоких температур. Целью данной работы являлось исследование влияния состава композитов на пористость. Исследовались три группы композитов ZrB<sub>2</sub>+SiC, ZrB<sub>2</sub>+SiC+ZrO<sub>2</sub> (10%) и ZrB<sub>2</sub>+SiC(5%)+ZrO<sub>2</sub>, в которых содержание SiC и ZrO<sub>2</sub> варьировалось от 0 до 20 объёмн. %.

## **EFFECT OF ZRO<sub>2</sub> AND SiC ON POROSITY OF ZrB<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>-SiC COMPOSITES**

**A. Yu. Gusev**

Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of RAS  
Russian Federation, Tomsk  
artemdvd@mail.ru

Ceramic composites ZrB<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>-SiC are a class of high-temperature materials, there is the operation feasibility of products and designs of them at high temperatures. The goal of this work was to study the effect of composition on the porosity of the composites. Three groups of ceramic composites were studied – SiC + ZrB<sub>2</sub>, ZrB<sub>2</sub> + ZrO<sub>2</sub> + SiC (10%) and ZrB<sub>2</sub> + SiC (5%) + ZrO<sub>2</sub> in which SiC and ZrO<sub>2</sub> content was varied from 0 to 20 voluminous. %.

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КЕРАМИЧЕСКОГО БИОКОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**В.А. Микушина<sup>1</sup>, И.Ю. Смолин<sup>1,2</sup>, Ю.Н. Сидоренко<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН  
Российская Федерация, Томск  
mikushina\_93@mail.ru

В современной хирургической медицине изделия из керамических материалов могут использоваться для создания «заменителей» поврежденных

или разрушенных тканей человеческого тела. Для создания костных протезов большой интерес проявляется к керамическим материалам на основе диоксида циркония, характеризующимся высокой прочностью, а также прекрасной биосовместимостью с живыми тканями организма человека [1–3]. Успешность применения таких материалов в медицине, как и в других приложениях, во многом определяется полнотой информации об их механических и биологических свойствах. Для получения такой информации в настоящее время широко применяются методы компьютерного моделирования, корректность которых непосредственно, зависит от качества компьютерных моделей биоматериалов.

Целью работы является численное изучение особенностей изменения параметров напряженно-деформированного состояния и поврежденности на мезоуровне в керамическом пористом биокompозите при механическом нагружении. Биокompозит представляет собой пористую керамику на основе диоксида циркония, заполненную кортикальной костной тканью. Для достижения поставленной цели было проведено численное моделирование механического поведения биокompозита с учетом накопления повреждений.

Исследования проводились в рамках многоуровневого подхода к описанию механических свойств материалов. Расчет параметров напряженно-деформированного состояния объема биокompозита на мезоскопическом уровне производился с помощью метода конечных элементов [4] в двумерной постановке. Рассматривался случай статического одноосного нагружения и упруго-хрупкая модель материала. При выполнении критерия разрушения в элементарных объемах рассчитывался параметр поврежденности мезообъема для каждой компоненты композита [5].

В результате проведенных расчетов определялись параметры законов распределения эффективных значений напряжений и деформаций на мезоуровне в процессе нагружения материала, строилась диаграмма деформирования биокompозита. Исследована эволюция законов распределения мезоскопических напряжений в компонентах биокompозита в процессе деформирования композита с учетом накопления повреждений вплоть до выполнения критерия макропрочности.

#### Литература

1. Канюков В.Н., Стрекаловская А.Д., Килькинов В.И. Материалы для современной медицины: учеб. пособие. Оренбург: ГОУОГУ, 2004. 113 с.
2. Дубок В.А., Проценко В.В., Шинкарук А.В. и др. Новое поколение биоактивных керамик – особенности свойств и клинические результаты // Ортопедическая травматология и протезирование. 2008, № 3. С. 91–95.
3. Михайлина Н.А., Подзорова Л.И., Румянцева М.Н. и др. Керамика на основе тетрагонального диоксида циркония для реставрационной стоматологии // Перспективные материалы. 2010. № 3. С. 44–48.
4. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 392 с.

5. Советова Ю.В., Сидоренко Ю.Н., Скрипняк В.А. Многоуровневый подход к определению эффективных свойств композита с учетом повреждаемости // Физ. мезомех. 2013. Т. 16. № 5. С. 59–65.

## **PREDICTION OF MECHANICAL PROPERTIES OF CERAMIC BIOCOMPOSITE ON THE BASIS OF NUMERICAL MODELING**

**V.A. Mikushina, I.Yu. Smolin, Yu.N. Sidorenko**

National Research Tomsk State University  
Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS  
Russian Federation, Tomsk  
mikushina\_93@mail.ru

Numerical simulation of biocomposite "ceramics based on  $ZrO_2$  – cortical bone" using of multilevel approach was performed. The mechanical properties of the ceramic biocomposite were determined. The evolution of the distributions of the mesoscopic stress in components biocomposite components during the process of its deformation considering damage accumulation up to the fulfillment of the macrostrength criterion was investigated.

## **ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ $ZrW_2O_8$ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ**

**Н.О. Ханзина, В.Р. Ше, Е.С. Дедова**

Институт физики прочности материаловедения СО РАН  
Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
hanzina\_natalia@mail.ru

Керамические композиционные материалы обладают продолжительной работоспособностью в условиях высоких температур и способны выдерживать многократные нагревы до высоких температур при достаточной стабильности размеров изделий. Тем не менее, керамические изделия подвержены изменению линейных размеров при циклических температурных нагрузках. Одним из способов уменьшить размерную погрешность является введение в состав керамической матрицы  $ZrW_2O_8$ , обладающего отрицательным значением коэффициента термического расширения (КТР),  $\beta = -8.6 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$ , сохраняющимся в температурном диапазоне от  $-273$  до  $770 \text{ }^\circ\text{C}$ . Полученные керамические композиты вызывают научный и практический интерес в связи с возможностью их широкого применения в таких областях как ракетостроение, авиакосмическая техника и т.д. Целью

работы являлось исследование влияния вольфрамата циркония на структуру оксидной керамики.

В работе исследовались композиционные материалы двух составов:  $\text{Al}_2\text{O}_3 - 50$  вес %  $\text{ZrW}_2\text{O}_8$ ,  $(\text{ZrO}_2(3\text{мол \% } \text{Y}_2\text{O}_3) - 20$  об %  $\text{Al}_2\text{O}_3) - 50$  вес %  $\text{ZrW}_2\text{O}_8$ . Исходные порошки перемешивали в планетарной мельнице в течение 1 минуты с последующим прессованием и спеканием при температуре  $1200^\circ\text{C}$ . Рентгеноструктурные исследования проводились на дифрактометре ДРОН с фильтрованным  $\text{CuK}\alpha$  излучением в угловом диапазоне  $2\theta = 15 - 80^\circ$  с шагом  $0,05^\circ$  и экспозицией в течение 5 секунд.

Спеченная алюмоциркониевая керамика состояла из тетрагональной фазы  $\text{ZrO}_2$  и орторомбического  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Алюмооксидная керамика состояла из орторомбической модификации  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Введение  $\text{ZrW}_2\text{O}_8$  в исходную порошковую смесь привело к изменению фазового состава полученных композиционных материалов, в частности, к расстабилизации твердого раствора  $\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ . Согласно проведенным рентгенофазовым исследованиям, композит  $(\text{ZrO}_2 - 20\text{об\%Al}_2\text{O}_3) - 50$  вес %  $\text{ZrW}_2\text{O}_8$  состоял из моноклинной фазы  $\text{ZrO}_2$  и алюмовольфрамовых шпинелей типа  $\text{Al}_x(\text{WO}_y)_z$  ( $\text{AlWO}_4$  и  $\text{Al}_2(\text{WO}_4)_3$ ). ВольфраMAT циркония не обнаружен. Фазовый состав полученных материалов  $\text{Al}_2\text{O}_3 - 50$  вес %  $\text{ZrW}_2\text{O}_8$  был представлен орторомбической модификацией  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , моноклинной фазой  $\text{ZrO}_2$ , орторомбическим  $\text{WO}_3$  и двумя фазами  $\text{ZrW}_2\text{O}_8$ : тригональной и кубической. Количественный анализ показал, что содержание  $\text{ZrW}_2\text{O}_8$  составило 13 %.

Отсутствие вольфрамата циркония в системе  $(\text{ZrO}_2 - 20\text{об\%Al}_2\text{O}_3) - \text{ZrW}_2\text{O}$  можно объяснить нарушением стехиометрического соотношения между атомами Zr и W. Известно, что при нагреве выше  $770^\circ\text{C}$  вольфраMAT циркония распадается на оксиды  $\text{ZrO}_2, \text{WO}_3$ . Дальнейшее повышение температуры выше  $900^\circ\text{C}$  приводит к химическому взаимодействию между  $\text{WO}_3$  и  $\text{ZrO}_2$  с образованием шпинелей типа  $\text{Al}_x(\text{WO}_y)_z$ ; выше  $1100^\circ\text{C}$  – к испарению  $\text{WO}_3$ , не вступившего в реакцию. Интересным является тот факт, что в системе  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrW}_2\text{O}_8$  наблюдалось частичное восстановление  $\text{ZrW}_2\text{O}_8$ , однако присутствие шпинелей  $\text{Al}_x(\text{WO}_y)_z$  не обнаружено. Интерпретация полученных результатов требует дальнейших детальных исследований фазовых превращений, протекающих в оксидной керамике, в процессе спекания.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта Министерства Образования № 14.575.21.0040 (RFMEFI57514X0040).

# THE INFLUENCE $ZrW_2O_8$ ON THE PHASE COMPOSITION OF OXIDE CERAMICS

**N.O. Hanzina, V.R. She, E.S. Dedova**

Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of RAS  
Russian Federation, Tomsk  
National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk,  
hanzina\_natalia@mail.ru

In the course of work the influence of zirconium tungstate on the structure composition of the sintered oxide ceramics  $Al_2O_3$  and  $ZrO_2-20\text{vol}\% Al_2O_3$  were studied. The phase structure of the ceramic composites was established. It is shown that in the  $ZrO_2-20\% Al_2O_3$  system the zirconium tungstate promoted the destabilization of  $ZrO_2(Y_2O_3)$  solid solution and formed of the  $Al_x(WO_y)_z$  spinels.

## 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.В., С.В. Пономарев С.В., А.А. Жуков,  
С.А. Пономарев, В.Н. Лейцин, А.С. Нарикович**

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики  
Национального исследовательского Томского государственного университета  
Российская Федерация, г. Томск  
kus70rus@gmail.com

В данной работе рассматриваются существующие методы контроля качества выпускаемой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), работоспособность которой обеспечивает надежность и долговечность активного существования космических аппаратов.

Актуальность данной работы состоит в разработке неразрушающего метода определения начала развития дефектов и мест локализации опасных дефектов при механических испытаниях электронных плат РЭА и прогнозирование срока её службы.

Экспериментальные исследования на образцах электронных (ЭП) показали, что метод АЭ позволяет обнаружить растущий дефект в паяных соединениях процессора (вероятность выявления дефекта составляет 95 %), но степень его опасности выявить сложно из-за большого количества пая-

ных соединений на единицу площади (на 1 см<sup>2</sup> приходится 150–200 паяных соединений). Если совместно использовать методы АЭ и рентгеновской томографии, появится возможность получения геометрии растущего дефекта. А с помощью разработанных авторами алгоритмов определения остаточного ресурса и оценки долговечности по планируемой истории нагружения для материала паяного соединения комплектующих ЭП можно определить степень опасности выявленного дефекта и оценить остаточный ресурс ЭП.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16–38–00743 мол\_а.

## **DETECTING AND IDENTIFYING HIGH THREAD DEFECTS IN ELECTRONIC BOARDS STRUCTURE**

**A.V. Azin, S.V. Ponomarev, S.A. Ponomarev, A.A. Zhukov,  
V.N. Leitsin, A.S. Narikovich**

Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics  
National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
kus70rus@gmail.com

This paper considers the existing quality control method for produced communications electronics equipment (CEE), operation life of which provides reliability and durability of spacecrafts. The relevance of this research is to develop a non-destructive method in order to identify the defect growth and location of high threat defects under mechanical testing of CEE electronic boards (EB) and predict its operation lifetime. Experiments involving electronic board samples showed acoustic emission (AE) method revealed the defect growth in soldered joints (probability of identifying defects is 95%). However its hazard level is difficult to identify due to the large number of soldered joints per unit area (150–200 soldered joints per 1 cm<sup>2</sup>). In the case of using two methods - AE and x-ray tomography - it is possible to get geometric shape of defect growth. On authors developed algorithms, determining remaining operational life and evaluating durability of planned material boarding history of soldered joints in EB units, made it possible to determine hazard level of identified defects and evaluated EB remaining operational life.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОГО ОБЪЕМА ПРОНИЦАЕМОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ**

**П.И. Москвитина**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
clubcmail.ru@mail.ru

Исследования пористых материалов крайне важны во многих областях науки и техники. Важно знать минимальные размеры представительного объема, при которых может идти речь о достоверности различных характеристик и свойств. В рамках модели реальная пористая структура заменяется идеализированным геометрическим представлением. Для решения задачи используется модель стохастической структуры пористого тела, содержащего поры одного размера. В исследуемой модели рассматривается два типа объектов. Крупные включения описывают поры – объекты I-го типа. Мелкие включения используются в модели для описания факта наличия межпоровых каналов и вычисления степени проницаемости среды между соседними порами – объекты II-го типа. Для определения интенсивности переноса вещества между соседними порами выделяются коридоры и вычисляется их проницаемость. В работе приведены результаты численных расчетов компьютерного моделирования, позволяющие оценить размеры представительного объема пористой проницаемой среды. Представительный объем основывался на имитационной модели пористой среды. Показано, что модель такого типа может быть использована при определении различных свойств и характеристик материала с пористой структурой.

## **DETERMINATION OF DIMENSIONS REPRESENTATIVE VOLUME PERMEABLE POROUS MEDIUM**

**P.I. Moskvitina**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
clubcmail.ru@mail.ru

The paper discusses imitation structure with a porous medium. For a description of the porous structure of the implant used idealized geometric model. It is shown that this model allows us to determine the dimensions of a representative volume, in which is possible to investigate the properties of the material.

# **НАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО НОРМАЛЬНОМУ ПРОБИТИЮ СВИНЦОВЫМ УДАРНИКОМ С КОНИЧЕСКОЙ ГОЛОВНОЙ ЧАСТЬЮ СТАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ СКОРОСТЯХ ДО 420 М/С**

**В.В. Голубятников**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, Томск  
golubyatnikov@yandex.ru

Практический интерес к изучению поведения конструкционных материалов в условиях динамического нагружения в настоящее время вызван необходимостью созданием новых средств защит, например таких как, бронежилеты, противометеоритные панели и т.п.

Целью настоящей работы является изучение процесса пробития преграды при соударении со свинцовым ударником. Объект исследования – пластина из углеродистой конструкционной стали размерами 300Ч200Ч2 мм и массой ~ 936 гр. Ударник – свинцовая пуля массой ~27 г. Предмет исследования – состояние пластины после соударения.

В ходе осмотра преграды были выявлены повреждения характеризующиеся образованием пробоины и откольной тарелки. Входное и выходное отверстия имеют форму, близкую к окружности. Диаметры отверстий ~ 30 и 20 мм соответственно. Края кромки пробоины имеют мелкие зазубрины и выгнуты наружу по направлению полета пули. Высота кромки ~ 15 мм. Материал ударника сильно деформирован.

Полученные результаты являются промежуточными и заключаются в том, что ударник насквозь пробивает пластину с формированием откольной тарелки, но сам при этом сильно деформируется. Эксперимент выполнен в НИИ ПММ ТГУ на базе мобильной лаборатории «Взрывного разрушения природных материалов».

## **FULL SCALE TEST PENETRATING STEEL BARRIER BY PROJECTILE AT 420 M/SEC**

**Vlad. V. Golubyatnikov**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
golubyatnikov@yandex.ru

Results of full-scale experiment of the penetration of the steel barriers were announced. Initial velocity impactor was about 420 m/s. The impactor has a conical head part. State barrier after impact was studied in detail.

Секция 4  
**БАЛЛИСТИКА И НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА**

---

---

Session 4  
**BALLISTICS AND CELESTRAL MECHANICS**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ АВТОНОМНОГО  
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ НИЗКОЛЕТАЮЩЕГО ИСЗ  
ПО ИЗМЕРЕНИЯМ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС**

**Е.В. Блинкова**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
zbizk322@mail.ru

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования задачи определения и прогнозирования орбиты низколетящего ИСЗ по измеренным расстояниям от этого спутника до спутников системы ГЛОНАСС. Математическая модель решения этой задачи построена в предположении, что движение всех рассматриваемых объектов является возмущенным и прогнозируется с помощью программы «Численная модель движения ИСЗ». В процессе численного интегрирования для всех спутников учитываются возмущения от несферичности геопотенциала. Кроме того, для низколетящего ИСЗ учитываются возмущения от сопротивления атмосферы Земли, а для спутников ГЛОНАСС – лунно-солнечные возмущения. Анализируются следующие данные: быстродействие метода решения задачи улучшения орбиты, скорость сходимости процесса в зависимости от точности начальных данных и интервала охваченного измерениями. Оценивается зависимость длины временного интервала высокоточного прогнозирования (вперед) от длины интервала, охваченного измерениями.

**MODELLING TASKS AUTONOMOUS MOVEMENT PREDICTING  
LOW-FLYING SATELLITES FOR GNSS MEASUREMENTS**

**E.V. Blinkova**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
zbizk322@mail.ru

This paper presents the results of numerical modeling problems of definition and forecasting of low-flying satellites orbit by measuring the distance from the satellite to the GNSS satellites. A mathematical model to solve this problem is

based on the assumption that the motion of all the objects under consideration is disturbed and it is predicted using the program "A numerical model of the satellite motion."

Analyzes the following data: the performance of the method of solving the problem of improving the orbit, the process of convergence speed, depending on the accuracy of the initial data and dimensions covered by the interval. We estimate the dependence of the length of high-precision time interval prediction (forward) from the length of the interval covered by the measurements.

## **ОЦЕНИВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВОЗМУЩАЮЩИХ УСКОРЕНИЙ НА ТОЧНОСТЬ ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ АСТЕРОИДА 2011 MD**

**О.М. Сюсина, Г.Е. Самбаров**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
kleo77@sibmail.com

Исследование орбитальной эволюции малых тел Солнечной системы, а также задача оценивания вероятности столкновения объекта с Землей требует формирования оптимальной модели возмущающих ускорений, воздействующих на исследуемый объект. Модель сил, используемая в дифференциальных уравнениях движения астероидов, может содержать различный набор возмущающих ускорений в зависимости от задач, поставленных перед исследователем, типа орбит объекта и его возможных сближений с Землей или другими планетами. Применение менее полной модели может привести к систематическим ошибкам и как следствие непопадание изучаемого объекта в область возможных параметров. Это особенно недопустимо при исследовании столкновения астероидов с Землей. В данной работе на примере астероида 2011 MD были проведены исследования влияния малых возмущающих параметров, таких как сжатие Земли, сжатие Солнца и релятивистские эффекты на вероятностную модель движения объекта. Уравнения движения были проинтегрированы на интервале времени 2000–4000 гг.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 16-32-00191 мол\_а.

# ESTIMATING THE EFFECT DIFFERENT PERTURBATION ACCELERATIONS ON THE ACCURACY OF PROBABILISTIC MOTION MODEL OF ASTEROID 2011 MD

**O.M. Syusina, G.E. Sambarov**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
kleo77@sibmail.com

The study of orbital evolution of small bodies in the Solar system, as well as the problem of estimating the probability of collisions of the object with the Earth, requires the optimal model of the perturbing accelerations acting on the object under study. In this paper, on example of asteroid 2011 MD was investigated the effect of small perturbing parameters such as Sun and Earth oblateness and the relativistic effects on a probabilistic model of the object.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАОТИЧЕСКОЙ И РЕГУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ АСТЕРОИДОВ – КОМПАЬОНОВ ВЕНЕРЫ

**О.Н. Летнер, Т.Ю. Галушина**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
oksana.letner@gmail.com

Данная работа посвящена исследованию движения астероидов 322756 2001 СК32, 2002 LT24, 2002 VE68, 2007 AG, 2013 ND15, сближающихся с Землей (АСЗ) и движущихся в окрестности резонанса 1:1 с Венерой.

Для исследования хаотичности и определения времени предсказуемости движения использовались параметры MEGNO и OMEGNO. Из рассмотренных индикаторов наибольшую эффективность показал OMEGNO, поскольку он позволяет не только разделить регулярное и хаотическое движение, но и выявить периодические орбиты среди регулярных. Исследование показало, что астероиды 2002 VE68 и 2013 ND15 демонстрируют регулярные колебания резонансной щели и критического аргумента около значения точной соизмеримости на интервале времени (1000, 3000 лет). Для этих объектов была рассмотрена вероятностная орбитальная эволюция.

При построении вероятностных областей движения исследуемых АСЗ использовалось 10 тыс. тестовых частиц, покрывающих начальную доверительную область объекта. Интервалы исследования выбирались индивидуально и составили 4500 и 1520 лет соответственно.

Орбита астероида 2013 ND15 плохо определена, что не позволяет сделать окончательный вывод об его захвате в резонанс. Данный объект регулярно сближается с Меркурием, Венерой и Землей, что приводит к значи-

тельному увеличению доверительной области. Иное поведение демонстрирует астероид 2002 VE68. На всем интервале исследования астероид движется в окрестности устойчивого резонанса, критический аргумент при этом вибрирует.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-02-02868а.

## **THE RESEARCH OF CHAOTIC AND REGULAR DYNAMICS OF ASTEROIDS – VENUS COMPANIONS**

**O.N. Letner, T.Yu. Galushina**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
oksana.letner@gmail.com

The paper is devoted to investigation of regular and chaotic dynamics of asteroids 322756 2001 CK32, 2002 LT24, 2002 VE68, 2007 AG, 2013 ND15, near-Earth objects (NEA) and moving in the vicinity of resonance 1:1 with Venus. To investigate the chaoticity and predictability time definition of movement parameters MEGNO and OMEGNO are used. OMEGNO indicator showed the greatest efficiency.

The behavior of the resonant characteristics are investigated for these NEA and encounters of asteroid with large planets are revealed. The time interval of integration is chosen individually for each object. The probabilistic regions of movement of asteroids 2002 VE68 and 2013 ND15 are constructed and investigated.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЗАРЯЖАНИЯ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ +20 °С**

**А.И. Зыкова, Н.М. Саморокова, А.Д. Сидоров**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
Arven2022@mail.ru

Одной из главных задач внутрибаллистического проектирования артиллерийских систем является повышение дульной скорости метаемого элемента (МЭ), и для ее решения исследуется использование вместе с МЭ присоединенного заряда (ПЗ), когда дополнительное топливо нового типа располагается непосредственно за МЭ и движется вместе с ним, обеспечивая тем самым дополнительный подгон. Настоящая работа способствует совершенствованию традиционного артиллерийского вооружения.

Целью данной работы был расчет максимально возможных скоростей МЭ в допустимом диапазоне давлений и необходимой для этого компо-

новки пороха и топлива ПЗ, которые определялись путем параметрических исследований на основании серии экспериментов на модельной установке. В опытах использовался инертный МЭ фиксированной массы, зерненный пороховой заряд, ПЗ из перспективного топлива в полиэтиленовом контейнере. В опытах измерялись давление в камере установки, скорость МЭ при движении по стволу и в момент вылета.

Для выполнения работы была посчитана с помощью [1] серия опытов, проведенных в НИИ ПММ ТГУ. В результате проведенных расчетов был получен закон горения нового топлива ПЗ. Все расчетные величины определялись как параметры согласования расчетных и экспериментальных данных при решении прямой задачи внутренней баллистики. Рассогласование экспериментальных и расчетных величин: не превышает 0.77 %.

В ходе параметрических исследования изменялась масса штатного заряда в камере и масса присоединённого заряда ПЗ. В допустимом диапазоне давлений скорость остается практически неизменной вне зависимости от того, насколько увеличивается масса пороха или масса ПЗ. Это обусловлено слишком быстрым сгоранием ПЗ.

Однако, повышение дульной скорости может достигаться при воспламенении ПЗ с некоторой задержкой, поэтому были найдены оптимальные импульсы задержки воспламенения, которые позволили увеличить скорость МЭ на 14,9 %. На практике это может быть реализовано за счет использования замедлителей воспламенения.

В статье использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта № 8.2.02.2015 в рамках Программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета» в 2016 г.

#### Литература

1. *Касимов В. З.* Программный комплекс для расчета внутрибаллистических процессов в ствольных системах // Изв. РАН. 2005. №1. С. 70–76.

### DETERMINATION OF OPTIMAL LOADING CONDITIONS AT THE INITIAL TEMPERATURE OF +20 °C

**A.I. Zykova, N.M. Samorokova, A.D. Sidorov**  
National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
Arven2022@mail.ru

Conducting of parametric studies to determine the optimum loading conditions for increasing of projectile element muzzle velocity at the initial temperature +20 °C

## ПОЗИЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ АСТЕРОИДОВ НА ТЕЛЕСКОПЕ СБГ АО УРФУ И ДАЛЬНЕЙШЕЕ УЛУЧШЕНИЕ ИХ ОРБИТ

**Р.В. Савельев, Т.Ю. Галушина**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
legiontecos@gmail.com

В вопросе упреждения астероидно-кометной опасности важным вопросом является наблюдение астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), а так же как можно более точные предсказания их орбит. В период с 10 по 13 февраля 2016 г. в АО УрГУ на телескопе СБГ ( $F=780$  мм,  $D=420$ мм, ПЗС-камера Arroyo Alta U32) было сделано 668 снимков АСЗ, после обработки с помощью программного комплекса IZMCCD было получено 309 наблюдений 12 объектов с удовлетворительными разностями координат (O-C). Кроме того, 3 объекта имели  $(O-C)>1''$ , что помимо плохого качества снимков могло указывать на плохо рассчитанную орбиту. Для этих объектов была использована методика отбраковки наблюдений, основанная на улучшении орбит. Для одного из объектов снимки оказались действительно плохого качества. Для второго астероида 463282 2012 HR15 на момент проверки наблюдений орбита была хорошо определена, и для всех полученных наблюдений  $(O-C)<1''$ . Третий астероид 459872 2014 EK24 имел 32 наблюдения с большими значениями  $(O-C)$ , 13 из которых после улучшения орбиты оказались удовлетворительного качества с  $(O-C)<1''$ . Результаты наблюдений были отправлены в MPC, часть из которых уже опубликована в его циркулярах.

## POSITIONAL OBSERVATIONS OF ASTEROIDS WITH SBG OF AO URFU AND FURTHER IMPROVEMENT OF THEIR ORBITS

**R.V. Saveliev, T.Yu. Galushina**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
legiontecos@gmail.com

For the period from 2016, February, 10 to 2016, February, 13 668 images of NEAs was taken with telescope SBG of AO of UrFU. After processing in program package IZMCCD we obtained 309 observations of 12 objects with satisfactory residuals (O-C). Also 3 objects had  $(O-C)>1''$  what could mean not only a poor quality of image but bad calculated orbit. For this objects method of observation rejection based on orbit improvement was used.

# **ОРБИТАЛЬНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ РЕАЛЬНЫХ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ ОБЪЕКТОВ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ГЛОНАСС И GPS С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ РЕЗОНАНСОВ И СВЕТОВОГО ДАВЛЕНИЯ**

**М.В. Каширин, И.В. Томилова**

Национальный исследовательский Томский государственный университет;  
Российская Федерация, г. Томск  
carryelement@gmail.com

В работе рассматривается долговременная орбитальная эволюция космических аппаратов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС и GPS, в предположении, что все они потеряли управление 8.01.2015 г. 00.00 UTC. Численное моделирование орбитальной эволюции объектов выполнено при помощи программного комплекса «Численная модель движения систем ИСЗ», реализованного в среде параллельных вычислений. В процессе моделирования учитывались возмущения от Луны, Солнца, несферичности геопотенциала до 10 порядка и степени. Моделирование проводилось как с учетом светового давления, так и без него. Для учета светового давления использовалась коническая модель. Результаты показывают, что учет светового давления приводит к увеличению осредненного параметра MEGNO. При этом резонансная структура в динамике объектов сохраняется.

Работа выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (СП-1671.2016.3, конкурс СП-2016).

## **ORBITAL EVOLUTION OF REAL UNCONTROLLED OBJECTS OF NAVIGATION SYSTEMS GLONASS AND GPS TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF RESONANCE AND LIGHT PRESSURE**

**M.V. Kashirin, I.V. Tomilova**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
carryelement@gmail.com

The paper presents description of long-term orbital evolution of currently existing objects Global Navigation Satellite Systems under the assumption that they lost control 08.01.2015 00.00 UTC. The numerical simulation the long-term orbital evolution was carried out of using the Numerical Model of Motion of Satellite Systems software package implemented in a parallel programming environment at the Tomsk State University computing cluster. During the modeling the perturbations from the Moon, the Sun, nonsphericity of the geopotential up to 10 of the order and the degree were took into account. The simulation

was performed as the subject of light pressure, and without it. The conical model of the light pressure was used.

The results show that the inclusion of light pressure leads to an increase in the averaged parameter MEGNO. The resonance structure of the object dynamics is saved.

## **ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТЫ ОПАСНОГО АСТЕРОИДА ПО ОПТИЧЕСКИМ ИЗМЕРЕНИЯМ КОМПЛЕКСА «НЕБОСВОД»**

**П. Гуо, В.В. Ивашкин**

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

Российская Федерация, г. Москва

869792831@qq.com

ivashkin@keldysh.ru

В докладе анализируются точности определения параметров орбиты астероида с помощью разрабатываемого корпорацией «Комета» космического комплекса «Небосвод», включающего космические аппараты с высокоточными телескопами. Комплекс предназначен для обнаружения опасных для Земли небесных тел с целью своевременного предупреждения о возможной астероидно-кометной угрозе и определения параметров их движения. Разработаны алгоритмы определения орбиты астероида, сближающегося с Землей, по результатам оптических измерений с борта КА данного комплекса. Начальное приближение определяется на основе метода Гаусса. Дальнейшее уточнение орбиты производится с помощью метода наименьших квадратов. Разработаны алгоритмы оценки точности определения параметров орбитального движения астероида.

Оценки точности сделаны с помощью двух методов – аналитического метода и метода статистических испытаний «Монте-Карло». На основе двух орбит астероида, близких к орбите Апофиса, выполнено моделирование процесса движения астероида, его измерений и определения его орбиты с расстояний от 100 млн км до сближения с Землей в 2028–2029 гг., получены оценки точности навигации по прицельной дальности орбиты, перигейному расстоянию и моменту прохождения перигея астероида.

Анализ показал, что результаты аналитического и статистического методов близки друг к другу и комплекс «Небосвод» довольно хорошо определяет орбиту астероида.

# AN ESTIMATION OF ORBIT PARAMETERS DETERMINATION ACCURACY FOR DANGEROUS ASTEROID USING OPTICAL MEASUREMENTS BY THE COMPLEX “NEBOSVOD”

**P. Guo, V.V. Ivashkin**

M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS  
Russian Federation, Moscow  
869792831@qq.com ; ivashkin@keldysh.ru

Navigation accuracy characteristics of space complex “Nebosvod”, which is being designed now by the Russian Corporation “Cometa”, are presented. This complex includes two spacecraft (SC) on geosynchronous orbits, and these SC will be equipped by high-accuracy scanning telescopes. Using these telescopes, identification of celestial bodies as well as determination of their angular coordinates, right ascension and declination, are supposed to be performed. On the base of two asteroid orbits that are close to the Apophis one, there are performed modeling the asteroid motion and its measurements, estimating its orbit parameters and evaluating the navigation accuracies. It is shown that the complex “Nebosvod” allows estimating the asteroid orbit well enough.

## АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ВЕРОЯТНОЙ ЗОНЫ ПАДЕНИЯ АСТЕРОИДА АРОПИС НА ЗЕМЛЮ В 2036 г.

**К.А. Стихно<sup>1)</sup>, П. Гуо<sup>2)</sup>, В.В. Ивашкин<sup>1), 2)</sup>**

<sup>1)</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
Российская Федерация, г. Москва

<sup>2)</sup>Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН  
fn2cyril@gmail.com; 869792831@qq.com; ivashkin@keldysh.ru

В докладе рассмотрена задача определения и исследования вероятной зоны падения астероида Apophis на Землю в 2036 г.

Разработаны алгоритмы для поиска траекторий опасного астероида Apophis, пересекающих Землю в 2036 г., с помощью методов Монте-Карло и градиентного спуска.

Произведен поиск нескольких семейств попадающих траекторий, для каждого из которых перигейное расстояние траектории близко к некоторому фиксированному перигейному расстоянию из диапазона {2069÷2100; 2500; 3000; ...; 6000; 6360; 6375} км.

Определено множество точек пересечения этих траекторий с поверхностью Земли, и на основе этого построена столкновительная полоса на карте мира. Исследованы особенности этой зоны соударения. Дано сравнение полученных результатов с другими работами по данной проблеме.

## AN ANALYSIS OF THE STRUCTURE OF ASTEROID APOPHIS' POSSIBLE IMPACT ZONE ON THE EARTH IN 2036

**C.A. Stikhno<sup>1)</sup>, P. Guo<sup>2)</sup>, V.V. Ivashkin<sup>1), 2)</sup>**

<sup>1)</sup>N.E. Bauman Moscow State Technical University  
Russian Federation, Moscow

<sup>2)</sup>M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS  
Russian Federation, Moscow

fn2cyril@gmail.com; 869792831@qq.com ; ivashkin@keldysh.ru

In the paper the problem to study the asteroid 99942 Apophis' possible impact zone on the Earth in 2036 is considered. The set of points of intersection of these trajectories with the surface of the Earth is determined and the collision area on the world map is built. The features of this impact zone are analyzed. A comparison of the results with other works on this issue is performed.

## АНАЛИЗ ГОРЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ЗАРЯДА В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ МЕТАНИЯ

**А.Д. Сидоров, А.И. Зыкова, Н.М. Саморокова**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
alex\_sid92@mail.ru

Электротермохимическая технология высокоскоростного метания (ЭТХ) позволяет сократить время воспламенения пороха, повысить скорость его горения, а также максимальное давление и дульную скорость метаемого элемента (МЭ) по сравнению с классической схемой заряжания при воспламенении при помощи электрокапсюльной втулки. В работе рассмотрена серия опытов с комбинированным зарядом (порох и присоединенный заряд - ПЗ). Воспламенение производилось при помощи введения высокотемпературной плазмы в порох при уровне дополнительно введенной энергии  $Q$  5ч14 кДж. Обнаружено появление всплеска давления в начале горения с увеличением  $Q$ .

При проведении расчетов данной серии с использованием методики [1] ввод плазмы в порох был учтен введением условного быстрогорящего топлива [2]. Для моделирования всплеска давления были задействованы следующие предположения. Поскольку размеры плазмотрона типа «флейта» меньше внутреннего продольного размера камеры сгорания (КС), порох разделен на 3 части массами  $m_1$ ,  $m_2$  и  $m_3$ , с коэффициентами в законе скорости горения  $u_1$ ,  $u_2$  и  $u_3$  соответственно. Фракция  $m_1$ , окружающая «флейту», воспламеняется и горит в плазменной струе. Образовавшаяся смесь

плазмы и пороховых газов спустя время  $t_2$  воспламеняет фракцию  $m_2$ , расположенную вблизи плазмотрона. Наибольшая фракция  $m_3$  воспламеняется спустя время  $t_3$  и горит без воздействия плазмы. При этом  $m_1 < m_2 < m_3$ ,  $u_1 > u_2 > u_3$  и  $t_2 < t_3$ . Ввод плазмы в порох также влияет на горение ПЗ, увеличивая его коэффициент диспергирования  $B$ , что дает повышение дульной скорости.

Было обнаружено, что  $m_1$  растет с увеличением  $Q$  и не изменяется при  $Q > 9$  кДж, так как плазма воздействует на весь поперечный объем пороха вблизи «флейты». Также выявлен монотонный рост  $B$  с увеличением  $Q$  на всем диапазоне.

В расчетах  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ,  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$  и  $B$  определялись как параметры согласования – менялись в определенном диапазоне для достижения максимального совпадения опытных и расчетных величин  $P_{max}$  и  $V_d$ , и соответственно кривых  $P(t)$  и  $V(t)$ . Рассогласование расчетных и опытных данных по уровню максимального давления и дульной скорости МЭ во всей серии не превысило 3 %.

В статье использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта № 8.2.02.2015 в рамках Программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета» в 2016 г.

#### Литература

1. Касимов В.З. Программный комплекс для расчета внутрибаллистических процессов в ствольных системах // Изв. РАН. 2005. № 1. С. 70–76.
2. Моделирование ввода электрической энергии в пороховой заряд / А.Н. Ищенко [и др.] // Труды Том. гос. ун-та, серия физико-математическая. 2015. Т. 296. С. 139–142.

## ANALYSIS OF COMBUSTION OF THE COMBINED CHARGE IN THE CONDITIONS ELECTROTHERMAL-CHEMICAL THROWING TECHNOLOGY

**A.D. Sidorov, A.I. Zykova, N.M. Samorokova**

National Research Tomsk State University;  
Russian Federation, Tomsk  
alex\_sid92@mail.ru

Identified and analyzed characteristics of combustion combined charge at electrothermal-chemical impact were investigated.

# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЕ АСТЕРОИДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ПЛАНЕТНЫХ ЭФЕМЕРИД

**С.И. Королев, А.П. Батури**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
alexbaturin@sibmail.com

К настоящему времени выпущено большое число планетных эфемерид, используемых при учете возмущений в задаче прогнозирования движения астероидов. Поэтому в астрономической практике существует проблема выбора наиболее точных эфемерид. В докладе рассмотрена задача прогнозирования движения астероидов с использованием при учете возмущений наиболее употребительных эфемерид больших планет и Луны, а именно, DE405, DE408, DE414, DE422, DE423, DE424, DE425, DE430, DE431, DE432, DE433, DE434, DE435 и EPM2011. Выполнено сравнение результатов прогнозирования, полученных с использованием всех перечисленных эфемерид, для четырех астероидов, два из которых имеют короткую дугу наблюдаемости и два – длинную. При выполнении исследования были использованы разработанные ранее программы [1–3], предназначенные для улучшения орбиты и прогнозирования движения астероидов. В обе программы была добавлена возможность использования выпущенных в последнее время эфемерид DE433, DE434 и DE435. Показано, что использование более новых эфемерид для всех объектов дает более близкие результаты прогнозирования, поэтому на практике предпочтительнее использовать последние эфемериды больших планет и Луны.

## Литература

1. Батури А.П., Вотчель И.А. // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57. № 10/2. С. 17–24.
2. Батури А.П., Кинзерский В.В. // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57. № 10/2. С. 67–75.
3. Батури А.П., Кинзерский В.В. // Материалы V Междун. мол. конф. «Актуальные и прикладные проблемы современной механики». Томск: ТГУ. 2015. С. 125–130.

## THE SIMULATION OF ASTEROID'S MOTION WITH DIFFERENT PLANETS' EPHEMERIDES

**S.I. Korolev, A.P. Baturin**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
alexbaturin@sibmail.com

The great number of planets ephemerides exists for today so the problem of choice of the most precise ephemerides is actual now. In the report the motion of several asteroids is calculated with perturbations accounting from the commonly used ephemerides DE405, DE408, DE414, DE422, DE423, DE424, DE425,

DE430, DE431, DE432, DE433, DE434, DE435 and EPM2011. The comparison of the results obtained with all these ephemerides has been performed. It has been demonstrated that usage of newer ephemerides gives closer results so these ephemerides are preferable for the perturbations accounting.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ СВЕТОВОГО ДАВЛЕНИЯ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ**

**А.Г. Александрова, И.Н. Чувашов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
aleksann@sibmail.com

Одной из фундаментальных задач современной небесной механики является исследование влияния светового давления на динамику околоземных космических объектов, поскольку данный возмущающий фактор способен кардинально менять их орбитальную эволюцию. Влияние сил светового давления сильно зависит от геометрических и физических свойств космического аппарата (КА), а также от его ориентации на орбите, поэтому построить обобщенную высокоточную модель невозможно, но можно получить для определенных типов объектов модели светового давления, которые позволят с нужной точностью определить орбиту.

В данной работе рассматривается модель радиационных сил, построенная с учетом формы КА (его эффективной поверхности) и основанная на физическом взаимодействии между солнечным излучением и поверхностью спутника. Методика моделирования эффективной поверхности состоит в том, чтобы выделить ключевые элементы конструкции рассматриваемого КА с точки зрения формирования силы светового давления, но при этом не загромождать расчеты. Для спутников системы ГЛОНАСС это прежде всего панели солнечных батарей и центральный модуль. Параметры модели определялись по данным наблюдений методом наименьших квадратов. Результаты исследований показали, что использование данной модели позволило получить среднеквадратическое отклонение определения орбиты в среднем 2–6 см на 24-часовом интервале времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-60097 мол\_а\_дк

## **DETERMINATION OF PARAMETERS OF SOLAR RADIATION PRESSURE MODEL FROM OBSERVATIONS**

**A.G. Aleksandrova, I.N. Chuvashov**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
aleksann@sibmail.com

In this report a model for the solar radiation pressure on GLONASS satellites is presented that is based on effective surface model of satellite. The model is based on the physical interaction between solar radiation and satellite surfaces. Parameters of the radiation pressure model have been adjusted to fit the GLONASS tracking data.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОЙ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ПОТОКОВ ЧАСТИЦ, ОБРАЗОВАВШИХСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ РАСПАДОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОКОЛОРЕЗОНАНСНЫХ ОРБИТАХ**

**А.Г. Александрова, И.В. Томилова**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
aleksann@sibmail.com

В данной работе рассматриваются результаты исследования долговременной орбитальной эволюции и резонансной структуры потоков частиц космического мусора, образовавшихся в результате распадов космических аппаратов (КА) зоны МЕО на интервале времени 100 лет, а также МEGNO-анализ динамической эволюции фрагментов распада КА. В качестве объектов распада были выбраны спутники, один из которых подвержен действию сразу нескольких вековых резонансов и находится в окрестности орбитального резонанса 2:1 с Землей, и имеет неустойчивый характер движения (GPS-1), а второй подвержен влиянию только резонанса Лидова-Козаи и движется по квазипериодической орбите (ГЛОНАСС-1). Начальное пространственное распределение фрагментов КА по скоростям моделировалось с помощью «Численной модели распада космических объектов», а их движение прогнозировалось с помощью «Численной модели движения систем ИСЗ», реализованной на кластере «Скиф Cyberia» ТГУ. Используемые численные модели разработаны сотрудниками отдела «Небесной механики и астрометрии» НИИ ПММ ТГУ при участии автора работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 15-02-02868 а.

# **INVESTIGATION OF THE RESONANCE STRUCTURE AND THE DYNAMIC EVOLUTION OF THE PARTICLE FLUXES GENERATED AS A RESULT OF SPACECRAFT EXPLOSIONS IN NEAR-RESONANCE ORBITS**

**A.G. Aleksandrova, I.V. Tomilova**

National Research Tomsk State University;  
Russian Federation, Tomsk  
aleksann@sibmail.com

The report presents the results of investigations of the dynamic evolution and resonance structure of the particle fluxes of space debris generated by the explosion of artificial Earth satellites (AES) in MEO. We have considered the explosions of two satellites (GPS-1, GLONASS-1).

## **СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ПРЕВЕНТИВНОГО РАЗРУШЕНИЯ ОПАСНОГО АСТЕРОИДА**

**А.Г. Александрова, Т.Ю. Галушина, К.В. Холшевников**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
aleksann@sibmail.com

Одним из предлагаемых способов противодействия астероидной опасности является уничтожение объекта путем его подрыва. В этом случае моделирование распада астероида и исследование динамики фрагментов поможет определить, будут ли представлять собой опасность для Земли образовавшиеся осколки. В данной работе рассматривается динамическая эволюция фрагментов распада, образовавшихся в результате распада астероидов, сближающихся с Землей. Для моделирования распада астероида использовалась модель подрыва астероида с помощью ядерного устройства. При этом рассматриваются два способа подрыва. В первом случае ударник нагоняет астероид сзади на участке траектории ухода астероида от Земли, а во втором случае астероид нагоняет ударник. Диаметр астероида брался равным 200 м, так что астероид в соответствии с заданной моделью полностью разрушается на осколки размером до 10 м. Генерировалось порядка 100000 осколков. При исследовании долговременной динамической эволюции потоков частиц использовался высокоточный программный комплекс «ИДА», предназначенный для исследования динамики и вероятностной орбитальной эволюции астероидов, разработанный при участии Т.Ю. Галушиной.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета» (проект 8.1.54.2015).

## **COMPARISON OF DIFFERENT METHODS OF THE PREVENTIVE DESTRUCTION OF A HAZARDOUS ASTEROID**

**A.G. Aleksandrova, T.Yu. Galushina, K.V. Kholshvnikov**

National Research Tomsk State University

Russian Federation, Tomsk

aleksann@sibmail.com

One means of countering a hazardous asteroid is destruction of the object using a nuclear charge. The report presents the results of investigations of the dynamic evolution of the particle fluxes generated by the explosion of a hazardous asteroid. Two ways of asteroid destruction have been considered

## **ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕГУЛЯРНОЙ И ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ АСЗ ВБЛИЗИ НЕКОТОРЫХ РЕЗОНАНСОВ С ЮПИТЕРОМ И ЗЕМЛЕЙ**

**Е.Н. Ниганова, Л.Е. Быкова**

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Российская Федерация, г. Томск

shen1981@mail.ru

Работа посвящена исследованию хаотичности в движении астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ). Динамический хаос может возникать в окрестности границ областей начальных параметров движения, приводящих к определенным орбитальным резонансам. Границей, разделяющей различные режимы движения, может быть хаотический слой. В работе представлены результаты построения и исследования областей начальных параметров движения, приводящих к некоторым резонансам с Юпитером и Землей. Исследования выполнялись численным моделированием эволюции орбит астероидов, резонансных характеристик и индикатора хаотичности движения. В качестве индикатора хаотичности взят параметр MEGNO, с помощью которого были исследованы окрестности полученных резонансных областей. Каждая резонансная область строилась на множестве начальных значений большой полуоси и средней аномалии при фиксированных значениях остальных элементов орбит. Рассмотрено влияние начальных параметров орбит: эксцентриситета и наклона на размеры области, а также на ширину хаотического слоя. В результате были построены хаотические зоны в окрестности границ резонансных областей

при различных значениях эксцентриситета и наклона, и получены численные оценки ширины этих зон. Численное моделирование выполнялось на кластере СКИФ CYBERIA ТГУ, что позволило исследовать орбитальную эволюцию большой совокупности модельных частиц на интервалах времени несколько тысяч лет.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-02-02868.

## **NUMERICAL RESEARCH OF REGULAR AND CHAOTIC MOTION OF NEAS NEAR OF A BOUNDARY OF THE MEAN MOTION RESONANCE WITH JUPITER AND EARTH**

**E.N. Niganova, L.E. Bykova**

National Research Tomsk State University;  
Russian Federation, Tomsk  
shen1981@mail.ru

The paper is dedicated to the investigation of the chaotic state in the motion of near-Earth asteroids (NEA). The paper presents the results of construction and investigation of the domains of the initial parameters of motion leading to the some resonances NEAs with Jupiter or Earth. The investigations were carried out by numerical simulation of the evolution of the asteroids, resonance characteristics and an indicator of chaotic motion. The resonance region was constructed over the set of initial values of the semi-major axis and the mean longitude at fixed values of other orbital elements. As a result a chaotic zone was constructed in the vicinity of the boundaries of the resonance regions with different values of eccentricity and inclination, and obtained numerical estimates of the widths of these zones. The numerical simulation was implemented on the cluster SKIF CYBERIA TSU this allowed us to investigate the orbital evolution of a large number of model particles over a time interval of several thousand years. The paper was executed with grant support RFBR 15-02-02868.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЛОКАЛЬНОЙ ГЕОДИНАМИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ GPS/ГЛОНАСС ИЗМЕРЕНИЙ**

**Е.В. Пахомова**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
kuzina.87@mail.ru

В работе представлены полученные методами математического моделирования результаты исследования влияния увеличения числа базовых станций на точность определения координат неизвестного пункта. Для исключения фазовых неоднозначностей и поправок часов приемников на

пунктах из числа определяемых параметров используются тройные разности наблюдаемых величин. Кроме того проведено исследование по определению оптимальных параметров процесса нахождения подвижек координат заданного пункта при использовании тройных разностей измерений, полученных на базовых GPS/ГЛОНАСС станциях и на искомом пункте. Разработанная математическая модель состоит из следующих разделов: моделирование GPS/ГЛОНАСС наблюдений; составление уравнений для определения поправок в координаты неизвестного пункта; получение НК оценок для этих поправок; построение для НК оценок граничных поверхностей доверительных эллипсоидов; нахождение смещения определяемой точки.

## **INVESTIGATION OF SOLVING LOCAL GEODYNAMICS PROBLEMS USING BASE GPS/GLONASS MEASUREMENTS**

**E.V. Pakhomova**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
kuzina.87@mail.ru

The results of the study of the effect of the number of base GPS/GLONASS stations on the accuracy in solving local geodynamics problems are presented. It is shown that the optimum parameters of the process of finding the displacement in the coordinates of a point are determined by using third differences of measured distances.

## **ЗАДАЧА ПОСТРОЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНОЙ ЛОКАЛЬНОЙ МОДЕЛИ КВАЗИГЕОИДА**

**К.В. Шаповалова**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
ff.a.shapovalova.kseniya@stud.tsu.ru

В статье приводится описание и актуальность задачи редукции геодезических высот к поверхности относимости квазигеоида. Рассматриваются степень разработанности проблемы и перспективы дальнейших исследований в области построения локальных квазигеоидов. Ставится задача комплексной реконструкции местной нивелирной сети, призванная определить границы применимости технологии спутникового нивелирования. Затрагиваются основные методологические проблемы, связанные с решением данной задачи.

## **PROBLEM OF DEVELOPMENT HIGH-PRECISION LOCAL MODEL OF QUASIGEOID**

**K.V. Shapovalova**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
ff.a.shapovalova.kseniya@stud.tsu.ru

The description and the topicality of the geodetic heights transformation to the reference surface of quasigeoid were shown. The techniques of solving the problem, the level of the topic scientific development and perspectives for further research to the modelling local Height Reference Surface are under consideration.

## **ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ОРБИТ ОБЪЕКТОВ С БОЛЬШОЙ ПАРУСНОСТЬЮ**

**И.Н. Чувашов, П.А. Левкина**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
chuvashovin@gmail.com

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 наблюдений 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).

## **DYNAMIC EVOLUTION OF THE ORBITS OF OBJECTS WITH HIGH AREA-TO-MASS RATIO**

**I.N. Chuvashov, P.A. Levkina**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
chuvashovin@gmail.com

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.

## **ВОЗМОЖНАЯ ОШИБКА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЗВЁЗДНОГО ВРЕМЕНИ ПОЯВЛЕНИЯ МЕТЕОРА**

**А.А. Майнагашева**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
maynagasheva.a@bk.ru

Координаты траектории метеора как и станций наблюдения вычисляются в геодезической системе координат. При этом зачастую не принимается во внимание, что координаты станций определяются приемниками GPS, работающих в системе координат WGS-84. Эта система совпадает с геодезической системой координат, но ось X смещена на 102 м к востоку от Гринвича. Это вносит ошибку в долготу и соответственно в вычисления звездного времени.

В работе выполнен анализ поправки по долготу к системе WGS-84.

## **POSSIBLE ERROR IN DETERMINING OF SIDEREAL TIME OF OCCURRENCE THE METEORS**

**A.A. Maynagasheva**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
maynagasheva.a@bk.ru

Coordinates of the trajectory of the meteor as monitoring stations are calculated in geodetic coordinate system. This is often not taken into account that the coordinates of the station are determined by GPS receivers operating in the WGS-84 coordinate system. This system is the same as the geodetic coordinate system, but the X axis shifted by 102 meters to the east of Greenwich. This introduces an error in the longitude and respectively calculating the sidereal time. The paper analyzed the amendment of longitude to the WGS-84.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ АВТОНОМНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ НИЗКОЛЕТЯЩЕГО ИСЗ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС**

**Е.В. Блинкова**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
zbizk322@mail.ru

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования задачи определения и прогнозирования орбиты низколетящего ИСЗ по измеренным расстояниям от этого спутника до спутников системы ГЛОНАСС. Математическая модель решения этой задачи построена в предположении, что движение всех рассматриваемых объектов является возмущенным и прогнозируется с помощью программы «Численной модель движения ИСЗ». В процессе численного интегрирования для всех спутников учитываются возмущения от несферичности геопотенциала. Кроме того, для взятого низколетящего ИСЗ учитываются возмущения от сопротивления атмосферы Земли, а для спутников ГЛОНАСС – лунно-солнечные возмущения. Анализируются следующие данные: быстродействие метода решения задачи улучшения орбиты, скорости сходимости процесса в зависимости от точности начальных данных и интервала охваченного измерениями. Оценивается зависимость длины временного интервала высокоточного прогнозирования (вперед) от длины интервала, охваченного измерениями.

# **SIMULATION PROBLEMS AUTONOMOUS PREDICT THE MOVEMENT OF LOW-FLYING SATELLITES SOFTWARE MEASUREMENT SYSTEM GLONASS**

**E.V. Blinkova**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
zbizk322@mail.ru

This paper presents the results of numerical modeling problems of definition and forecasting of low-flying satellites orbit by measuring the distance from the satellite to the GLONASS satellites. A mathematical model to solve this problem is based on the assumption that the motion of all the objects under consideration is disturbed and it is predicted using the program "numerical motion model of the satellite." In the process of numerical integration for all satellites are recorded perturbations from non-sphericity of the geopotential. In addition, to take into account the perturbations nizkoletyaschegoISZ taken from the resistance of Earth's atmosphere, and for GLONASS satellites - the lunar-solar perturbations. Analyzes the following data: the performance of the method of solving the problem of improving the orbit, the process of convergence rate, depending on the accuracy of the initial data and dimensions covered by the interval. We estimate the dependence of the length of high-precision time interval prediction (forward) from the length of the interval covered by the measurements.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТ СПУТНИКОВ ГЛОНАСС ПО МЕЖСПУТНИКОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ**

**И.Н. Чувашов, В.В. Кинзерский**

Национальный исследовательский Томский государственный университет;  
Российская Федерация, г. Томск  
chuvashovin@gmail.com

Для решения задач оперативного навигационно-временного и навигационного обеспечения ЦНИИМАШ несколько раз в сутки обновляет координатно-временную информацию на всех спутниках ГЛОНАСС. Однако, эту частоту обновления можно уменьшить, решая задачу определения орбит спутников ГЛОНАСС на борту. В качестве наблюдений можно использовать межспутниковые измерения. Построив, таким образом, систему линейных уравнений движения всех спутников ГЛОНАСС, приходим к вырожденному случаю, так как количество уравнений в системе на единицу меньше чем количество неизвестных.

В работе рассмотрено несколько способов как устранить эту проблему, и приведены качественные оценки по каждому предложенному способу.

## **DEFINING THE PARAMETERS OF THE ORBITS OF SATELLITES GLONASS ON THE INTER-SATELLITE MEASUREMENT**

**I.N. Chuvashov, V.V. Kinzersky**  
National Research Tomsk State University;  
Russian Federation, Tomsk  
chuvashovin@gmail.com

The paper considers the problem of improving the inter-satellite orbit for measurements and estimates.

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНЫХ ПРЕИМУЩЕСТВ ОДНОВРЕМЕННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ АВРОРАЛЬНЫХ ОВАЛОВ БОРТОВЫМИ ПРИБОРАМИ С ДВУХ КА**

**И.Н. Чувашов, М.А. Баньщикова, А.К. Кузьмин**  
Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
chuvashovin@gmail.com

Дистанционная диагностика характеристик полярной ионосферы на основе онлайн-изображений интенсивности конкретных авроральных эмиссий продолжает развиваться. Разрабатываются авроральные имаджеры для перспективных космических аппаратов Метеор-МП и Зонд, которые будут запущены одновременно в 2022–2023 гг. на полярные низкоапогейные орбиты. В данной работе исследуются возможные ситуации одновременных наблюдений с разных орбит как в северной, так и в южной полярных областях. Используются предварительные начальные условия для расчетов положений центра масс КА и известная геометрия наблюдений на каждом КА при идеальной ориентации КА.

Анализируются преимущества одновременных наблюдений одних и тех же областей свечения под разными углами и появляющиеся возможности реконструкции объемных изображений авроральных эмиссий.

## **RESEARCHES OF POSSIBLE BENEFITS OF SIMULTANEOUS OBSERVATIONS OF THE AURORAL OVALS BY ONBOARD DEVICES FROM TWO SPACECRAFTS**

**I.N. Chuvashov, M.A. Banischikova, A.K. Kuzimin**  
National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
chuvashovin@gmail.com

The remote diagnostics of the characteristics of the polar ionosphere based on online images of the intensity of auroral emissions keep on developing. Auroral

imagers are developed for perspective spacecrafts Meteor-megapixel and the Probe that will be launched at the same time in 2022–2023 into polar low-apogee orbits. In this paper possible situations of simultaneous observations from different orbits both in northern and southern polar regions are researched. Tentative initial conditions for calculations of positions of spacecraft mass center and known geometry of observations on the spacecraft in cases of its ideal orientation are used. Benefits of simultaneous observations of the same areas of a luminescence under different corners and the appearing possibilities of reconstruction of volume images of the auroral emissions are analyzed.

## **ДИСПЕРСИЯ МЕТЕОРОИДНОГО ПОТОКА КВАДРАНТИД ПРИ СБЛИЖЕНИИ С ПЛАНЕТАМИ**

**М.С. Кузьминых**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
kuzminykh\_523@yahoo.com

Метеорный поток Квадрантид – один из наиболее активных ежегодных метеорных потоков. В последнее время он стал довольно популярным объектом для исследований в связи с обнаружением нового астероида, представленного в качестве возможного родительского тела потока. Однако достоин внимания не только вопрос о поиске родительского тела, но и вопрос о причине возникновения характерной особенности потока: сильный и короткий максимум на более широком фоне активности потока. Одно из предположительных объяснений этому явлению – возмущения, вызванные сближениями с планетами. Проведено численное моделирование поведения небольшой выборки метеороидов при сближении с планетами. Полученные результаты представляют хороший фундамент для дальнейших исследований этого вопроса.

## **DISPERSION OF THE QUADRANTID METEOROID STREAM ON APPROACH TO PLANETS**

**M.S. Kuzminykh**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
kuzminykh\_523@yahoo.com

The Quadrantids, one of the more active of the annual meteor showers. In recent years it has become a quite popular object for research in connection with the discovery of a new possible parent body. However the question about the cause of the characteristic features of the stream also worthy of attention, name-

ly: strong but brief maximum within a broader background of the shower activity. One of the explanations for this phenomenon is the perturbations induced by encounters with planets. We conducted a numerical simulation of the behavior of a small sample of meteoroids when approaching with planets. The results represent a good foundation for further study of this issue.

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНЫХ ПРЕИМУЩЕСТВ ОДНОВРЕМЕННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ФРАГМЕНТОВ АВРОРАЛЬНЫХ ОВАЛОВ БОРТОВЫМИ ПРИБОРАМИ С ДВУХ КА**

**И.Н. Чувашов<sup>1</sup>, М.А. Баньщикова<sup>1</sup>, А.К. Кузьмин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики  
Национального исследовательского Томского государственного университета

<sup>2</sup> Институт космических исследований РАН  
chuvashovin@gmail.com

Дистанционная диагностика характеристик полярной ионосферы на основе онлайн-изображений интенсивности конкретных авроральных эмиссий продолжает развиваться. Разрабатываются широкоугольные авроральные имаджеры для перспективных космических аппаратов Метеор-МП и Зонд, которые будут запущены одновременно в 2022-2023 гг. на полярные низкоапогейные орбиты. В данной работе исследуются возможные ситуации и условия одновременных наблюдений фрагментов авроры с разных орбит как в северной, так и в южной полярных областях. Используются предварительные начальные условия для расчетов положений центра масс КА и известная геометрия наблюдений на каждом КА при идеальной ориентации КА. Анализируются преимущества одновременных наблюдений одних и тех же областей свечения с разных высот под разными углами и появляющиеся возможности реконструкции объемных изображений авроральных эмиссий.

## **RESEARCHES OF POSSIBLE BENEFITS OF SIMULTANEOUS OBSERVATIONS OF THE AURORAL OVALS FRAGMENTS BY MEANS OF IMAGERS FROM TWO SPACECRAFTS**

**I.N. Chuvashov, M.A. Banshikova, A.K. Kuzmin**

National Research Tomsk State University

Space Research Institute, Moscow

chuvashovin@gmail.com

The remote diagnostics of the characteristics of the polar ionosphere based on online images of the intensity of auroral emissions keep on developing. Wide f.o.v auroral imagers are developed for perspective spacecrafts Meteor-MP and

Probe that will be launched at the same time in 2022–2023 period into the polar low-apogee orbits. In this paper possible situations and conditions of simultaneous observations of auroral fragments from different orbits both in northern and southern polar regions are researched. Preliminary initial parameters of orbits for calculations of positions of spacecraft mass center and known geometry of observations on the spacecraft in cases of its ideal orientation are used. Benefits of simultaneous observations of the same emission volumes from different altitudes under different corners and the appearing possibilities for reconstruction of 3-D images of the auroral emissions are analyzed.

Секция 5  
**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ  
И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ**

---

---

**Session 5  
MATHEMATICAL AND PHYSICAL MODELING  
OF TECHNICAL AND NATURAL SYSTEMS**

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФТОРИРОВАНИЯ  
ВОЛЬФРАМА**

**Р.В. Брендаков**

Национальный исследовательский Томский государственный университет;  
Российская Федерация, г. Томск  
brend989@gmail.com

В работе рассмотрен процесс получения газообразного гексафторида вольфрама. На основе простой физической модели процесса фторирования металлического вольфрама записано уравнение, связывающее скорость химической реакции и изменение концентрации ключевого компонента по длине реакционной зоны.

Проведенные численные расчеты показали хорошее согласование с имеющимися экспериментальными данными. Выполнена статистическая обработка экспериментальных данных, построена регрессионная модель параметра скорости реакции фторирования, представляющая зависимость от температуры подводимого газа и размера частиц металлического вольфрама. Полученные результаты могут быть использованы при оптимизации работы существующих аппаратов и проектировании новых конструкций для осуществления процесса фторирования металлического вольфрама.

**THE MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS  
OF FLUORINATION OF TUNGSTEN**

**R.V. Brendakov**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
brend989@gmail.com

In this paper we consider the process of obtaining the tungsten hexafluoride gas. On the basis of simple physical model of the fluorination process of metal

tungsten written equation relating the rate of a chemical reaction and the change in concentration of a key component of the length of the reaction zone.

The numerical calculations showed good agreement with experimental data. A statistical analysis of the experimental data, constructed regression model parameter fluorination reaction rate, which represents the temperature dependence of the supplied gas and tungsten metal particle size.

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ПУЛЬСАРОВ**

**А.А. Гроховская**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
grohovskaya.a@gmail.com

В данной работе рассматривается идентификация кинематических параметров пульсаров из наблюдаемых величин мгновенной мощности излучения в рамках нелинейной задачи наименьших квадратов, которая сводится к минимизации функционала суммы квадратов невязок между измеренными и рассчитанными значениями профиля индикатрисы, в рамках нелинейной задачи наименьших квадратов. Сам метод построения периодических профилей основан на модели пульсарного излучения Радхакришнана и Кука, которая предполагает, что источником излучения пульсара являются потоки релятивистских частиц (джеты), исходящие из магнитных полюсов в направлении линий напряженности магнитного поля. Профиль излучения пульсара находится как линия пересечения поверхности индикатрисы, вращающейся вместе с нейтронной звездой, с неподвижным в пространстве лучом зрения наблюдателя.

## **MATHEMATICAL MODELING OF THE PULSAR RADIATION**

**A.A. Grokhovskaya**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
grohovskaya.a@gmail.com

The report reviews the definition of the kinematic parameters of the model of the pulsar radiation within a non-linear least squares problem. Finding the solution is performed iteratively by Gauss-Newton method. The parameters are determined from observed values of radiation instantaneous power for real pulsars.

# ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ВСПЛЫТИЯ ПОДВОДНЫХ СУДОВ В ЛЕДЯНОМ ПОКРОВЕ ПРИ ОГРАНИЧЕННОЙ ГЛУБИНЕ АКВАТОРИИ

**В.Л. Земляк**

Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема  
Российская Федерация, г. Биробиджан  
vellkom@list.ru

Использованы изгибно-гравитационные волны, возникающие при движении субмарины с определенной критической скоростью вблизи нижней поверхности льда [1]. Известно, что в прибрежных районах глубина акватории часто составляет менее 100 м. В работе выполнено экспериментальное исследование влияния глубины акватории на прогиб и длину изгибно-гравитационных волн. Эксперименты проводились в опытовом ледовом бассейне [2]. Модель ледяного покрова приготавливалась путем намораживания льда заданной толщины естественным холодом. Масштаб моделирования  $l_l=1-120$ . Толщина намораживаемого льда составляла  $h_m=3$  мм, что в пересчете на натуру равнялось  $h_n=1,95$  м. Глубина акватории моделировалась с помощью подвесного дна. Модель субмарины каплевидной формы имела характеристики, схожие с современными субмаринами, относительное удлинение  $L_m/V_m=8.4$ , где  $V_m$  – диаметр корпуса модели, и полное подводное водоизмещение после пересчета на натуру  $P_n=24000$  т. В процессе буксировки модели определялась скорость ее движения, и записывались профили взволнованной поверхности льда. В ходе экспериментов были определены зависимости параметров изгибно-гравитационных волн от рассматриваемых ледовых условий. Установлено влияние глубины акватории на величину критической скорости перемещения модели, при которой генерировались изгибно-гравитационные волны наибольшей интенсивности. Определен характер разрушения ледяного покрова. Выполнена оценка ледоразрушающей способности изгибно-гравитационных волн, с помощью критерия ледоразрушения. Выявлены режимы движения, при которых разрушение льда было наиболее интенсивным.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10097).

## Литература

1. Kozin V.M., Onishchuk A.G., Mar'in B.N. The Ice-Breaking Capacity of Flexural-Gravity Waves Produced by Motion of Objects / Dal'nauka, Vladivostok, 2005, P. 191.
2. Zemlyak V.L., Baurin N.O., Kurbackiy D.A. Laboratory "Ice technology" // Vestnik, Quart. J. of Amur State University after Sholom-Aleichem. 12(1), 2013. P. 75–84.

# **STUDY OF POSSIBILITY OF SUBMARINE VESSELS EMERGING IN THE ICE COVER AT A LIMITED DEPTH OF WATER AREA**

**V.L. Zemlyak**

Amur State University named after Sholom Aleichem  
Russian Federation, Birobidzhan  
vellkom@list.ru

Traditionally submarine vessels emerging from under ice cover performing by static loading of ice from below through the creation of positive buoyancy by main ballast tanks. However thickness of ice (approximately 1 meter) from under which modern submarine vessel can emerge essentially limits the use of traditional method, particularly during submarine vessels motion in the severe ice conditions of Arctic region. For breaking the ice cover of greater thickness can be used flexural gravity waves caused by the submarine vessel motion with certain critical speed near the bottom ice. It is known that in the coastal areas water depth is often less than 100 meters. This paper presents experimental study of influence of water depth on the deflection and the length of flexural gravity waves.

## **ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА ДНА НА ЛЕДОРАЗРУШАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ИЗГИБНО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ГЕНЕРИРУЕМЫХ ОТ ПОДЛЕДНОГО ДВИЖЕНИЯ ПОГРУЖЕННОГО ТЕЛА**

**Н.О. Баурин, В.Л. Земляк, К.И. Ипатов**

Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема  
Российская Федерация, г. Биробиджан  
vellkom@list.ru

Экспериментально установлено, что эффективность и характер разрушения ледяного покрова изгибно-гравитационными волнами, генерируемыми от движения погруженного тела, вблизи нижней поверхности льда может существенно зависеть от глубины акватории. В свою очередь на характер распространения волн может оказывать влияние наличие выступов и уступов на поверхности льда. В работе выполнено экспериментальное исследование влияния рельефа дна на прогиб и длину изгибно-гравитационных волн. Эксперименты проводились в опытовом ледовом бассейне [1]. Модель ледяного покрова приготавливалась путем намораживания льда заданной толщины естественным холодом. Масштаб моделирования  $l_l=1-120$ . Толщина намораживаемого льда составляла  $h_m=3$  мм, что в пересчете на натуру равнялось  $h_n=1,95$  м. Глубина акватории и рельеф дна моделировались с помощью отдельных подвесных секций переме-

щающихся в вертикальном направлении на заданную глубину. Секции подвешенного дна располагались на специальных вертикальных подъемниках, обеспечивающих возможность моделировать заданную высоту выступов. Модель погруженного тела каплевидной формы имела характеристики схожие с современными субмаринами, относительное удлинение  $L_m/V_m=8.4$ , где  $V_m$  – диаметр корпуса модели и полное подводное водоизмещение после пересчета на натуру  $P_n=24000$  т. В процессе буксировки модели определялась скорость ее движения и записывались профили взволнованной поверхности льда. В ходе экспериментов были определены зависимости параметров изгибно-гравитационных волн от рассматриваемых ледовых условий. Установлено влияние рельефа дна на величину критической скорости перемещения модели, при которой генерировались изгибно-гравитационные волны наибольшей интенсивности. Определен характер разрушения ледяного покрова. Выполнена оценка ледоразрушающей способности изгибно-гравитационных волн, с помощью критерия ледоразрушения. Выявлены режимы движения, при которых разрушение льда было наиболее интенсивным.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10097).

#### Литература

1. *Zemlyak V.L., Baurin N.O., Kurbackiy D.A.* Laboratory «Ice technology» // Vestnik, Quart. J. of Amur State University after Sholom-Aleichem. 12(1), 2013, p. 75–84.

### THE IMPACT OF BOTTOM CONTOUR OF ICE-BREAKING CAPACITY OF FLEXURAL-GRAVITY WAVES CAUSED IN THE ICE MOTION OF THE IMMersed BODY

**N.O. Baurin, V.L. Zemlyak, K.I. Ipatov**  
Amur State University named after Sholom Aleichem  
Russian Federation, Birobidzhan  
vellkom@list.ru

Experimentally determined that the effectiveness and failure pattern of ice cover caused by flexural gravity waves generated from the motion of submerged body near the bottom ice can greatly depend on the depth of the water area. In turn the presence of ledge on the ice surface may effect on the wave propagation pattern. This paper presents experimental study of influence of bottom contour on the deflection and the length of the flexural gravity waves.

# КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ФРОНТА И ПРОЦЕССОВ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ В СИСТЕМАХ С ТЕРМОБАРЬЕРНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

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

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН  
Российская Федерация, г. Томск  
dmitriy18197@gmail.com

Интенсивное развитие авиационной и космической техники, все более возрастающие требования к оборудованию в сталелитейной промышленности, ставят новые задачи по созданию материалов и конструкций, работающих в экстремальных условиях эксплуатации. В первую очередь это нанесение термобарьерных покрытий на материалы, применяющиеся при изготовлении сопел реактивных двигателей, фурм и кристаллизаторов доменных печей. Большие перепады температур, условия мощных термоударов при включениях реактивного двигателя или заливке расплава в кристаллизатор, приводят к растрескиванию и отслаиванию термобарьерного покрытия. Процесс отслаивания покрытия имеет весьма сложную природу и связан с различными процессами, взаимосогласованными на разных масштабных уровнях: теплоперенос, формирование градиентного поля напряжений вследствие различия КТР покрытия и подложки, перестройка внутренней структуры материала подложки, наличие ротационных мод деформации, и т.д. Эти задачи могут быть решены только в рамках комплексного многоуровневого подхода с использованием дискретно-континуальных методов моделирования.

Разработан дискретно-континуальный подход к моделированию распространения теплового фронта на базе метода возбудимых клеточных автоматов. Данный подход был развит для расчета полей термических напряжений и моделирования структурно-фазовых превращений. Метод был существенно расширен путем введения блока расчета локальных моментов сил на внутренних границах раздела.

Проведены исследования влияния циклической термомеханической нагрузки на одну из граней рассматриваемых образцов. Для исследования было выбрано два образца: у первого образца размер зерна 30 нм, у второго – 70 нм. Каждый образец промоделирован с помощью клеточного автомата с ГЦК упаковкой элементов размером 10 нм. Размеры образцов: 300 нм x 300 нм x 100 нм. Начальная температура каждого элемента задавалась равной 1000 К, начальные значения деформации и напряжения были нулевы-

ми. Величина временного шага – 0,0006 нс, общее время нагрузки – 60 нс. Верхняя грань образца подвергалась деформации со скоростью [0, –400] 1/с, одновременно с этим ей циклически сообщались температуры [1000, 1700] К, температура нижней грани была постоянно равна 1000 К.

Были получены картины эволюции структуры образцов, картины распределения напряжения, температуры, относительной энергии кручения и значения всех компонент угловых скоростей. Обнаружено, что рост зерен направлен вдоль распространения теплового потока в сторону формирования столбчатых структур, постепенно заполняющих весь образец. Показано, что мелкозернистая исходная структура задерживает фронт собирающей кристаллизации. Был проведен количественный анализ диссипирующей упругой энергии, запасенной в ходе неоднородного теплового расширения гетерогенного образца. Этот анализ показал, что в мелкозернистой структуре расход упругой энергии на формирование новых дефектных структур происходит более интенсивно по сравнению с крупнозернистым образцом.

Данные исследования могут служить основой для компьютерного конструирования новых функциональных материалов, работающих в условиях экстремальных тепловых и механических.

## **COMPUTER SIMULATION OF HEAT PROPAGATION AND RECRYSTALLIZATION IN MATERIALS WITH HEAT-RESISTANTS COATINGS**

**D.S. Babich, D.D. Moiseyenko, P.V. Maksimov, V.Ye. Panin, S.V. Panin**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
Federal State Institution of Science  
Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the RAS  
Russian Federation, Tomsk  
dmitriy18197@gmail.com

A discrete-continuous approach to modeling the propagation of a thermal-front on the basis of the method of excitable cell car-mats. Researches cyclic thermo-mechanical loading effect on one of the faces of the samples examined.

We were obtained picture of the evolution of structure of samples, pictures dis-bution voltage, temperature, relative energy of torsion and the values of all the components of the angular velocity. These studies may provide a basis for the computer-aided design of new functional materials-tional working under extreme thermal and mechanical

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКА СФОКУСИРОВАННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

**С.Н. Росляков**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, Томск  
serega\_1994\_0@mail.ru

Переменные магнитные поля имеют высокий потенциал применения в области неразрушающего контроля качества и системах досмотра [1,2]. К недостаткам данного вида интроскопии можно отнести: обнаружение только электропроводящих объектов, быстрое убывание поля с расстоянием, низкую разрешающую способность. В докладе предложен способ локализации магнитного поля с помощью системы катушек оригинальной формы. Все расчеты проведены в системе математического моделирования «Mathcad».

Ток в системе катушек рассматривался как суперпозиция множества элементарных вихревых токов. Требовалась подобрать такое распределение тока, которое локализовало суммарное распределение поля. Распределение элементарных вихревых токов вычисляется с помощью преобразования Фурье от вычисленного пространственного спектра:

$$p(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{p}(k_x, k_y) \exp(ik_x x + iyk_y) dx dy.$$

Известно, что при фокусировке волнового поля происходит многократное усиление поля в точке синфазного сложения волн и концентрации поля. В предложенном варианте, концентрация магнитного поля достигается за счёт подавления низких пространственных частот, что существенно уменьшает итоговую амплитуду поля. Однако за счёт увеличения амплитуды тока в источнике возможно решить эту проблему.

Достигнутый эффект отличается от фокусировки, тем что он не приводит к увеличению амплитуды поля, а напротив многократно её снижает.

Источники поля подобного типа могут найти применение в магнитоиндукционной томографии высокого разрешения. Малейшие искажения в распределении тока вызовут нарушение баланса и резкое возрастание низких пространственных частот в магнитном поле, что существенно ухудшает его концентрацию. Проблему нарушения баланса предлагается решить путем увеличения размеров и разрешения численной модели.

## Литература:

1. Иванчиков В.И. Вихревые токи и их магнитное поле у дефекта простейшей формы: дис. канд. физ.-мат. наук / В.И. Иванчиков. – Томск, 1950.
2. Kolyshkin A.A. Method of solution of forward problems in eddycurrent testing / A.A. Kolyshkin, R. Vaillancourt // Journal of Applied Physics. – 1995. - №77. - pp. 4909-4913.

## MODELING OF THE SOURCE OF A FOCUSED MAGNETIC FIELD

**S.N. Roslyakov**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
serega\_1994\_0@mail.ru

Magnetic induction tomography is one of the promising methods of tomography. This report provides a method of localizing a magnetic field by using the coil system which in its original form. All calculations are made in the system of mathematical modeling «Mathcad».

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОРИСТОСТИ НА РЕЖИМЫ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ЗАМКНУТОЙ ПОЛОСТИ, ЗАПОЛНЕННОЙ ЖИДКОСТЬЮ С ПЕРЕМЕННОЙ ВЯЗКОСТЬЮ

**М.А. Шерemet, М.С. Астанина**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
astanina.marina@bk.ru

В работе рассмотрен процесс теплопереноса в замкнутой пористой полости с изотермическими вертикальными и адиабатическими горизонтальными стенками при наличии двух локальных источников энергии постоянной температуры. При моделировании задачи была использована модель Дарси–Бринкмана.

Рассмотрено влияние параметров, отражающих структуру пористой среды – числа Дарси ( $0.00001 < Da < 0.01$ ) и пористости  $\epsilon$  ( $0.3 < \epsilon < 0.9$ ); остальные параметры (число Рэлея  $Ra$ , число Прандтля  $Pr$  и параметр изменения вязкости  $C$ ) считались неизменными.

Математическая модель построена на основе двумерных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных с использованием безразмерных переменных «функция тока – завихренность – температура». Полученные уравнения с соответствующими начальными и граничными условиями решались методом конечных разностей на равномерной сетке. В результате были получены распределения температуры, изолиний функции тока, а также зависимости среднего числа Нуссельта на поверхности источников энергии от определяющих характеристик.

## **ANALYSIS OF THE POROSITY EFFECT ON CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN AN ENCLOSURE, FILLED WITH A VARIABLE VISCOSITY FLUID**

**M.A. Sheremet, M.S. Astanina**  
National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
astanina.marina@bk.ru

Studies of convective heat and mass transfer within porous media are topical in the present time. For example, such approach allows to describe in the first approximation, cooling of electronic boards in different cavities with the presence of extrinsic objects (cables, wires). The effect of the porous structure on convective heat transfer in an enclosure having two heat sources of constant temperature and filled with a variable viscosity fluid has been examined in the present work. Distributions of streamlines and isotherms as well as profiles of average Nusselt number at heat source surfaces have been obtained.

## **РАЗМЕРНЫЙ СОСТАВ И СЧЁТНАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА В ВОДЕ ОЗЁР АЛТАЙСКОГО КРАЯ**

**К.Ю. Эккердт, В.И. Букатый**  
Алтайский государственный университет  
Российская Федерация, г. Барнаул  
ekkerdtk@gmail.com

Статья посвящена изучению влияния частиц взвеси в разнотипных озёрах Алтайского края в период 2014–2016 гг. Приведены данные о количественном составе полидисперсных частиц взвеси и их распределения по размерам, а также проведена оценка показателя рассеяния света и определен его спектральный вклад в суммарный показатель ослабления.

## **THE SIZE AND COMPOSITION OF THE AUDIT CONCENTRATION OF SUSPENDED MATTER IN WATER LAKES OF THE ALTAI TERRITORY**

**K.Yu. Ekkerdt, V.I. Bukatyy**  
Altai State University  
Russian Federation, Barnaul  
ekkerdtk@gmail.com

The paper studies the influence of suspended particles in different types of lakes in the Altai Territory in the period 2014–2016 gg. The data on the size of polydisperse suspension particles and their size distribution, as well as an as-

assessment indicator light scattering and defined its contribution to the total spectral attenuation.

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛН ЦУНАМИ С ОДИНОЧНЫМИ ПРЕГРАДАМИ**

**Б.В. Бошенятов, К.Н. Жильцов**

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики  
Томского государственного университета, Российская Федерация, г. Томск  
konstantin@niipmm.tsu.ru

Известно, что волны цунами являются одним из наиболее опасных и разрушительных бедствий, которым подвержено побережье Мирового океана [1]. Исследовать волны цунами в натуральных условиях практически не представляется возможным, поэтому для этой цели широко используются методы математического и численного моделирования. Эксперименты в наземных установках, как правило, отличаются высокой стоимостью, так как, чтобы приблизить параметры моделирования волн к натурным условиям, приходится создавать крупномасштабные (до 300 и более метров) и дорогостоящие сооружения. В работах [2, 3] показано, что, использование высокоточных методов измерения амплитуды волн [4] в сочетании с численным моделированием [5] позволяет с достаточной полнотой моделировать и исследовать многие проблемы волн цунами и в лабораторных установках относительно небольших размеров. В работе [6] приведены результаты исследований взаимодействия волн типа цунами с одиночными подводными преградами. Показано, что при определенных условиях вблизи подводной преграды возникают крупномасштабные вихревые структуры, которые аккумулируют значительную часть энергии падающей волны. При этом, если параметр преграды  $h/(H+A) = 0.84 \div 0.85$  ( $h$  – высота преграды,  $A$  – амплитуда падающей на преграду волны,  $H$  – глубина водоема), то в вихревых структурах аккумулируется до 50% от энергии падающей на преграду волны. В работе приведена зависимость относительных энергий волн от безразмерного параметра  $A/H$ , полученная путем численных расчетов в сопоставлении с данными экспериментов при условиях близких к расчетным при взаимодействии длинной волны с одиночной углубленной преградой. Использование явления аккумуляции энергии волн в вихревых структурах, вблизи подводной преграды, может служить основой для создания в будущем высокоэффективных подводных преград, значительно снижающих разрушительную силу волн цунами.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского Фонда Фундаментальных Исследований № 15-08-04097а, частичной поддержке в рамках Программы повышения конкурентоспособности ТГУ в рамках

НИР № 8.2.45.2015, частичной поддержке Министерства Образования Российской Федерации в рамках государственного задания №2014/223 (проект 1943).

### Литература

1. Левин Б.В., Носов М.А. Физика цунами и родственных явлений в океане. М.: Янус-К, 2005. 360 с.
2. Бошнятов Б.В., Попов В.В. Экспериментальные исследования взаимодействия волн типа цунами с подводными преградами // Изв. высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55, № 9/3. С. 145–150.
3. Бошнятов Б.В. Особенности моделирования волн цунами в лабораторной установке // Материалы XIX Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВСМПС'2015). 24–31 мая 2015 г. Алушта. М.: Изд-во МАИ, 2015. С. 384–385.
4. Бошнятов Б.В., Левин Ю.К., Попов В.В., Семянистый А.В. Метод измерения волн малой амплитуды на водной поверхности // ПТЭ. 2011. № 2. С. 116–117.
5. Бошнятов Б.В., Лисин Д.Г. Численное моделирование волн типа цунами в гидродинамическом лотке // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2013. № 6(26). С. 45–55.
6. Бошнятов Б.В. О подавлении волн цунами подводными преградами // ДАН. 2013. Т. 452. № 4. С. 392–395.

## NUMERICAL SIMULATION OF THE INTERACTION OF TSUNAMI WAVES WITH A SINGLE BARRIER

**B.V. Boshenyatov, K.N. Zhiltsov**

Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
konstantin@niipmm.tsu.ru

This article examines the experimental and numerical simulation of the processes of distribution and interaction of tsunami-type gravitational waves with single barrier. Mathematical modelling was carried out using two-dimensional non-stationary Navier-Stokes equations for an incompressible fluid using the freely available software package OpenFOAM. It is shown that for small-amplitude waves, when their advance speed is described by the linear theory of shallow water, the interaction with the underwater barriers has important non-linear and viscous effects. Our results explain why a single barrier has a significant impact on the power of the transmitted wave. The energy of the waves passing through the single barrier can be reduced to 50% of the incident wave.

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСКРОВОГО ЗАЖИГАНИЯ МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

**К.М. Моисеева, А.Ю. Крайнов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
Moiseeva\_KM@t-sk.ru

Численно решена задача об искровом зажигании метано-воздушной смеси. Целью исследования являлось определение минимальной энергии искрового зажигания метано-воздушной смеси в зависимости от объемного содержания метана. Задача ставилась при следующих допущениях: искра моделируется нитевидным мгновенным источником; граница области считается бесконечно удаленной; коэффициенты диффузии и теплопроводности газа зависят от температуры; учитывается тепловое расширение газа при повышении температуры и его движение; газовая постоянная определяется составом газовой смеси; константа скорости химической реакции зависит от температуры по закону Аррениуса, скорость реакции зависит от концентрации метана и кислорода и описывается кинетикой первого порядка по метану и первого порядка по кислороду. Исследование выполнено для смесей с объемным содержанием метана 5.5 ч 9.5 %. По результатам расчетов построена кривая, определяющая минимальную энергию искрового зажигания в зависимости от содержания метана в смеси.

## NUMERICAL SIMULATION OF THE SPARK IGNITION OF THE METHANE-AIR MIXTURE

**K. Moiseeva, A.Y. Kraynov**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
Moiseeva\_KM@t-sk.ru

The results of numerical research of the problem of the spark ignition of the methane-air mixture are presented. The aim of the study was to determine the minimum energy of the spark ignition of the methane-air mixture depending of the volume content of methane in the mixture. The study was carried out for the 5.5 ч 9.5% methane-air mixture. It is presented the curve which determines the minimum energy of the spark ignition depending of the volume content of methane in the mixture.

# **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В МАТЕРИАЛЕ СТАЛЬНОГО УЗЛА ВЕДЕНИЯ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ РАЗГОНЕ ПО КАНАЛУ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО РАЗГОННОГО КОМПЛЕКСА**

**Я.С. Зезюлинский, А.В. Гуськов, К.Е. Милевский**

Новосибирский государственный технический университет  
Российская Федерация, г. Новосибирск  
stroncyi@yandex.ru

Современные представления о стационарной детонации взрывчатых веществ (ВВ) основываются на гидродинамической модели Михельсона – Чепмена - Жуге (МЧГ) и её развитию – модели Зельдовича – Неймана – Дёринга (ЗНД) [1]. 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 диаметров и длин, в которых эти гипотезы могут нарушаться [2]. В данной работе численно моделируется процесс детонации малых цилиндрических зарядов малого диаметра и различной длины из взрывчатого вещества Comp В. Для моделирования используется пакет ANSYS AUTODYN 17.0. Анализируется процесс выхода детонационной волны на стационарный режим, формирование устойчивой кривизны фронта детонации, определяется критический диаметр зарядов.

## **Литература**

1. Физика взрыва / под. ред. Л.П. Орленко. 3-е изд., испр. и доп.: в 2 т. М.: Физматлит, 2004. 1488 с.
2. Распределение плотности во фронте детонации цилиндрических зарядов малого диаметра / К.А. Тен, О.В. Евдоков, И.Л. Жогин и др. // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43. № 2. С. 91.

# **NUMERICAL SIMULATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN MATERIAL OF STEEL CONDUCT NODE DURING HIGH-SPEED ACCELERATION THROUGH THE CHANNEL OF A BALLISTIC BOOSTER COMPLEX**

**Ya.S. Zezyulinskiy, A.V. Gus'kov, K.Ye. Milevskiy**

Novosibirsk State Technical University  
Russian Federation, Novosibirsk, stroncyi@yandex.ru

Numerical simulation of the temperature distribution in material of steel conduct node. The analysis of the obtained data confirming performance of the steel conduct node in high-speed acceleration.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАКРУТКИ НА ГИДРОДИНАМИКУ И ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ

**Н.И. Гичёва, Е.А. Дьяков**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
tashka-zenit@mail.ru

Развитие промышленности требует высокого качества используемых материалов. Большой интерес в различных областях индустрии представляют устойчивые к деформации, коррозии, высоким температурам тугоплавкие металлы. Одним из наиболее востребованных тугоплавких металлов является вольфрам. Оптимальным и перспективным методом его получения является химическое осаждение из парогазовой фазы путём восстановления гексафторида вольфрама водородом.

В работе представлено численное моделирование гидродинамики и теплопереноса жидкости в вихревой камере химического реактора с целью отслеживания влияния вращения потока для получения равномерного слоя вещества на подложке. Реактор имеет цилиндрическую форму, выпуск газов осуществляется через трубу на оси, а выпуск – через кольцевой канал на периферии камеры. Верхняя и нижняя стенка могут вращаться. Нижняя стенка нагревается, остальные – теплоизолированы. Описанные процессы могут быть математически формализованы с помощью уравнений Навье–Стокса, неразрывности, переноса тепла и массы.

Численное решение проводилось с использованием неявной обобщённой схемы переменных направлений в Д-форме [1]. Достоверность расчётов подтверждена сопоставлением различных способов решения, а также сравнением с известными аналитическими решениями. Получены распределения полей скорости, температуры, концентрации в вихревой камере, рассчитанные при различных параметрах течения. Результаты свидетельствуют о существенном влиянии закрутки на гидродинамику потока; показано выравнивание полей распределения температуры и концентрации при закручивании потока, что имеет большую практическую значимость для получения равномерных покрытий на подложке

## Литература

1. *Роуч П.* Вычислительная гидромеханика. М.: Мир, 1977. 618 с.

# RESEARCH OF THE ROTATION EFFECT UPON THE HYDRODYNAMICS AND HEAT AND MASS TRANSPORT IN A CHEMICAL REACTOR

**N.I. Gicheva, E.A. Dyakov**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
tashka-zenit@mail.ru

In this paper a physical and mathematical model of fluid motion and heat transfer in a chemical reactor for producing tungsten has been described and simulated using two methods. The velocity field and the temperature and mass distribution in the reactor were obtained. Parametric studies on effects of the Reynolds, Prandtl and Rossbi criteria on the flow characteristics were also performed. The influence of a rotation effect upon the hydrodynamics and heat and mass transport was showed. Reliability of the calculations was verified by comparing the results obtained by the different methods. Also, the created model was applied for numerically solving the classical test problems and the study findings showed a good agreement with the exact solutions.

## ДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН ГРАНУЛИРОВАННОЙ СРЕДЫ В КОЛЬЦЕВОМ БУНКЕРЕ

**Е.А. Дьяков, Н.И. Гичёва**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
diakowegor@mail.ru

В настоящее время в различных отраслях промышленности, например химической, сельском хозяйстве, металлургии, широко используются и создаются новые порошковые и гранулированные материалы, такие как лекарственные средства, минеральные удобрения, пластмассы и т.п. Производство таких материалов связано с процессами сушки, смешения, транспортировки. Важной частью одного из устройств, в котором осуществляются эти процессы является кольцевой бункер.

В данной работе представлено численное моделирование динамики и теплообмена течения гранулированной среды в кольцевом бункере. Течение и теплоперенос среды в бункере могут быть описаны системой уравнений в цилиндрической системе координат для осесимметричного случая, включающей уравнения Навье – Стокса, уравнение неразрывности [1], уравнение переноса тепла [2]. Численное решение реализовывалось двумя методами в переменных «функция тока – вихрь» и физических переменных «скорость – давление» [3]. Для численного решения уравнений ис-

пользовалась неявная обобщённая схема переменных направлений в «дельта» – форме [4]. Решение проводится на разнесённой сетке с использованием контрольного объёма. Конвективные и диффузионные слагаемые описываются с использованием экспоненциальной схемы.

Достоверность полученных результатов подтверждается сопоставлением методов между собой и сравнением с экспериментальными данными.

В работе проводилось исследование влияния критериев Рейнольдса, Прандтля и безразмерного коэффициента скольжения на распределение изолиний тока и температуры.

#### Литература

1. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
2. *Ландау Л.Д.* Теоретическая физика. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. М.: Наука, 1986. 736 с.
3. *Chorin A.J.* Numerical solution of Navier – Stokes equation // Math. Comput. 1968. Vol. 22. P. 745–762.
4. *Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р.* Вычислительная гидромеханика и теплообмен. М.: Мир, 1990. Т. 2. 337 с.

## THE DYNAMICS AND HEAT TRANSFER OF A GRANULAR MEDIUM IN AN ANNULAR HOPPER

**E.A. Dyakov, N.I. Gicheva**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
diakowegor@mail.ru

In the research work deals with the modeling of processes dynamics and heat transfer flow of a granular medium in the annular hopper. The solution is carried out by two methods in the variables «vortex – stream function» and the physical variables «velocity – pressure». The reliability of the results is checked by comparison of the methods among themselves. The obtained results can be applied in the field of drying and mixing granular materials.

# **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ АВТОНОМНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ НИЗКОЛЕТАЮЩЕГО ИСЗ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС**

**Е.В. Блинкова**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
zbizk322@mail.ru

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования задачи определения и прогнозирования орбиты низколетящего ИСЗ по измеренным расстояниям от этого спутника до спутников системы ГЛОНАСС. Математическая модель решения этой задачи построена в предположении, что движение всех рассматриваемых объектов является возмущенным и прогнозируется с помощью программы «Численной модель движения ИСЗ». В процессе численного интегрирования для всех спутников учитываются возмущения от несферичности геопотенциала. Кроме того, для взятого низколетящего ИСЗ учитываются возмущения от сопротивления атмосферы Земли, а для спутников ГЛОНАСС – лунно-солнечные возмущения. Анализируются следующие данные: быстродействие метода решения задачи улучшения орбиты, скорости сходимости процесса в зависимости от точности начальных данных и интервала охваченного измерениями. Оценивается зависимость длины временного интервала высокоточного прогнозирования (вперед) от длины интервала, охваченного измерениями.

## **SIMULATION PROBLEMS AUTONOMOUS PREDICT THE MOVEMENT OF LOW-FLYING SATELLITES SOFTWARE MEASUREMENT SYSTEM GLONASS**

**E.V. Blinkova**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
zbizk322@mail.ru

This paper presents the results of numerical modeling problems of definition and forecasting of low-flying satellites orbit by measuring the distance from the satellite to the GLONASS satellites. A mathematical model to solve this problem is based on the assumption that the motion of all the objects under consideration is disturbed and it is predicted using the program "numerical motion model of the satellite." In the process of numerical integration for all satellites are recorded perturbations from non-sphericity of the geopotential. In addition, to take into account the perturbations nizkoletyaschegoISZ taken from the resistance of Earth's atmosphere, and for GLONASS satel-

lites - the lunar-solar perturbations. Analyzes the following data: the performance of the method of solving the problem of improving the orbit, the process of convergence rate, depending on the accuracy of the initial data and dimensions covered by the interval. We estimate the dependence of the length of high-precision time interval prediction (forward) from the length of the interval covered by the measurements.

## **СИНТЕЗ И СВОЙСТВА АЛЮМОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ**

**А.П.<sup>1</sup> Хрусталёв, А.В.<sup>1</sup> Кветинская С.А. Ворожцов<sup>1,2</sup>**

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

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

Российская Федерация, г. Томск

tofik0014@mail.ru

Цель исследования – изучение фазового состава, параметров тонкой кристаллической структуры и механических свойств алюмоматричных композиционных материалов, полученных методом горячего прессования с различной температурой и продолжительностью изотермической выдержки. Для синтеза композитов использована смесь порошка алюминия (размер частиц ~ 700 нм) и порошка углерода в виде детонационных нанодIAMAZOV (размер ~ 4 нм).

Было показано, что после горячего прессования формируется наноразмерная фаза карбида алюминия (размер кристаллитов ~ 25 нм). Плотность горячепрессованных композитов составляет 2.2ч2.37 г/см<sup>3</sup>. Прочность композитов при изгибе составляет от 350 до 480 МПа. В непористом состоянии, прочность алюмоматричных композиционных материалов может достичь ~ 920 МПа.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», соглашение № 14.578.21.0025 (Уникальный идентификатор RFMEF I57814X0025).

# SYNTHESIS AND PROPERTIES ALUMINUM MATRIX COMPOSITE OBTAINED BY HOT PRESSING

**A.P. Khrustalyov<sup>1</sup>, Kvetinskaya A.V.<sup>1</sup>, S.A. Vorozhtsov<sup>1,2</sup>**

National Research Tomsk State University

<sup>2</sup> Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of RAS

Russian Federation, Tomsk

tofik0014@mail.ru

The purpose of this study is to investigate the phase composition, parameters of fine crystalline structure and mechanical properties of aluminum-based composites, produced by hot pressing with different synthesis temperatures and isothermal times. For synthesis of composites we used powder mixture of aluminum (particles size 700 nm) and carbon powder in a form of nanodiamonds (size 4 nm). It has been shown that after hot press processing a nanophase (crystallites size 25 nm) of aluminum carbide was formed.

Regardless of the synthesis temperature for the maximum holding time of powder mixtures, the density of hot-pressed compacts is about 2.2–2.37 g/cm<sup>3</sup>. In particular, the value of bending strength of composite samples with a density of 2.37 g/cm<sup>3</sup> ranges from 350 to 480 MPa. In the nonporous state, the bending strength of the composites may reach 920 MPa.

The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of Russian Federation within the framework of the Federal Target Program. Agreement No. 14.578.21.0025 (Unique identifier RFMEFI 57814X0025).

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА AL-4%CU С НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ЧАСТИЦАМИ

**А.П.<sup>1</sup> Хрусталёв, С.А. Ворожцов<sup>1,2</sup>, А.В.<sup>1</sup> Кветинская**

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

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

Российская Федерация, г. Томск

tofik0014@mail.ru

Целью работы является анализ механических свойств полученных алюминиевых сплавов, с выявлением механизма пластической деформации при внедрении в мягкую алюминиевую матрицу твёрдых неметаллических частиц. Анализ микроструктуры полученных сплавов показал, что введение частиц (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiB<sub>2</sub>, TiC) приводит к уменьшению размера зерна сплавов с 339 до 174 мкм, при этом остаточная пористость не превышает 2%. Проведённые испытания на растяжение показали, что варьирование типа и

количества частиц, изменяет картину прерывистой текучести, при этом способствуя увеличению предела текучести (с 18 до 40 МПа) и уменьшению пластичности (с 15 до 2 %), кроме этого значительно увеличивая предел прочности (с 77 до 130 МПа), относительно исходного сплава Al-4% Cu.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.», соглашение № 14.578.21.0025 (Уникальный идентификатор RFMEFI57814X0025).

## **MECHANICAL PROPERTIES ALUMINUM MATRIX COMPOSITE AL-4%CU WITH NON-METALLIC PARTICLES**

**A.P. Khrustalyov<sup>1</sup>, S.A. Vorozhtsov<sup>1,2</sup>, Kvetinskaya A.V.<sup>1</sup>**

National Research Tomsk State University

<sup>2</sup> Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of RAS  
Russian Federation, Tomsk  
tofik0014@mail.ru

The purpose in this work is to analysis of the mechanical properties and deformation behavior of aluminum alloy, with the identification of mechanism plastic deformation when introducing into the soft aluminum matrix of solid non-metallic micro and nano particles. The analysis microstructure of the obtained alloys showed that the introduction of particles ( $Al_2O_3$ ,  $TiB_2$ ,  $TiC$ ) leads to a decrease grain size of alloys from 350 to 170 nm, while residual porosity not more than 2%. Carried out tensile tests have shown that varying type and amount of the particles changes the picture intermittent flow, thus resulting to increase the yield strength (from 18 to 40 MPa) and a decrease in ductility (from 15 to 2%). besides this significantly increasing tensile strength (from 77 to 130 MPa), a relatively to an Al-4% Cu initial alloy.

The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of Russian Federation within the framework of the Federal Target Program. Agreement No. 14.578.21.0025 (Unique identifier RFMEFI57814X0025).

# **ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРОНИКНОВЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО РАСПЛАВА В АГЛОМЕРАТЫ СУБМИКРОННЫХ ЧАСТИЦ**

**А.П. Хрусталёв<sup>1</sup>, С.А. Ворожцов<sup>1,2</sup>, А.В. Кветинская<sup>1</sup>,  
О.Б.<sup>1,3</sup> Кудряшова**

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

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

Российская Федерация, г. Томск

<sup>3</sup>Институт проблем химико-энергетических технологий (ИПХЭТ) СО РАН

Российская Федерация, г. Бийск

В данной работе на основе теории акустической кавитации и капиллярных явлений рассматриваются процессы деагломерирования и смачиваемости субмикронных частиц в расплаве металла при ультразвуковой обработке. Получены основные зависимости, связывающие время воздействия с физико-химическими свойствами частиц и расплава, а также с характеристиками акустического излучения. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных значений времени ультразвуковой обработки расплава алюминия, содержащего субмикронные частицы оксида алюминия, и установлена согласованность полученных результатов.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», соглашение № 14.587.21.0019. (Уникальный идентификатор RFMEFI 58715X0019).

## **THE INFLUENCE OF ULTRASOUND TREATMENT ON THE PENETRATION METAL MELT INTO AGGLOMERATES SUBMICRON PARTICLES**

**A.P. Khrustalyov<sup>1</sup>, S.A. Vorozhtsov<sup>1,2</sup>, A.V.<sup>1</sup> Kvetinskaya,  
O.B. Kudryashova<sup>1,3</sup>**

National Research Tomsk State University

Russian Federation, Tomsk

<sup>2</sup> Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch  
of Russian Academy of Sciences

Russian Federation, 634055, Tomsk, pr. Academic, 2/4

<sup>3</sup> Institutes of the problems chemist-energy technology (IPHET) WITH WOUNDS

Russia-ская Federation, Biysk

Based on the theory of acoustic cavitation and capillary phenomena, the article considers the processes of deagglomeration and wetting of submicron parti-

cles in a metal melt under ultrasound exposure. Basic dependences were found that link the exposure time to the physical and chemical properties of particles and melt, and to acoustic radiation characteristics. Experimental and calculated time values of ultrasonic treatment of aluminum melt containing submicron particles of aluminum oxide were compared, and the obtained results were found satisfactorily fit.

The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of Russian Federation within the framework of the Federal Target Program. Agreement No. 14.587.21.0019 (Unique identifier RFMEFI58715X0019).

## **ДЕАГЛОМЕРАЦИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТИЦ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ РАСПЛАВЕ**

**А.П. Хрусталёв<sup>1</sup>, С.А. Ворожцов<sup>1,2</sup>, А.В.Кветинская<sup>1</sup>, О.Б. Кудряшова<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН  
Российская Федерация, г. Томск

<sup>3</sup>Институт проблем химико-энергетических технологий (ИПХЭТ) СО РАН  
Российская Федерация, г. Бийск

В работе рассматриваются процессы деагломерации и распределения частиц в металлическом расплаве в ультразвуковом поле. Рассмотрены основные зависимости, касающиеся времени обработки, физических и химических свойств частиц и жидкости, а также характеристика ультразвука. Было установлено, что время ультразвуковой обработки расплава, содержащего агломераты частиц пропорционально вязкости расплава и размеру агломератов.

Предложенное в работе уравнение позволяет оценить интенсивность ультразвукового излучения, необходимого для разрушения агломератов частиц в расплаве. Было установлено, что интенсивность ультразвука должна быть обратно пропорциональна радиусу агломератов.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», соглашение № 14.578.21.0098 (Уникальный идентификатор RFMEFI57814X0098).

## DEAGGLOMERATION AND DISPERSION PARTICLES IN METAL MELT

**A.P. Khrustalyov<sup>1</sup>, S.A. Vorozhtsov<sup>1,2</sup>, A.V.<sup>1</sup> Kvetinskaya,  
O.B. Kudryashova<sup>1,3</sup>**

National Research Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk

<sup>2</sup> Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch  
of Russian Academy of Sciences;

Russian Federation, Tomsk

<sup>3</sup> Institutes of the problems chemist-energy technology (IPHET) WITH WOUNDS  
Russian Federation, Biysk

This work considers the deagglomeration and wettability of particles by metal melt and proposes a mechanism of particle agglomerate dispersion by ultrasonic cavitation. The main dependences connecting the processing time and intensity with the physical and chemical properties of particles and the melt as well as acoustic parameters are obtained. It has been established that time ultrasonic treatment melt containing the particles agglomerates is proportional to melt viscosity and the size of the agglomerates.

The suggested equation allows estimating the intensity of ultrasonic radiation, required to destroy the agglomerates of particles in the melt. It was found that intensity of the ultrasound must be inversely proportional to the radius of the agglomerates.

The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of Russian Federation within the framework of the Federal Target Program. Agreement No. 14.578.21.0098 (Unique identifier RFMEFI57814X0098).

## ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ ДЕФОРМАЦИИ

**Е.В. Далингер, А.А. Козулин, В.А. Красновейкин**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск  
lena324938@mail.ru

С использованием экспериментальных методов и численного моделирования проводили исследования особенностей упруго-пластического поведения образцов из легкого алюминиевого сплава 1560 в условиях высокоскоростных нагружений. Получение новых данных о механическом поведении материалов в условиях динамического поведения возможно с использованием современных методов испытаний [1]. Для этого методами

высокоскоростного растяжения и глубокой вытяжки плоских образцов были получены зависимости упруго-пластического поведения алюминиевого сплава 1560 при скоростях деформации от 0.001 до 250 1/с. Экспериментальные работы проведены с использованием оригинальной оснастки универсального сервогидравлического испытательного стенда Instron 8800 модель VHS 40/50-20.

Экспериментальные данные, полученные при высокоскоростном растяжении, легли в основу методики определения коэффициентов уравнений численных моделей, описывающих упругопластическое поведение и разрушение алюминиевого сплава 1560 [2]. Для верификации созданной физико-математической модели и ее коэффициентов дополнительно решали задачу о моделировании сложнапряженного состояния сплава в условиях глубокой вытяжки при скоростях нагружения 5, 7.5, 10, 20 м/с. Из сравнения деформационных зависимостей, полученных при всех скоростях, получено качественное и количественное согласие экспериментальных и расчетных данных на участках упругого, пластического поведения и разрушения – это говорит о правильном выборе определяющих соотношений и уравнения разрушения, достоверности определения их коэффициентов.

Результаты исследований свидетельствуют о различных физических механизмах, определяющих закономерности упрочнения, пластического течения и скоростной чувствительности при квазистатических и динамических воздействиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-5914.2016.1.

#### Литература

1. 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.
2. Скрипняк Е.Г., Скрипняк Н.В., Козулин А.А., Скрипняк В.А. Моделирование влияния наноструктурированного поверхностного слоя на механическое поведение алюминиевых и магниевых сплавов при динамических воздействиях // Изв. высших учебных заведений. Физика. 2010. Т. 53. № 12 (2). С. 235–242.

## ELASTOPLASTIC PROPERTIES OF ALUMINIUM ALLOYS AT HIGH STRAIN RATES

**E.V. Dalinger, A.A. Kozulin, V.A. Krasnoveikin**

National Research Tomsk State University

Russian Federation, Tomsk

lena324938@mail.ru

The data by testing of planar samples of contemporary aluminum alloys under high-speed punch are received. The data has been processed in order to reveal the peculiarities of material deformation at high speed loadings. For de-

scribing the physico-mathematical behavior of the sample material the models of elasto-plastic body were used, which consider the work hardening and the influence of a strain rate on the flow stress. The factors revealed which should be taken into account within the limits of a representation model.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ**

**В.Д. Алиев<sup>1</sup>, А.С. Нарикович<sup>2</sup>, Е.В. Далингер<sup>1</sup>, С.С. Кульков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Национальный исследовательский  
Томский государственный университет  
Российская Федерация, г. Томск

<sup>2</sup> Балтийский федеральный университет им. И. Канта  
Российская Федерация, г. Калининград  
Voldemar4ik@mail.ru

В работе показана возможность исследования дефектности внутренней структуры керамических образцов на основе  $ZrO_2$ – $MgO$ , определения пористости, оценки поврежденности и микротрещин после нагружения и разрушения [1]. Для проведения исследований использовали методы современной рентгеновской томографии с использованием томографа Y.Cheetah фирмы YXLON. При правильном подборе режимов сканирования метод позволяет провести заявленные научные исследования структуры материалов с требуемой точностью. Результатом рентгеновской томографии является цифровое трехмерное изображение объекта в виде воксельной модели, с помощью которой можно получить вид любой поверхности или внутреннего сечения.

Для проведения исследований изготовлены призматические образцы размером 40х6х5 мм, в количестве достаточном для проведения экспериментов и статистической обработки. Образцы получены из мелкокристаллического порошка системы  $ZrO_2$  стабилизированного  $MgO$  методом прессования и последующего высокотемпературного спекания прессовок при температуре 1600 °С и выдержке 1 час.

Внутренняя структура исследуемых образцов представлена наличием агломератов размерами до 1.5 мм, неравномерным распределением сферических пор и микротрещин. Определено, что образцы после спекания обладали пористостью в диапазоне около 30%. Оценивая дефектность внутренней структуры после механических испытаний методом трехточечного изгиба [2], установлено, что множественные микротрещины локализуются в окрестностях агломератов, огибают или замыкаются на них. Агломераты препятствуют дальнейшему распространению трещин, увеличивая конструкционную прочность изделия.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-33-51165 мол\_нр.

### Литература

1. Козулин А.А., Нарикович А.С., Алиев В.Д., Лейцин В.Н., Кульков С.Н. Исследования прочностных свойств циклической долговечности при изгибе и характера накопления повреждений циркониевой керамики // Изв. высших учебных заведений. Физика. 2016. Т. 59. № 7/2. С. 108–112.

2. Козулин А.А., Скрипняк Е.Г., Скрипняк В.А. Трещиностойкость оксидных керамических композитов с трансформационным упрочнением при квазистатических и динамических условиях нагружения // Изв. высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 7–2. С. 81–85.

## AN INVESTIGATION OF INTERNAL STRUCTURE OF CERAMICS BY X-RAY TOMOGRAPHY METHODS

V.D. Aliev<sup>1</sup>, A.S. Narikovich<sup>2</sup>, E.V. Dalinger<sup>1</sup>, S.S. Kulkov<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Immanuel Kant Baltic Federal University  
Russian Federation, Kaliningrad  
Voldemar4ik@mail.ru

It is suggested that a non-destructive testing technique using a three-dimensional X-ray tomography be applied to detecting internal structural defects and monitoring damage formation in a ceramic composite structure. The assintered specimens are found to have a porosity of about 30%. The specimen after test has structural defects, microdamage, and cracks in the fracture zone. The internal structural defects of the test specimen are represented as dense agglomerates of zirconia of size up to 1.5 mm. Longitudinal and transverse cracks are located in the agglomerate surrounding area. The agglomerates prevent further crack growth thus increasing the structural strength of the specimen.

## ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ НИТРИДСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ТИТАНОВЫХ ПОДЛОЖКАХ

А.А. Козулин<sup>1</sup>, Е.В. Далингер<sup>1</sup>, С.А. Кинеловский<sup>2</sup>, С.С. Кульков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Томский государственный университет, Томск

<sup>2</sup>Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН  
Российская Федерация, Новосибирск  
kozulyn@ftf.tsu.ru

Целью настоящей работы было исследование особенностей формирования нитридных покрытий из смесей различных солей, содержащих легкие химические элементы, на титановых подложках с использованием высоко-

энергетического кумулятивного синтеза. Это направление исследований является актуальным и перспективным с точки зрения создания новых композиционных покрытий на поверхностях конструкционных сплавов с повышенными теплофизическими и физико-механическими свойствами [1].

Для достижения поставленной цели проведены эксперименты по получению и исследованию сверхтвердых композиционных покрытий на основе специально приготовленных смесей из комплексных солей и наноструктурных порошков с использованием кумулятивного синтеза. В состав исходных смесей для синтеза входили следующие компоненты, содержащие атомы азота, углерода, бора:

- опыт 1 (красная кровяная соль  $K_3(Fe(CN)_6)$  (ККС)) + (желтая кровяная соль  $K_4(Fe(CN)_6)$  (ЖКС)) + порошок карбида бора  $B_4C$ ;
- опыт 2 (оксалат аммония –  $(NH_4)_2C_2O_4$ ) + (МУНТ – многослойные углеродные нанотрубки) + порошки бора.

На основе результатов рентгеновских методов анализа химического и структурнофазового составов во всех опытах, выявлено, что покрытия являются многофазными. В опыте 1 основными зафиксированными кристаллическими фазами в покрытиях являются: нестехиометрический оксид титана с кубической кристаллической решеткой ( $TiO_x$ ) – основной вклад; альфа-титан ( $\alpha-Ti$ ); альфа-железо ( $\alpha-Fe$ ). При этом существенное присутствие железа на поверхности титановой подложки объясняется разложением ККС и ЖКС. Определено присутствие значительного количества диборида титана ( $TiB_2$ ) ГПУ-фазы. Ожидаемого присутствия азота, углерода и их соединений не зафиксировано.

Покрытия, полученные на образцах в опыте 2, характеризуются большим количеством карбонитридной ( $Ti_2CN$ ) и нитридной ( $TiN$ ) кубической фазы титана, нестехиометрического состава. Титан в покрытии представлен альфа-титаном исходной ГПУ-фазы. Кроме этого зафиксировано присутствие небольшого количества диборида титана ГПУ-фазы. Все фазы имеют малый размер структурных составляющих – не более 80 нм. Присутствие боридов фиксируется в малом количестве на рентгенограммах всех исследуемых образцов. Разделение карбонитридной и нитридной фазы титана в разных образцах основано на степени содержания азота и углерода в материале покрытия. В покрытиях с преобладанием нитридной фазы содержание углерода минимально – доли процента.

Обобщая результаты исследований, можно сделать основные выводы, что отсутствие исходных соединений в поверхностях подложек говорит о том, что все они в условиях кумулятивного взрыва (высокие давления и температуры) разложились на составляющие элементы. В экстремальных условиях продукты разложения солей вступили в реакцию с химическими элементами материала подложек и образовали новые высокопрочные соединения на их поверхностях. Исходя из целей работы, наилучший эффект кумулятивного синтеза достигнут в опыте 2, когда были образованы нит-

риды, карбонитриды титана, ставшие основой композиционного покрытия. Образованные в покрытии новые соединения близки к сверхтвердым, тугоплавким и износостойким материалам [2], что, в целом, должно повысить функциональные свойства обрабатываемого титанового сплава.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-33-50229 мол\_нр.

#### Литература

1. Кинеловский С.А., Козулин А.А., Кульков С.С., Маевский К.К. Кумулятивный синтез высокотвердых покрытий при разложении соединений на основе легких элементов // Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин). 2015. Т. 18. № 2 (60). С. 33–45.

2. Шинкевич Е.В., Рот Л.О., Ильин А.П. Получение нитридов титана, циркония и гафния при горении в воздухе нанопорошка алюминия в смесях с диоксидами // Изв. Томского политехнического университета. 2013. Т. 323. № 3. С. 60–65.

## SYNTHESIS AND INVESTIGATION OF NITRIDE-BASED COATINGS ON TITANIUM SUBSTRATES

**A.A. Kozulin<sup>1</sup>, E.V. Dalinger<sup>1</sup>, S.A. Kinelovskii<sup>1</sup>, S.S. Kulkov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University

Russian Federation, Tomsk

<sup>2</sup>Lavrentyev Institute of Hydrodynamics Siberian Branch of RAS

Russian Federation, Novosibirsk

kozulyn@ftf.tsu.ru

In this paper, nitride-based coatings obtained by the cumulative synthesis on surfaces of titanium substrates have been investigated. Cumulative synthesis was carried out using mixtures with nanopowders containing of boron atoms and specially prepared complex salts containing of nitrogen and carbon atoms. Studies of coatings included X-ray phase analysis and X-ray fluorescent analysis.

## ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО АЛЮМИНИЙ-МАГНИЕВОГО СПЛАВА, ПОЛУЧЕННОГО ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ

**В.А. Красновейкин, А.А. Козулин, В.А. Скрипняк, Е.Н. Москвичев**

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Российская Федерация, Томск

kozulyn@ftf.tsu.ru

Представлены результаты исследования влияния интенсивной пластической деформации (ИПД), реализованной по схеме ортогонального рав-

ноканального углового прессования (РКУП) по маршруту  $B_C$  при повышенных температурах, на структуру и физико-механические свойства легкого конструкционного алюминий-магниевого сплава 1560. Изменение его физико-механических свойств вследствие модификации внутренней структуры является направлением для повышения эффективности механизмов в авиационной, автомобильной и космической промышленности.

Химический элементный и рентгеноструктурный анализ материала показали, что в процессе обработки в нем не происходит химических реакций и фазовых превращений.

Исследования структуры и текстуры материала проводили с использованием анализа картин дифракции отраженных электронов. Структура исходного крупнокристаллического сплава 1560 представлена бимодальным распределением размеров зерен в диапазоне от 2 до 400 мкм, при среднем размере зерна 50 мкм. После 4 проходов РКУП при оптимальном режиме, в объеме образца формируется более однородная УМЗ-структура со средним размером зерна 3 мкм. При обработке прямых полюсных фигур видно, что в состоянии поставки наблюдается симметричная кубическая текстура с рассеянием вдоль  $Y$ , которая в результате РКУП сменяется текстурой  $\{110\} \langle 001 \rangle$ , симметричной относительно  $X$ . Перпендикулярное им направление в исходном состоянии имеет отчетливую кубическую составляющую, которая после обработки размывается.

Величина микротвердости после 4 проходов РКУП увеличилась в среднем на 50 % во всем объеме образцов при исходной не превышающей 1000 МПа.

Испытания на одноосное растяжение плоских образцов при скорости деформации 0.001 1/с показали, что после 4 проходов РКУП увеличился условный предел текучести с 150 до 270 МПа и предел прочности с 320 до 460 МПа. Значение предельной деформации до разрушения при этом уменьшается с 0.25 до 0.16.

Таким образом, при обработке ИПД исследуемого сплава 1560 по схеме РКУП уже после четырех проходов происходит значительное изменение их физико-механических свойств в результате уменьшения средних размеров зерен во всем объеме образцов. Эффект повышения прочностных характеристик после обработки интенсивной пластической деформацией характерен для алюминиевых сплавов [1], обработанных по различным методикам ИПД.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-5914.2016.1.

#### Литература

1. Москвичев Е.Н., Скрипняк В.А., Лычагин Д.В., Козулин А.А. Формирование текстур сплава 1560 при интенсивной пластической деформации // Вестн. Тамб. ун-та. Сер.: Естественные и технические науки. 2016. Т. 21. № 3. С. 1180–1183.

# **PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF ULTRAFINE-GRAINED Al-Mg-BASED ALLOY PRODUCED BY SEVERE PLASTIC DEFORMATION**

**V.A. Krasnoveikin, A.A. Kozulin, V.A. Skripnyak, E.N. Moskvichev**

National Research Tomsk State University

Russian Federation, Tomsk

volodia74ms@yandex.ru

As a result of severe plastic deformation the influence of structural changes was investigated in the samples made of Al-Mg-based light alloy in the presented research work. Mechanical properties of material was investigated experimentally in quasi-static uniaxial tensile tests at a speed of deformation of 0.001 1/s in the as-received condition and after severe plastic deformation by equal-channel angular pressing. Change of microhardness value has been determined in a sample after four cycles of pressing in comparison with a sample in as-received condition. It was determined that after four treatment cycles, yield strength and fracture resistance of alloy increased in 1.8 and 1.4 times, respectively, and microhardness value increased in ~ 1.5 times.

## **ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ДЛЯ ИНЖЕНЕРОВ ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ «РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ» В РАМКАХ КОНЦЕПЦИИ CDIO**

**Е.С. Селиверстова**

Национальный исследовательский Томский государственный университет;

Российская Федерация, г. Томск

laxisedi@mail.ru

В связи с переходом на новую инновационную модель рыночной экономики работодатели предъявляют все более высокие требования к качеству подготовки профессиональных кадров. Современные образовательные стандарты в свою очередь требуют от вузов и преподавателей строить учебные программы на основе развития необходимых компетенций у студентов. Необходимость разработки новых методик в процессе обучения будущих инженеров связана с тем, что техническое образование имеет ряд существенных отличий от бакалавриата. В частности упор в образовательных программах делается на практическую часть обучения. По мнению автора, одной из таких современных образовательных методик является концепция CDIO (Conceive, Design, Implement, Operate), разработанная в MIT с участием ученых, представителей промышленности, инженеров и студентов конца 90-х гг. Несмотря на то, что с момента ее разработки прошло

больше двух десятилетий, сегодня она является как никогда актуальной и необходимой.

## **LABORATORY PRACTICAL WORK FOR ENGINEERS IN "RADIO-ELECTRONIC SYSTEMS AND COMPLEXES" WITHIN THE CONCEPT OF CDIO**

**E.S. Seliverstova**

National Research Tomsk State University;  
Russian Federation, Tomsk  
laxisedi@mail.ru

Now, in connection with transition to new innovative model of market economy employers place more and more quality requirements of preparation of a professional personnel. Modern educational standards, in turn, demand from higher education institutions and teachers in particular, to build training programs on the basis of development of necessary competences in students. Need of development of new techniques for training process of future engineers is connected with the fact that a number of essential differences from a bachelor degree has technical education. In particular, emphasis in educational programs is placed on a practical part of training. According to the author, one of such modern educational techniques is the concept of CDIO (Conceive, Design, Implement, Operate) developed in MIT with participation of scientists, representatives of the industry, engineers and students in the late nineties. In spite of the fact that from the moment of its development there passed more than two decades, today, it is very urgent and necessary.

Секция 6  
**МАТЕМАТИКА, ФИЗИКА И ИНФОРМАТИКА  
ДЛЯ ШКОЛЬНИКОВ (ШКОЛЬНАЯ СЕКЦИЯ)**

---

---

Session 6  
**MATHEMATICS, PHYSICS AND COMPUTER SCIENCE  
FOR YOUNG RESEARCHERS AND STUDENTS OF  
SECONDARY SCHOOLS AND LYCEUMS**

**РАЗОГРЕВ СФЕРИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ  
В ВАКУУМЕ КОРОТКИМИ ИМПУЛЬСАМИ ОСНОВНОЙ  
ГАРМОНИКИ НЕОДИМОВОГО ЛАЗЕРА**

**Г.А. Каленский**

Городской классический лицей;  
Российская Федерация, г. Кемерово  
Kalenskii\_ga@gkl-kemerovo.ru

В работе рассмотрена задача нагревания наночастиц алюминия в вакууме в поле действия коротких лазерных импульсов. Для достижения поставленной цели использовались два подхода – классический и модернизированная модель горячей точки. В рамках моделей рассчитаны максимальные температуры разогрева наночастиц при действии основной гармоникой лазера на иттрий-алюминиевом гранате ( $\lambda=1064$  нм) с длительностью импульса на полувысоте 12 нс. Для изучения выбраны наночастицы алюминия с радиусами от 10 до 200 нм. Показано, что в случае учета коэффициента эффективности поглощения на зависимости температуры нагрева от радиуса наночастицы наблюдается максимум, разрешая тем самым «парадокс малых частиц». Автор выражает благодарность научному руководителю учителю ГКЛ г. Кемерово М.В. Баян и консультанту А.П. Никитину.

**HEATING OF A SPHERICAL ALUMINUM NANOPARTICLES  
IN VACUUM WITH SHORT PULSES OF THE MAIN HARMONIC  
OF a Nd<sub>3+</sub>:YAG-laser**

**G.A. Kalenskii**

Urban Classic Lyceum  
Russian Federation, Kemerovo  
Kalenskii\_ga@gkl-kemerovo.ru

In the work the problem of heating of aluminum nanoparticles in vacuum in the field of action of short laser pulses was considered. To achieve this aim we have used two approaches – classic and modernized model of the hot-spot. In

the model, the maximum temperature of heating of the nanoparticles under the action of the main harmonic of a Nd<sub>3+</sub>:YAG– laser ( $\lambda=1064$  nm) with pulse duration  $\phi_i=12$  ns. We selected radii of the nanoparticles 10-200 nm. It is shown that in the case of the absorption efficiency coefficient on the dependence of heating temperature of the radius of nanoparticles is observed maximum, thus eliminate «the paradox of small particles».

## **ЧТО ТАКОЕ АТОМ?**

**Н.П. Петров**

МАОУ Заозерная СОШ №16  
Российская Федерация, г. Томск  
neket\_petrov@mail.ru

Коротко об атоме, материал, идеально подходящий для объяснения детям.

## **WHAT IS AN ATOM?**

**N.P. Petrov**

School №16  
Russian Federation, Tomsk  
neket\_petrov@mail.ru

Short and sweet about the atom. material is ideal to explain to children.

## **ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ТЕПЛА РАЗЛИЧНЫМИ ЖИЛЫМИ ПОМЕЩЕНИЯМИ**

**С.А. Курманов, А. Васеев**

МАОУ СОШ №23,  
Российская Федерация, г. Томск  
tlb@mail2000.ru

В настоящее время очень актуальна проблема энергосбережения с точки зрения сохранения природных ресурсов и нанесения урона окружающей среде при работе электростанций, которые являются источниками энергии в городах.

Нами проведена оценка потерь тепла выбранным кирпичным зданием за счет теплопроводности стен.

Поток энергии изнутри наружу пропорционален разности температур внутреннего помещения и окружающей среды. Первый практический вывод из проделанной работы состоит в том, что для уменьшения тепловых

потерь почти на треть, можно снизить температуру в комнате в диапазоне санитарных норм. Обратимся к другому теплоизолятору – снегу

Из снега северные люди строили целые поселки. Будем считать, что единственным источником тепла в Иглу является человек. В спокойном состоянии он выделяет тепловой энергии около 100 Дж/с, т.е. его мощность примерно 100 Вт. Найдем приблизительно толщину стен иглу, рассчитанного на трех человек. Пусть температура окружающего воздуха - 300 °С, температура в иглу – 0°С. Теплопередачей через пол пренебрежем, считая, что он застелен, например, теплоизолирующими шкурами животных. Размеры иглу возьмем небольшие (жилище служит временным пристанищем).

Пусть  $R=1,5$  м. Такую иглу мы строили с нашим туристическим клубом на соревнованиях городских соревнованиях.

Наиболее известна спиральная иглу. Плиты первого ряда размером 60Ч40Ч20 см устанавливаются под углом 20–25 °С. Последующие несколько меньше по форме – трапециевидные – укладываются с увеличением наклона на виток примерно на 5–10 градусов. Надежность конструкции иглу достигается сферической формой, укладкой плит по спирали. Иглу – стопроцентная экономия невозобновляемых источников энергии. Однако, кто захотел бы всю жизнь прожить в таком жилище?

#### Литература

1. *Кухлинг Х.* Справочник по физике: пер. с нем. М.: Мир, 1982.
2. *Яворский Б.М., Детлаф А.А.* Справочник по физике. М.: Наука, 1985.

## ASSESSMENT OF HEAT LOSS DIFFERENT PREMISES

**S.A. Kurmanov, A. Vaseyev**

School 23

Russian Federation, Tomsk

tlb@mail2000.ru

The work we evaluated the heat loss selected brick building walls by conduction. The practical conclusion of the work done: to reduce heat loss by almost a third, you can only reduce the room temperature in the range of sanitary norms.

## **ВЛИЯНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА**

**М.В. Афанасьев, В.С. Гладышев**

МАОУ СОШ № 16;  
Российская Федерация, г. Томск  
maks81276@mail.ru

Проект посвящён изучению влияния солнечной и геомагнитной активности на организм человека. Аспектом этой работы является экспериментальное исследование и установление связи между напряжённостью геомагнитного поля и умственным, физическим состоянием учащихся. В работе выдвигается гипотеза о наличии периода наиболее низких показателей по двум биоритмам человека (физическому и интеллектуальному), т.е. об ухудшении общего состояния в неблагоприятные дни. Цель исследования заключается в доказательстве возможности повышения качества знаний и снижения нагрузки на учеников через планирование учебно-воспитательного процесса с учётом геомагнитного фона. Экспериментальные методы закономерно приводят к подтверждению выдвинутой гипотезы и цели. Проект даёт рекомендации по использованию полученных результатов в сфере образования.

## **INFLUENCE OF MAGNETIC FIELDS ON THE HUMAN BODY**

**M.V. Afanas'yev, V.S Gladyshev**

School 16;  
Russian Federation, Tomsk  
maks81276@mail.ru

The project is devoted to studying of influence of solar and geomagnetic activity on the human body. Aspect of this work is experimental study and the relation between the intensity of the geomagnetic field and the mental, the physical condition of their students. In work the hypothesis about the presence of the period of the lowest rates on 2 human biorhythms( Physical, Intellectual), ie, the deterioration of the General condition in the unfavorable days. the purpose of the study is to prove the possibility of improving the quality of knowledge and reduce the burden on students through the planning of the educational process taking into account the geomagnetic background. Experimental methods naturally lead to the confirmation of the hypotheses and the goal. The project gives recommendations for the use of the results obtained in the field of education.

## **ЯВЛЕНИЕ ФОТОЭФФЕКТА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ**

**А.И. Кокорина**

МАОУ Заозерная СОШ № 16  
Российская Федерация, г. Томск  
Kokorina\_aleksa@mail.ru

В данном докладе содержатся сведения о явлении фотоэффекта (суть фотоэффекта, внутренний и внешний фотоэффект, фотоэффект с точки зрения квантовой физики), истории исследования фотоэффекта (открытие явления фотоэффекта, исследование Столетова, опыты Ленарда, Ричардсона и др.), а также о применении фотоэффекта в современном мире (фотоэлемент, фоторезистор).

## **PHOTOELECTRIC EFFECT AND THE USE OF THE PHOTOELECTRIC EFFECT IN THE MODERN WORLD**

**A.I. Kokorina**

School 16;  
Russian Federation, Tomsk  
Kokorina\_aleksa@mail.ru

Author: Alexandra Kokorina. The report contained information on the phenomenon of the photoelectric effect (the essence of the photoelectric effect, internal and external photoelectric effect, photoelectric effect in terms of quantum physics), the history of the study of the photoelectric effect (the discovery of the photoelectric effect, the study Stoletov, experiments Lenard, Richardson et al.), As well as the use of the photoelectric effect in the modern world (photocell, LDR).

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ, АППАРАТНОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСКОРЕНИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ**

**Р.В. Палкин**

Лицей Томского государственного университета;  
Российская Федерация, г. Томск  
Romangg81@gmail.com

В статье представлен обзор актуальных технологий ускорения вычислений. Рассмотрена зависимость скорости выполнения программы от выбора компилятора. Наряду с проверкой эффективности технологий OpenACC, MPI и OpenMP, выполнен анализ влияния на производительность технологии Hyper Threading для процессоров Core i7 и Core i5. В качестве вычислительной задачи выступило решение уравнений газовой динамики.

## COMPARATIVE REVIEW OF COMPUTING ACCELERATION TECHNOLOGIES, HARDWARE AND SOFTWARE

**R.V. Palkin**

The Lycee Tomsk State University  
Russian Federation, Tomsk  
Romangg81@gmail.com

The purpose of this article is to give a review of topical computing acceleration technologies, such as OpenMP, MPI and OpenACC. Different compilers efficiency comparison was made. Acceleration potential of Hyper Threading technology was analyzed by the example of Core i5 and Core i7 processors.

## КРИВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ АЛЮМИНИЯ

**М.С. Днепровский, И.Е. Тутолмин, Р.О. Остапенко**

Гимназия №13  
Российская Федерация, г. Томск,  
lancia225@gmail.com

В работе представлены результаты экспериментального исследования кривых пластического течения монокристаллов алюминия технической чистоты, деформированных сжатием при комнатной температуре. Исследованы три ориентировки монокристаллов: ось нагружения параллельна ребру куба (F-монокристаллы), диагонали грани (D-монокристаллы) и пространственной диагонали куба (T-монокристаллы). Для всех исследованных монокристаллических образцов получены кривые течения в электронном варианте и выявлена их зависимость от ориентации монокристаллов. Установлено, что наиболее сильно при пластической деформации упрочняются T-монокристаллы. Для этих монокристаллов также изучалось влияние высоты образца. Обнаружено, изменение высоты T-монокристаллов в 2 раза не оказывает заметного влияния на кривые течения.

## STRAIN CURVES OF ALUMINUM MONOCRYSTALS

**M.S. Dneprovsky, I.E. Tutolmin, R.O. Ostapenko**

Russian Federation, Tomsk  
lancia225@gmail.com

This work presents the results of an experimental research of plastic flow curves of technical purity aluminum monocrystals deformed by compression at room temperature. Three orientation monocrystals are researched: the loading axis is parallel to the edge of the cube (F-single crystals), face diagonal (D-

single crystals) and the spatial diagonal of the cube (T-single crystals). For all the monocrystals flow curves obtained in electronic form and revealed their dependence on the orientation of the crystals. It was found that most strongly during plastic deformation hardening T-monocrystals. For these monocrystals are also studied the effect of the height of the sample and It is found, that changing the height of the T-single crystals of 2 times did not have a noticeable effect on the flow curves.

## ВОЗДУШНЫЕ ЗМЕИ

**А. Любушкин, А. Поляков, А. Фогель**

МАОУ СОШ № 12

Российская Федерация, г. Томск

Kolesova\_1968@mail.ru

Цель проекта:

1. Познакомиться с историей возникновения кайтов (воздушных змей)
2. Выяснить какие аэродинамические силы, действующие на змей в полете.
3. Изготовить воздушный змей и испытать в действии.
4. Сделать выводы по проекту.

Воздушные змей, кажущиеся нам лишь забавой, дают нам представления об аэродинамике летательных аппаратов, используются для научных исследований. В настоящее время кайтинг стремительно развивается как вид спорта и отдыха во всем мире.

История воздушных змеев насчитывает, как минимум, 2 000 лет.

В западный мир кайт пришел в XIII в. н.э.

**История изобретения.** Марко Поло, итальянский исследователь, вернувшийся из Китая в 1295 г., написал точный отчет о конструкции кайтов и способе их запуска. Первая известная ссылка на воздушный змей в Европе появляется в манускрипте о военных технологиях, написанном в 1405 г. Другой текст, написанный в 1430 г., описывает, как сделать кайт из пергамента, и объясняет, как соединять стропы с различными точками на воздушном змее для достижения хороших летных характеристик в различных ветровых условиях.

Для облегчения понимания аэродинамических законов, влияющих на полет змея, можно представить змей в виде прямоугольной плоской пластинки. Разобраться нам поможет упрощенный чертеж (рис. 1). Пусть линия АВ изображает разрез плоского змея. Предположим, что наш воображаемый змей взлетает справа налево под углом к горизонту или набегающему потоку ветра. Рассмотрим, какие силы действуют на модель в полете. Для того чтобы воздух мог поднять пластинку, она должна быть расположена под некоторым углом к потоку воздуха, движущимся горизонталь-

но. Угол  $\beta$  называют углом атаки. На взлете плотная масса воздуха препятствует движению змея, другими словами, оказывает на него некоторое давление. Обозначим это давление  $F_1$ . Теперь построим так называемый параллелограмм сил и разложим силу  $F_1$  на две составляющие –  $F_2$  и  $F_3$ . Сила  $F_2$  толкает змея от нас, а это значит, что при подъеме она снижает его первоначальную горизонтальную скорость. Следовательно, это сила сопротивления. Другая же сила ( $F_3$ ) увлекает змея вверх, поэтому назовем ее подъемной. Поднимая модель в воздух (буксируя ее за леер), мы как бы искусственно увеличиваем силу давления на поверхность змея, то есть силу  $F_1$ . И чем быстрее мы разбегаемся, тем больше увеличивается эта сила. Значит, увеличивается подъемная сила – змей взлетает. Для того чтобы змей держался в воздухе, подъемная сила должна быть равной массе змея вместе с леером. Если подъемная сила меньше массы змея, то последний падает на землю или опускается, изменяя угол атаки, т.е. подъемная сила должна быть равна массе змея. Величина подъемной силы зависит от скорости ветра  $V$ , массовой плотности воздуха  $\rho$ , равной, примерно 0,125, размера площади змея  $S$  и угла атаки  $\beta$ .

**Практическая часть.** Изготовили прямоугольный и ромбовидный змей из полиэтилена и бумажный прямоугольной формы. Установили, у какого змея будут лучшие аэродинамические свойства.

## KITE

**A. Lyubushkin, A. Polyakov, A. Vogel**

Russian Federation, Tomsk

Objective of the project: 1. Meet with the history of kites (kites) 2. Find out what the aerodynamic forces acting on the snakes in flight. 3. Produce a kite and experience in action. 4. To draw conclusions on the project.

## Именной указатель

### А

Азин А.В. 75  
Александрова А.Г. 91, 92, 93  
Алиев В.Д. 64, 130  
Ананьева М.В. 23, 24, 25  
Астанина М.С. 113  
Афанасьев М.В. 140

### Б

Бабич Д.С. 110  
Баньщикова М.А. 101, 103  
Басалаев С.А. 100  
Батулин А.П. 90  
Баранникова С.А. 68  
Баурин Н.О. 108  
Бердыбаева Ш.Т. 67  
Бессонова М.П. 51  
Блинкова Е.В. 79, 99, 122  
Бордовицына Т.В. 10  
Бошенятов Б.В. 115  
Бочкарева А.В. 68  
Брендаков Р.В. 105  
Бузимов А.Ю. 62  
Букатый В.И. 109  
Буц К.Е. 38  
Буяков А.С. 61  
Буякова С.П. 63  
Быкова Л.Е. 94

### В

Васеев А. 133  
Васькина А.Э. 49  
Волков С.А. 58  
Володченков С.И. 20  
Ворожцов С.А. 125, 126, 127

### Г

Гаврилов Д.Ю. 46  
Газенаур Н.В. 23, 24, 25  
Галкина Е.В. 22, 23, 25  
Галушина Т.Ю. 81, 93

Гидаспов В.Ю. 42  
Гичёва Н.И. 119, 120  
Гладышев В.С. 140  
Голубятников В.В. 78  
Горбенко Т.И. 58  
Гроховская А.А. 106  
Гуо Пэн 86, 83  
Гусев А.Ю. 71  
Гусев Б.С. 31  
Гуськов А.В. 30, 118

### Д

Далингер Е.В. 64, 131  
Дедова Е.С. 73  
Диденко М.В. 66  
Днепровский М.С. 142  
Долматов А.С. 30  
Дульнев А.И. 65  
Дымнич Е.М. 69  
Дьяков Е.А. 119, 120

### Ж

Жильцов К.Н. 115  
Жуков А.А. 75  
Жуйков Д.А. 38

### З

Звекон А.А. 24  
Зезюлинский Я.С. 118  
Земляк В.Л. 107, 108  
Зимоглядова О.А. 21  
Зуев Л.Б. 68  
Зыкова А.И. 82, 88

### И

Ивашкин В.В. 86, 87  
Иващенко Г.Э. 22  
Ипатов К.И. 108

## К

Каленский Г.А. 137  
Каширин М.В. 85  
Кветинская А.В. 123, 125, 126, 127  
Кинзерский В.В. 100  
Кинеловский С.А. 62, 131  
Кирюшкин А.Е. 48  
Козулин А.А. 59, 62, 128, 131, 133  
Кокорина А.И. 141  
Кононов Д.С. 42  
Коробенков М.В. 56  
Королев С.И. 90  
Красновейкин В.А. 59, 128, 133  
Крайнов А.Ю. 117  
Кретов Ю.Л. 63  
Кудряшова О.Б. 126, 127  
Кузьмин А.К. 101, 103  
Кузьминых М.С. 102  
Кульков С.Н. 61, 62  
Кульков С.С. 62, 130  
Курманов С.А. 138

## Л

Лапина И.Л. 64  
Левкина П.А. 97  
Левков Р.В. 56  
Лейцин В.Н. 75  
Летнер О.Н. 81  
Ли Ю.В. 68  
Лунев А.Г. 68  
Любушкин А. 143  
Ляшко А.Д. 54

## М

Майлюков Д.А. 47  
Майнагашева А.А. 98  
Максимов П.В. 110  
Маслов Е.А. 18  
Мержиевский Л.А. 21  
Микушина В.А. 71, 66  
Милевский К.Е. 30, 118  
Миньков Л.Л. 48  
Михайленко С.А. 32  
Михайличенко Ю.П. 14  
Моисеенко Д.Д. 110  
Моисеева К.М. 117  
Москвитина П.И. 77  
Москвичев Е.Н. 59, 133

Мухин Л.Н. 12

## Н

Нариманов Р.К. 47  
Нарикович А.С. 75, 130  
Неклюдова Е.А. 65  
Ниганова Е.Н. 94  
Никитин А.П. 26, 27, 29

## О

Орлов М.Ю. 16, 30  
Орлов С.С. 35  
Орлова М.П. 58  
Орлова Ю.Н. 33  
Остапенко Р.О. 142

## П

Палкин Р.В. 141  
Панин В.Е. 110  
Панин С.В. 110  
Пахомова Е.В. 95  
Петров Н.П. 138  
Поляков А. 143  
Пономарев С.А. 75  
Пономарев С.В. 75  
Похабова М.А. 40

## Р

Радченко К.А. 22  
Росляков С.Н. 113

## С

Савельев Р.В. 84  
Самбаров Г.Е. 80  
Саморокова Н.М. 82, 88  
Северина Н.С. 42  
Семёнова А.А. 44  
Сербента В.А. 50  
Селиверстова Е.С. 131  
Сидоренко Ю.Н. 71, 66  
Сидоров А.Д. 82, 88  
Синяев С.В. 20  
Смолин И.Ю. 71, 66  
Скрипняк В.А. 49, 50, 59, 133  
Стихно К.А. 87  
Сюсина О.М. 80

## **Т**

Толстопятов М.И. 38  
Томилова И.В. 92, 87  
Турыгина И.А. 53  
Тутолмин И.Е. 142

## **Ф**

Федоров А.Ю. 49  
Фогель А. 143  
Фролов А.С. 41

## **Х**

Ханзина Н.О. 73  
Холшевников К.В. 88  
Хрусталёв А.П. 123, 124, 126, 127

## **Ч**

Чувашов И.Н. 91, 97, 100, 101, 103

## **Ш**

Шаповалова К.В. 96  
Ше В.Р. 73  
Шеремет М.А. 32, 113  
Шмелёв В.А. 36  
Штейнбрехер О.А. 43

## **Э**

Эккердт К.Ю. 114

## **Я**

Яковлева Ю.П. 30  
Янилкин Ю.В. 36  
Яшин О.В. 70

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	8
-------------------	---

### Пленарные доклады

<i>Бордовицына Т.В.</i> Актуальные проблемы динамики околоземных космических объектов .....	10
<i>Мухин Л.Н.</i> Возможности трудоустройства выпускников вузов физико-математических направлений подготовки .....	12
<i>Михайличенко Ю.П.</i> Физические явления с позиций самоорганизации .....	14
<i>Орлов М.Ю.</i> Мобильная лаборатория «Взрывное разрушение природных материалов». Итоги пятилетней работы. Перспективы развития .....	16
<i>Маслов Е.А.</i> Экспериментальное исследование сверхзвукового обтекания тел осесимметричной формы .....	18

### Секция 1. Взрывные, детонационные процессы и свойства вещества при высокоэнергетических воздействиях

<i>Синяев С.В., Володченков С.И.</i> Импульсный нагрев среды ансамблями полых цилиндрических проводников, индукционно нагреваемых магнитным полем соленоида .....	20
<i>Зимоглядова О. А., Мерзиевский Л.А.</i> Моделирование детонации зарядов ВВ малого диаметра .....	21
<i>Иващенко Г.Э., Радченко К.А., Галкина Е.В.</i> Сенсibilизация прессованных таблеток PETN наночастицами металлов .....	22
<i>Газенаур Н.В., Ананьева М.В., Галкина Е.В.</i> Современный вариант модели теплового взрыва в микроочаговом варианте .....	23
<i>Газенаур Н.В., Ананьева М.В., Зевков А.А.</i> Экспериментальные критерии реализации цепного и теплового взрыва энергетических материалов импульсным лазерным излучением .....	24
<i>Газенаур Н.В., Ананьева М.В., Галкина Е.В.</i> Резонансное поглощение наночастиц палладия в прозрачных матрицах с различными показателями преломления .....	25
<i>Никитин А.П.</i> Температурные зависимости оптических свойств наночастиц золота ..	26
<i>Никитин А.П.</i> Критические параметры микроочаговой модели при различных длительностях импульса .....	27
<i>Никитин А.П.</i> Микроочаговая модель теплового взрыва с учетом многократного рассеяния света .....	29
<i>Гуськов А.В., Долматов А.С., Милевский К.Е., Яковлева Ю.П.</i> Механические свойства стали гаффилда после низкоскоростных методов обработки и обработкой взрывом .....	30

<i>Орлов М.Ю., Гусев Б.С.</i> Устройство для подрыва ледяного покрова эмульсионным ВВ .....	31
<i>Михайленко С.А., Шеремет М.А.</i> Нестационарные режимы смешанной конвекции в замкнутой дифференциально обогреваемой вращающейся полости .....	32
<i>Орлова Ю.Н.</i> Нагружения льда. Часть 3. Взрыв эмульсионных зарядов ВВ (>10 кг ТНТ).....	33

## **Секция 2. Численные методы, алгоритмы, программы и точные решения задач механики сплошных сред**

<i>Орлов С.С.</i> Интегро-дифференциальное уравнение продольных колебаний упругого стержня: разрешимость начально-краевых задач и их точные решения .....	35
<i>Янилкин Ю.В., Шмелёв В.А.</i> Монотонный метод частиц для решения двумерных газодинамических задач с учётом упругопластики и горения взрывчатых веществ .....	36
<i>Жуйков Д.А., Толстомятов М.И., Буц К.Е.</i> Численное моделирование течения в межлопаточном неподвижном канале центробежного насоса ЖРД.....	38
<i>Похабова М.А.</i> Численное исследование процессов распространения волн в блочных средах.....	40
<i>Фролов А.С.</i> Численное моделирование течения вязкой жидкости со свободной поверхностью методом VoF .....	41
<i>Гидаспов В.Ю., Кононов Д.С., Северина Н.С.</i> Моделирование одномерного стационарного неравновесного течения в двигателе с детонационной волной .....	42
<i>Штейнбрехер О.А.</i> Алгоритм оптимизации анизотропных конструкций по массе при произвольном числе нелинейных ограничений.....	43
<i>Семёнова А.А.</i> Параллельная реализация сплайновой разностной схемы при решении задачи переноса примеси в атмосфере .....	44
<i>Гаврилов Д.Ю.</i> Автоматизация обработки данных физических исследований .....	46
<i>Майлюков Д.А., Нариманов Р.К.</i> Моделирование электростатического поля в окрестности стыка изолятора и электрода.....	47
<i>Кирюшкин А.Е., Миньков Л.Л.</i> Численное моделирование задач внутренней баллистики РДТТ с помощью обратного метода Лакса–Вендроффа .....	48
<i>Васькина А.Э.</i> Критерий сходимости генетического алгоритма в задачах минимизации полимодальной функции .....	49
<i>Федоров А.Ю., Скрипняк В.А.</i> Численное моделирование механического поведения керамических нанокмозитов при динамическом нагружении.....	49
<i>Сербента В.А., Скрипняк В.А.</i> Моделирование механического поведения сплавов Zr-Nb с учетом развития деформации и повреждений на мезоскопическом и микроскопических уровнях.....	50
<i>Бессонова М.П.</i> Исследование формы свободной поверхности степенной жидкости в плоской постановке .....	51
<i>Турыгина И.А.</i> Численное моделирование взаимодействия ударных волн с деформируемыми многослойными ортотропными преградами.....	53
<i>Ляшко А.Д.</i> Об улучшении сходимости рядов в задаче о колебаниях прямоугольной ортотропной призмы.....	54
<i>Коробенков М.В., Левков Р.В.</i> Динамическая стойкость градиентных керамических материалов .....	56

### Секция 3. Исследования новых перспективных материалов в приложениях механики сплошных сред

<i>Орлова М.П., Горбенко Т.И., Волков С.А.</i> Исследование влияния дисперсности порошков алюминия на окисление и кинетические характеристики.....	58
<i>Буяков А.С., Кульков С.Н.</i> Изучение влияния состава на прочностные характеристики пористого композита $ZrO_2(MgO)-MgO$ .....	61
<i>Бузимов А.Ю., Кульков С.Н.</i> Изменение физико-химических свойств природного цеолита после механической активации.....	62
<i>Буякова С.П., Кретов Ю.Л.</i> Влияние термоударных нагрузжений на свойства керамики $Al_2O_3-MgO$ .....	63
<i>Лапина И.Л.</i> Вынужденное излучение в тонких пленках при фотовозбуждении .....	64
<i>Дульнев А.И., Неклюдова Е.А.</i> Экспериментально-расчетная оценка взрывсопротивляемости образцов ПКМ при неконтактном подводном взрыве .....	65
<i>Диденко М.В.</i> Контроль мощности излучения KrCl- и XeCl-эксилампе барьерного разряда методом скачка давления .....	66
<i>Бердыбаева Ш.Т.</i> Люминесцентный сенсор для обнаружения нитросоединений .....	67
<i>Ли Ю.В., Баранникова С.А., Бочкарева А.В., Лунев А.Г., Зуев Л.Б.</i> Неоднородность пластического течения в биметаллическом материале .....	68
<i>Дымнич Е.М.</i> Фазовый анализ покрытия на основе $TiAlN$ методом просвечивающей электронной микроскопии. ....	69
<i>Яшин О.В.</i> Исследование свойств металлических нановолокон ГЦК никеля, содержащих водород.....	70
<i>Гусев А.Ю.</i> Влияние $ZrO_2$ и $SiC$ на пористость композитов $ZrB_2-ZrO_2-SiC$ .....	71
<i>Микушина В.А., Смолин И.Ю., Сидоренко Ю.Н.</i> Прогнозирование механических свойств керамического биокompозита на основе численного моделирования.....	71
<i>Ханзина Н.О., Ше В.Р., Дедова Е.С.</i> Изучение влияния $ZrW_2O_8$ на фазовый состав оксидной керамики .....	73
<i>Азин А.В., Пономарев С.В., Жуков А.А., Пономарев С.А., Лейцин В.Н., Нарикович А.С.</i> Разработка концепции поиска и выявления наиболее опасных дефектов в конструкции электронных плат при совместном применении методов акустической эмиссии и рентгеновской томографии .....	75
<i>Москвитина П.И.</i> Определение размеров представительного объема пористой среды.....	77
<i>Голубятников В.В.</i> Натурный эксперимент по нормальному пробитию свинцовым ударником с конической головной частью стальной пластины при скоростях до 420 м/с .....	78

### Секция 4. Баллистика и небесная механика

<i>Блинкова Е.В.</i> Моделирование задачи автономного прогнозирования движения низколетящего ИСЗ по измерениям системы ГЛОНАСС .....	79
<i>Сюсина О.М., Самбаров Г.Е.</i> Оценивание влияния различных возмущающих ускорений на точность вероятностной модели движения астероида 2011 MD .....	80
<i>Летнер О.Н., Галушина Т.Ю.</i> Исследование хаотической и регулярной динамики астероидов – компаньонов Венеры .....	81

<i>Зыкова А.И., Саморокова Н.М., Сидоров А.Д.</i> Определение оптимальных условий заряжания при температуре + 20 °С .....	82
<i>Савельев Р.В., Галушина Т.Ю.</i> Позиционные наблюдения астероидов на телескопе СБГ АО УрФУ и дальнейшее улучшение их орбит.....	84
<i>Каширин М.В., Томилова И.В.</i> Орбитальная эволюция реальных неуправляемых объектов навигационных систем ГЛОНАСС и GPS с учетом влияния резонансов и светового давления .....	85
<i>Гуо Пэн, Ивашкин В.В.</i> Оценка точности определения параметров орбиты опасного астероида по оптическим измерениям комплекса «Небосвод» .....	86
<i>Стихно К.А., Гуо П., Ивашкин В.В.</i> Анализ структуры вероятной зоны падения астероида Aorphis на Землю в 2036 г.....	87
<i>Сидоров А.Д., Зыкова А.И., Саморокова Н.М.</i> Анализ горения комбинированного заряда в условиях электротермохимической технологии метания .....	88
<i>Королев С.И., Батулин А.П.</i> Прогнозирование движение астероидов с использованием различных планетных эфемерид .....	90
<i>Александрова А.Г., Чувашов И.Н.</i> Определение параметров модели светового давления по данным наблюдений.....	91
<i>Александрова А.Г., Томилова И.В.</i> Исследование резонансной структуры и динамической эволюции потоков частиц, образовавшихся в результате распадов космических аппаратов на околорезонансных орбитах.....	92
<i>Александрова А.Г., Галушина Т.Ю., Холиевников К.В.</i> Сравнение различных способов превентивного разрушения опасного астероида .....	93
<i>Ниганова Е.Н., Быкова Л.Е.</i> Численные исследования регулярной и хаотической динамики АСЗ вблизи некоторых резонансов с Юпитером и Землей.....	94
<i>Пахомова Е.В.</i> Исследование решения задач локальной геодинамики с использованием GPS/ГЛОНАСС измерений.....	95
<i>Шапалова К.В.</i> Задача построения высокоточной локальной модели квазигеоида ..	96
<i>Чувашов И.Н., Левкина П.А.</i> Динамическая эволюция орбит объектов с большой парусностью .....	97
<i>Майнагашева А.А.</i> Возможная ошибка при определении звездного времени появления метеора.....	98
<i>Блинкова Е.В.</i> Моделирование задачи автономного прогнозирования движения низколетящего исз по измерениям системы ГЛОНАСС.....	99
<i>Чувашов И.Н., Кинзерский В.В.</i> Определение параметров орбит спутников ГЛОНАСС по межспутниковым измерениям .....	100
<i>Чувашов И.Н., Баньщикова М.А., Кузьмин А.К.</i> Исследования возможных преимуществ одновременных наблюдений авроральных овалов бортовыми приборами с двух КА.....	101
<i>Кузьминых М.С.</i> Дисперсия метеороидного потока Квадрантид при сближении с планетами .....	102
<i>Чувашов И.Н., Баньщикова М.А., Кузьмин А.К.</i> Исследования возможных преимуществ одновременных наблюдений фрагментов авроральных овалов бортовыми приборами с двух КА.....	103

## **Секция 5. Математическое и физическое моделирование технических и природных систем**

<i>Брендаков Р.В.</i> Математическая модель процесса фторирования вольфрама.....	105
<i>Гроховская А.А.</i> Математическое моделирование излучения пульсаров .....	106

<i>Земляк В.Л.</i> Исследования возможности всплытия подводных судов в ледяном покрове при ограниченной глубине акватории.....	107
<i>Баурин Н.О., Земляк В.Л., Ипатов К.И.</i> Влияние рельефа дна на ледоразрушающую способность изгибно-гравитационных волн генерируемых от подледного движения погруженного тела.....	108
<i>Бабич Д.С., Моисеенко Д.Д., Максимов П.В., Панин В.Е., Панин С.В.</i> Компьютерное моделирование распространения теплового фронта и процессов рекристаллизации в системах с термобарьерными покрытиями.....	110
<i>Росляков С.Н.</i> Моделирование источника сфокусированного магнитного поля .....	113
<i>Шеремет М.А., Астанина М.С.,</i> Анализ влияния пористости на режимы конвективного теплопереноса в замкнутой полости, заполненной жидкостью с переменной вязкостью .....	113
<i>Эккердт К.Ю., Букатый В.И.</i> Размерный состав и счётная концентрация взвешенного вещества в воде озёр Алтайского края.....	114
<i>Бошнятов Б.В., Жильцов К.Н.</i> Численное моделирование взаимодействия волн цунами с одиночными преградами.....	115
<i>Моисеева К.М., Крайнов А.Ю.</i> Численное моделирование искрового зажигания метано-воздушной смеси.....	117
<i>Зезюлинский Я.С., Гуськов А.В., Милевский К.Е.</i> Численное моделирование распределения температуры в материале стального узла ведения при высокоскоростном разгоне по каналу баллистического разгонного комплекса ....	118
<i>Гичёва Н.И., Дьяков Е.А.</i> Исследование влияния закрутки на гидродинамику и теплоперенос в химическом реакторе.....	119
<i>Дьяков Е.А., Гичёва Н.И.</i> Динамика и теплообмен гранулированной среды в кольцевом бункере .....	120
<i>Блинкова Е.В.</i> Моделирование задачи автономного прогнозирования движения низколетящего ИСЗ по измерениям системы ГЛОНАСС.....	122
<i>Хрусталёв А.П., Кветинская А.В., Ворожцов С.А.</i> Синтез и свойства алюмоматричного композиционного материала, полученного методом горячего прессования .....	123
<i>Хрусталёв А.П., Ворожцов С.А., Кветинская А.В.</i> Механические свойства алюмоматричного композиционного материала Al-4%Cu с неметаллическими частицами.....	125
<i>Хрусталёв А.П., Ворожцов С.А., Кветинская А.В., Кудряшова О.Б.</i> Влияние ультразвукового воздействия на проникновение металлического расплава в агломераты субмикронных частиц .....	126
<i>Хрусталёв А.П., Ворожцов С.А., Кветинская А.В., Кудряшова О.Б.</i> Деагломерация и распределение частиц в металлическом расплаве .....	127
<i>Далингер Е.В., Козулин А.А., Красновейкин В.А.</i> Исследование упруго-пластических свойств алюминиевых сплавов при высоких скоростях деформации.....	128
<i>Алиев В.Д., Нарикович А.С., Далингер Е.В., Кульков С.С.</i> Исследование внутренней структуры керамических материалов методами рентгеновской томографии .....	130
<i>Козулин А.А., Далингер Е.В., Кинеловский С.А.</i> Получение и исследование нитридсодержащих покрытий на титановых подложках.....	131
<i>Красновейкин В.А., Козулин А.А., Скрипняк В.А., Москвичев Е.Н.</i> Физико-механические свойства ультрамелкозернистого алюминий-магниевого сплава, полученного интенсивной пластической деформацией.....	133
<i>Селиверстова Е.С.</i> Лабораторный практикум для инженеров по специальности «Радиоэлектронные системы и комплексы» в рамках концепции CDIO .....	135

**Секция 6. Математика, физика и информатика для школьников  
(Школьная секция)**

<i>Каленский Г.А.</i> Разогрев сферических наночастиц алюминия в вакууме короткими импульсами основной гармонике неодимового лазера .....	137
<i>Петров Н.П.</i> Что такое атом? .....	138
<i>Курманов С.А., Васеев А.</i> Оценка потерь тепла различными жилыми помещениями ..	138
<i>Афанасьев М.В., Гладышев В.С.</i> Влияние магнитных полей на организм человека .....	140
<i>Кокорина А.И.</i> Явление фотоэффекта и его применение в современном мире .....	141
<i>Палкин Р.В.</i> Сравнительный обзор технологий, аппаратного и программного обеспечения ускорения вычислений .....	141
<i>Днепроvский М.С., Тутолмин И.Е., Остапенко Р.О.</i> Кривые деформации монокристаллов алюминия .....	142
<i>Любушкин А., Поляков А., Фогель А.</i> Воздушные змеи .....	143
<b>ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ</b> .....	145

**CONTENTS**

<b>PREFACE</b> .....	9
----------------------	---

**Plenary session**

<i>Bordovicyna T.V.</i> Actual problems of the dynamics of near-Earth space objects .....	11
<i>Mukhin L.N.</i> Opportunities of Employment of graduates - physicists and mathematicians ..	14
<i>Mikhailichenko Yu.P.</i> Physical phenomena from the viewpoint of self organization.....	16
<i>Orlov M.Yu.</i> Mobile laboratory "explosive destruction of natural materials". results of the five-year studies. development prospects .....	17
<i>Maslov E.A.</i> Experimental study of a supersonic flow of bodies axisymmetric shape.....	18

**Session 1. Explosion, detonation phenomena and  
properties of matter at high-intensive**

<i>Sinyaev S.V., Volodchenkov S.I.</i> Pulsed heating of a medium by ensembles of the hollow cylindrical conductors inductively heated in magnetic field of a solenoid.....	20
<i>Zimoglyadova O., Merzhievsky L.A.</i> Detonation modeling of small size charge.....	21
<i>Ivashenko G.J., Radchenko K.A., Galkina E.V.</i> Sensitization of PETN pressed pellets of nanoparticles of metals .....	22
<i>Gazenaур N.V., Anan'eva M.V., Galkina E.V.</i> The modern version of the model of thermal explosion in a hot-spot option.....	23
<i>Gazenaур N.V., Anan'eva M.V., Zvekov A.A.</i> Experimental performance criteria of chain and thermal explosion of energetic materials by pulsed laser radiation .....	25
<i>Gazenaур N.V., Anan'eva M.V., Galkina V.V.</i> Resonant absorption of palladium nanoparticles in transparent matrices with different refractive indices.....	26
<i>Nikitin A.P.</i> The temperature dependence of the optical properties of gold nanoparticles ...	27
<i>Nikitin A. P.</i> The critical parameters of the hot-spot model at various durations of the pulse .....	28

<i>Nikitin A. P.</i> The hot-spot model of thermal explosion with account for multiple light scattering.....	29
<i>Gusikov A.V., Dolmatov A.S., Milevskiy K.E., Yakovleva Yu.P.</i> Mechanical properties of hadfield steel after low speed method for processing and handling explosion pressure.....	30
<i>Orlov M.Yu., Gusev B.S.</i> An apparatus for blasting ice emulsion explosives.....	32
<i>Mikhaylenko S.A., Sheremet M.A.</i> Mixed convection in a differentially heated rotating enclosure.....	33
<i>Orlova Yu.N.</i> Investigation of explosive loading of ice. Part 3. The blast up of (>10 kg of TNT).....	34

## **Session 2. Numerical methods, algorithms, codes, and accurate solutions of the continuum mechanics**

<i>Orlov S.S.</i> Integro-differential equation of longitudinal oscillations of an elastic rod: the solvability of initial boundary value problems and their exact solutions.....	36
<i>Yanilkin Yu.V., Shmelev V.A.</i> Monotonous particle method for solving 2D gas-dynamic problems with elasticity and detonation of explosive materials .....	37
<i>Zhuikov D.A., Tolstopyatov M.I., Buts K.E.</i> Numerical simulation of the flow in the interscapular channel stationary centrifugal pump rocket engine.....	39
<i>Pokhabova M.A.</i> Numerical study of the processes of wave propagation in a block media. ....	41
<i>Frolov A.S.</i> Numerical simulation of viscosity fluid flow with free boundaries by a method VoF.....	42
<i>Gidasov V.Yu., Kononov D.S., Severina N.S.</i> Simulation of one-dimensional steady-state nonequilibrium flow in the engine with detonation wave.....	43
<i>Shteinbreher O.A.</i> Algorithm of optimization of anisogrid construction for an arbitrary number of non-linear restrictions is offered.....	44
<i>Semyonova A.A.</i> Parallel implementation spline difference scheme for solving the problem of pollutant transport in the atmosphere .....	46
<i>Gavrilov D.Yu.</i> Data processing automation in physics research .....	46
<i>Maylyukov D.A., Narimanov R.K.</i> Electrostatic field modeling in region of the junction of the electrode and insulator .....	47
<i>Kiryushkin A.E., Minikov L.L.</i> Numerical Simulation of SRM internal ballistics problems using inverse Lax-Wendroff procedure.....	48
<i>Vaskina A.E.</i> Criterion of convergence of genetic algorithm to minimize the problems of multimodal function.....	49
<i>Fedorov A.Yu., Skripnyak V.A.</i> Numerical simulation of the mechanical behavior of ceramic nanocomposites under dynamic loading .....	50
<i>Serbenta V.A., Skripnyak V.A.</i> Mechanical behavior modeling of zirconium-niobium alloys with the development of deformation and damage at mesoscopic and microscopic levels .....	51
<i>Bessonova M.P.</i> The study of free surface shape of power law fluid in planar domain .....	52
<i>Turygina I.A.</i> Numerical modelling of shock wave interaction with deformable multilayered orthotropic barriers.....	53
<i>Lyashko A.D.</i> On improvement of the series convergence in the problem of the vibrations of orthotropic rectangular prism.....	55
<i>Korobenzon M.V., Levkov R.V.</i> The dynamic resistance of the graded ceramic materials .....	57

### Session 3. Investigation of advanced materials in applications of continuum mechanics

<i>Orlova M.P., Gorbenko T.I., Volkov S.A.</i> The study of the effect of aluminum powders dispersion on their oxidation and kinetic characteristics .....	61
<i>Buyakov A.S., Kulkov S.N.</i> Study of strength parameters density from components concentration in porous ceramic composite $ZrO_2(MgO)-MgO$ .....	62
<i>Buzimov A.Yu., Kul'kov S.N.</i> Change of the physical-chemical properties of natural zeolite after mechanical activation .....	63
<i>Buyakova S.P., Kretov Yu.L.</i> Effects of thermal shock strains on the property of alumina-magnesia ceramics .....	64
<i>Lapina I.L.</i> Stimulated emission in organic films for photoexcitation .....	65
<i>Dulnev A.I., Nekliudova E.A.</i> Experimental and computational blast resistance assessment of polymer composite samples at contactless underwater explosion .....	66
<i>Didenko M.V.</i> Dielectric barrier discharge KrCl- and XeCl-excimer radiation power control by pressure jump method .....	67
<i>Berdybaeva S.T.</i> Fluorescent sensor for the detection nitroaromatic compounds .....	68
<i>Li Yu.V., Barannikova S.A., Bochkareva A.V., Lunev A.G., Zuev L.B.</i> Heterogeneity of the plastic flow in the bimetallic material .....	69
<i>Dymnich E.M.</i> An investigation of elastic-plastic properties of aluminum alloys at high strain rates .....	70
<i>Yashin O.V.</i> The investigation of metal FCC nickel nanofibers containing hydrogen .....	70
<i>Gusev A.Yu.</i> Effect of $ZrO_2$ and SiC on porosity of $ZrB_2-ZrO_2-SiC$ composites .....	71
<i>Mikushina V.A., Smolin I.Yu., Sidorenko Yu.N.</i> Prediction of mechanical properties of ceramic biocomposite on the basis of numerical modeling .....	73
<i>Hanzina N.O., She V.R., Dedova E.S.</i> The influence $ZrW_2O_8$ on the phase composition of oxide ceramics .....	75
<i>Azin A.V., Ponomarev S.V., Ponomarev S.A., Zhukov A.A., Leitsin V.N., Narikovich A.S.</i> Detecting and identifying high thread defects in electronic boards structure .....	76
<i>Moskvitina P.I.</i> Determination of dimensions representative volume permeable porous medium .....	77
<i>Golubyatnikov V.V.</i> Full scale test penetrating steel barrier by projectile at 420 m/sec .....	78

### Session 4. Ballistics and Celestial mechanics

<i>Blinkova E.V.</i> Modelling tasks autonomous movement predicting low-flying satellites for GNSS measurements .....	79
<i>Syusina O.M., Sambarov G.E.</i> Estimating the effect different perturbation accelerations on the accuracy of probabilistic motion model of asteroid 2011 MD .....	81
<i>Letner O.N., Galushina T.Yu.</i> The Research of chaotic and regular dynamics of asteroids - Venus companions .....	82
<i>Zykova A.I., Samorokova N.M., Sidorov A.D.</i> Determination of optimal loading conditions at the initial temperature of + 20 °C .....	83
<i>Saveliev R.V., Galushina T.Yu.</i> Positional observations of asteroids with SBG of AO UrFU and further improvement of their orbits .....	84
<i>Kashirin M.V., Tomilova I.V.</i> Orbital evolution of real uncontrolled objects of navigation systems GLONASS and GPS taking into account the influence of resonance and light pressure .....	85

<i>Guo Peng, Ivashkin V.V.</i> An estimation of orbit parameters determination accuracy for dangerous asteroid using optical measurements by the complex «Nebosvod» .....	87
<i>Stikhno C.A., Guo P., Ivashkin V.V.</i> An analysis of the structure of asteroid Apophis' possible impact zone on the Earth in 2036.....	88
<i>Sidorov A.D., Zykova A.I., Samorokova N.M.</i> Analysis of combustion of the combined charge in the conditions electrothermal-chemical throwing technology .....	89
<i>Korolev S.I., Baturin A.P.</i> The simulation of asteroid's motion with different planets' ephemerides.....	90
<i>Aleksandrova A.G., Chuvashov I.N.</i> Determination of parameters of solar radiation pressure model from observations.....	92
<i>Aleksandrova A.G., Tomilova I.V.</i> Investigation of the resonance structure and the dynamic evolution of the particle fluxes generated as a result of spacecraft explosions in near-resonance orbits .....	93
<i>Aleksandrova A.G., Galushina T.Yu., Holshevnikov K.V.</i> Comparison of different methods of the preventive destruction of a hazardous asteroid .....	94
<i>Niganova E.N., Bykova L.E.</i> Numerical research of regular and chaotic motion of NEAs near of a boundary of the mean motion resonance with Jupiter and Earth.....	95
<i>Pakhomova E.V.</i> Investigation of solving local geodynamics problems using base GPS/GLONASS measurements .....	96
<i>Shapovalova K.V.</i> Problem of development high-precision local model of quasigeoid.....	97
<i>Chuvashov I.N., Levkina P.A.</i> Dynamic evolution of the orbits of objects with high area-to-mass ratio .....	98
<i>Maynagasheva A.A.</i> Possible error in determining of sidereal time of occurrence the meteors .....	99
<i>Blinkova E.V.</i> Simulation problems autonomous predict the movement of low-flying satellites software measurement system GLONASS .....	100
<i>Chuvashov I.N., Kinzersky V.V.</i> Defining the parameters of the orbits of satellites GLONASS on the inter-satellite measurement.....	101
<i>Chuvashov I.N., Banschikova M.A., Kuzimin A.K.</i> Researches of possible benefits of simultaneous observations of the auroral ovals by onboard devices from two spacecrafts .....	101
<i>Kuzminykh M.S.</i> Dispersion of the Quadrantid meteoroid stream on approach to planets ....	102
<i>Chuvashov I.N., Banschikova M.A., Kuzmin A.K.</i> Researches of possible benefits of simultaneous observations of the auroral ovals fragments by means of imagers from two spacecrafts.....	103

## **Session 5. Mathematical and physical modeling of technical and natural systems**

<i>Brendakov R.V.</i> The mathematical model of the process of fluorination of tungsten.....	105
<i>Grokhovskaya A.A.</i> Mathematical modeling of the pulsar radiation.....	106
<i>Zemlyak V.L.</i> Study of Possibility of Submarine Vessels Emerging in the Ice Cover at a Limited Depth of Water Area.....	108
<i>Baurin N.O., Zemlyak V.L., Ipatov K.I.</i> The Impact of Bottom Contour of Ice-Breaking Capacity of Flexural-Gravity Waves Caused in the Ice Motion of the Immersed Body .....	109
<i>Babich D.S., Moiseyenko D.D., Maksimov P.V., Panin V.Ye., Panin S.V.</i> Computer Simulation of Heat Propagation and Recrystallization in Materials with Heat-Resistants Coatings .....	112
<i>Roslyakov S.N.</i> Modeling of the source of a focused magnetic field.....	113
<i>Sheremet M.A., Astanina M.S.</i> Analysis of the porosity effect on convective heat transfer in an enclosure, filled with a variable viscosity fluid .....	114

<i>Ekkerdt K.Yu., Bukatyy V.I.</i> The size and composition of the audit concentration of suspended matter in water lakes of the Altai territory .....	114
<i>Boshenyatov B.V., Zhiltsov K.N.</i> Numerical Simulation of The Interaction of Tsunami Waves with a Single Barrier .....	116
<i>Moiseeva K.M., Kraynov A.Y.</i> Numerical simulation of the spark ignition of the methane-air mixture .....	117
<i>Zezyulinsky Ya.S., Gusikov A.V., Milevskiy K.E.</i> Numerical simulation of temperature distribution in material of steel conduct node during high-speed acceleration through the channel of a ballistic booster complex .....	118
<i>Gicheva N.I., Dyakov E.A.</i> Research of the rotation effect upon the hydrodynamics and heat and mass transport in a chemical reactor .....	120
<i>Dyakov E.A., Gicheva N.I.</i> The dynamics and heat transfer of a granular medium in an annular hopper .....	121
<i>Blinkova E.</i> Simulation problems autonomous predict the movement of low-flying satellites software measurement system GLONASS .....	122
<i>Khrustalyov A.P., Kvetinskaya A.V., Vorozhtsov S.A.</i> Synthesis and properties aluminum matrix composite obtained by hot pressing .....	124
<i>Khrustalyov A.P., Vorozhtsov S.A., Kvetinskaya A.V.</i> Mechanical properties aluminum matrix composite Al-4%Cu with non-metallic particles .....	125
<i>Khrustalyov A.P., Vorozhtsov S.A., Kvetinskaya A.V., Kudryashova O.B.</i> The influence of ultrasound treatment on the penetration metal melt into agglomerates submicron particles .....	126
<i>Khrustalyov A.P., Vorozhtsov S.A., Kvetinskaya A.V., Kudryashova O.B.</i> Deagglomeration and dispersion particles in metal melt .....	128
<i>Dalinger E.V., Kozulin A.A., Krasnoveikin V.A.</i> Elastoplastic properties of aluminium alloys at high strain rates .....	129
<i>Aliev V.D., Narikovich A.S., Dalinger E.V., Kulkov S.S.</i> An investigation of internal structure of ceramics by x-ray tomography methods .....	131
<i>Kozulin A.A., Dalinger E.V., Kinelovskii S.A., Kulkov S.S.</i> Synthesis and investigation of nitride-based coatings on titanium substrates .....	133
<i>Krasnoveikin V.A., Kozulin A.A., Skripnyak V.A., Moskvichev E.N.</i> Physico-mechanical properties of ultrafine-grained Al-Mg-based alloy produced by severe plastic deformation .....	135
<i>Seliverstova E.S.</i> Laboratory practical work for engineers in «Radio-electronic systems and complexes» within the concept of CDIO .....	136

### **Session 6. Mathematics, physics and computer science for young researchers and students of secondary schools and lyceums**

<i>Kalenskii G.A.</i> Heating of a spherical aluminum nanoparticles in vacuum with short pulses of the main harmonic of a Nd <sup>3+</sup> :YAG– laser .....	137
<i>Petrov Ni.P.</i> What is an atom? .....	138
<i>Kurmanov S.A.</i> Assessment of heat loss different premises .....	139
<i>Afanasev M.V., Gladishev V.S.</i> Influence of magnetic fields on the human body .....	140
<i>Kokorina A.I.</i> Photoelectric effect and the use of the photoelectric effect in the modern world .....	141
<i>Palkin R.V.</i> Comparative review of computing acceleration technologies, hardware and software .....	142
<i>Dneprovsky M.S., Tutolmin I.E., Ostapenko R.O.</i> Strain curves of aluminum monocrystals .....	142
<i>Lyubushkin A. Polyakov A. Vogel A.</i> Kite .....	143

## СПОНСОРЫ И ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ



Российский Фонд  
Фундаментальных  
Исследований (РФФИ)  
Адрес: Россия, 119991,  
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>



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, Москва, ул. Нагатинская, д. 1,  
стр. 14, 1 подъезд, этаж 3



Совет молодых учёных  
Томского государственного университета  
был утверждён приказом ректора ТГУ  
за № 527 от 13 ноября 2009 г.  
Россия, 634050, Томск,  
пр. Ленина, 36  
<http://smu.tsu.ru/OSovet>

АССОЦИАЦИЯ  
«СОЮЗВЗРЫВПРОМ»

ООО Кузбасское специализированное  
управление по производству буровзрывных  
работ «КузбасСпецВзрыв», производство  
взрывных работ и доставка взрывных ма-  
териалов до места проведения взрывных  
работ  
Россия, 650905,  
г. Кемерово, ул. Баха, 15А,  
Тел/факс (3842) 71-25-34, бухг. 71-25-38,  
E-mail: [ksv158@mail.ru](mailto:ksv158@mail.ru), [kuzbassv@mail.ru](mailto:kuzbassv@mail.ru)



## КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ



Томская региональная общественная ор-  
ганизация «Ассоциация практической  
стрельбы», выполняющая функции Том-  
ского областного отделения [ОСОО](#)  
[«ФПСР»](#) и имеющая государственную ак-  
кредитацию, приглашает в тир по адресу г.  
Томск, ул. Бердская, 21.  
<http://strelok.tomsk.ru/>

Научное издание

VI Международная молодежная научная конференция  
«Актуальные проблемы современной механики  
сплошных сред и небесной механики»  
16–18 ноября 2016 г., Томск

Подписано в печать 27.12.2016 г.  
Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Печ. л. 9,5; усл. печ. л. 13,3; уч.-изд. л. 12,8  
Тираж 100 экз.