

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

**Международная молодежная научная конференция**  
**«Актуальные проблемы современной механики**  
**сплошных сред и небесной механики»**  
17–19 ноября 2014 г., Томск

**International Youth Scientific Conference**  
**«Current issues of**  
**continuum mechanics and celestial mechanics – 2014»,**  
17–19 November, 2014



Томск-2014

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» 17–19 ноября 2014 г.: Материалы конференции / под ред. М.Ю. Орлова. – Томск. 2014. – 210 с.

ISBN 978-5-7511-2317-8

Представлены материалы конференции молодых ученых «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики», прошедшей 17-19 ноября 2014 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 14-31-10180 и государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности №1624*

*Публикуется в авторской редакции*

ISBN 978-5-7511-2317-8

© Томский государственный университет, 2014

**Международная молодежная научная конференция**  
«Актуальные проблемы современной механики сплошных сред  
и небесной механики-2014»

**Сопредседатели:**

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  
Старченко Александр Васильевич, д.ф.-м.н., профессор, ТГУ

**Программный комитет конференции:**

Александров И.А., Архипов В.А., Астанин А.В., Бородовицына Т.В.,  
Биматов В.И., Бубенчиков В.М., Бутов В.Г., Васенин И.М., Герасимов  
А.В., Гришин А.М., Гулько С.П., Еремин И.В., Ивонин И.В., Ищенко А.Н.,  
Крайнов А.Ю., Крылов П.А., Кульков С.Н., Лобода Е.Л., Масловский В.И.,  
Разоренов С.В., Скрипняк В.А., Шваб А.В., Шрагер Г.Р., Щербаков Н.Р.

**Международный программный комитет конференции:**

Кружка Л.С. (Военно-технологический университет  
им. Домбровского, Польша)  
Фомин Н.А. (Институт тепло-массообмена им. Лыкова, Белоруссия)  
Кусаиынов К.К. (Карагандинский госуниверситет  
им. Букетова, Республика Казахстан)  
Брара Ахмед (Директор RIB, Алжир)  
Милюнович Момчило (Белградский университет, Сербия)

**Организационный комитет конференции:**

Орлов Максим Юрьевич, к.ф.-м.н., научный сотрудник НИИ ПММ ТГУ  
(**председатель**), Орлов Сергей Александрович, к.ф.-м.н., доцент ТГУ  
(**ответственный секретарь конференции**), Усанина А.С., Савкина Н.В.,  
Козулин А.А., Марценко М.С., Солоненко В.А., Борзенко Е.И., Порязов  
В.А., Гойко В.Л., Хмелева М.Г., Фильков А.И., Кульков С.С., Рыжих Ю.Н.,  
Пикущак Е.В., Чинчикеева Н.А., Жармухамбетова А.М., Скрипняк Н.В.,  
Касымов Д.П., Кагенов А.М.

**Адрес:**

634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, НИ Томский государственный  
университет, Физико-технический факультет, НИИ прикладной  
математики и механики, корп. 10.

**Телефоны:**

Тел.: (3822)529569, 89059905354 (Орлов Максим Юрьевич).

**E-mail:** confmail@ftf.tsu.ru, orloff\_m@mail.ru

International Youth Scientific Conference  
«Currently issues of modern  
continuum mechanics and celestial mechanics – 2014»,

**Committee Co-Chairs:**

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

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

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

**Alexander Starchenko**, Ph.D., professor, TSU

**Committee Members:**

I. Alexandrov (TSU), V. Arhipov (RSI AMM), A. Astanin (TSU), T. Borodovitsina (RSI AMM), V. Bimatov (TSU), A. Bubenchikov (TSU), V. Butov (RSI AMM), I. Vasenin (TSU), A. Gerasimov (RSI AMM), A. Grishin (TSU), S. Gul'ko (TSU), I. Eremin (RSI AMM), I. Ivonin (TSU), A. Ishchenko (TSU), A. Kraynov (TSU), P. Krylov (TSU), S. Kul'kov (TSU), E. Loboda (TSU), V. Maslovskiy (TSU), S. Razorenov (TSU), V. Skripnyak (TSU), A. Shvab (TSU), G. Shrager (TSU), N. Shcherbakov (TSU)

**International Committee Members:**

**L. Kruszka**, 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)

**Organizing committee:**

**Max. Orlov** (Ph.D., RSI AMM, Committee Chair), **S. Orlov** (Ph.D., TSU Conference Technical Secretary), N. Savkina, A. Kozulin, M. Martsenko, V. Solonenko, E. Borzenko, V. Poryazov, V. Goiko, M. Hmeleva, A. Usanina, S. Kul'kov, Yu. Ryzhikh, E. Pikushchak, N. Chinchikeeva, Al. Zhurmuhambetova, N. Skripnyak, D. Kasymov, A. Kagenov, A. Fil'kov.

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

**Tel.:** +79059905354 – Maxim Orlov

**E-mail:** confmail@ftf.tsu.ru, orloff\_m@mail.ru

## ПРЕДИСЛОВИЕ

17–19 ноября 2014 г. на базе Национального исследовательского Томского государственного университета прошла ежегодная международная молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики». В конференции приняли участие молодые исследователи из России, Казахстана, Украины, Болгарии, Польши, Сербии, Канады и Италии. В России участниками конференции стали молодые ученые из Томска, Москвы, Новосибирска, Барнаула, Н.Новгорода, Казани, Комсомольск-на-Амуре, Биробиджана, Новокузнецка и других городов.

Декан физико-технического факультета профессор Шрагер Э.Р. поприветствовал участников конференции и пожелал плодотворной научной работы. С пленарными докладами выступили представитель ООО «КузбассСпецВзрыв», который рассказ о возможностях компании по производству взрывных работ на огромной территории Сибири. Главный инженер к.т.н. Садохин А.Н. продемонстрировал наиболее интересные работы на тему взрывного нагружения геологических материалов и не исключил сотрудничества в экспериментальных исследованиях. Старший научный сотрудник НИИ прикладной математики и механики Черепанов Р.О. доложил о возможностях вейвлет-преобразований для решения современных задач механики сплошных сред.

Доклад к.ф.-м.н. Бобсуновского А.Б. посвящен гибридной схеме системы мониторинга, в которой на основе измеренных параметров решается обратная задача по определению деформирования несущих конструкций сооружения. Будущим исследователям презентовали новые продукты инновационной компания «Саровский Инженерный Центр». Результаты российско-польских научных исследований озвучены в последнем докладе на тему ударно-взрывного нагружения льда. Презентована новая разработка томских ученых для изучения динамического разрушения конденсированных сред – мобильная лаборатория «Взрывное нагружение природных и геологических материалов».

Одной из основных целей конференции являлось привлечение и закрепление в сфере науки и инноваций молодых исследователей – будущего отечественной науки. Работа конференции проходило в рамках 6 секций:

1. Взрывные, детонационные процессы и свойства вещества при высоккоэнергетических 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. Вопросы теоретической математики,
6. Математическое и физическое моделирование технических и природных систем.

На закрытии конференции выступил академик РАН Липанов А.М., директор Института Механики УрО РАН. Академик рассказал о плодотворной работе по решению практически значимых задач для ракетно-космической отрасли и вручил памятные дипломы за лучшие доклады молодым участникам конференции.

Информация о конференции находится на сайте: <http://ftf.tsu.ru/node/818>

До новых встреч!

Со-Председатель  
Программного комитета конференции  
Профессор Глазунов А.А.,  
Председатель Организационного комитета конференции  
К.ф.-м.н., Орлов М.Ю.

## PREFACE

17–19 November 2014 at the National Research Tomsk State University hosted the annual International Youth Scientific Conference "Currently issues of modern continuum mechanics and celestial mechanics – 2014". The conference brought together young researchers from Russia, Kazakhstan, Ukraine, Bulgaria, Poland, Serbia, Canada and Italy. In Russia, the conference participants were young scientists from Tomsk, Moscow, Novosibirsk, Barnaul, N.Novogorod, Kazan, Komsomolsk-on-Amur, Birobidzhan, Novokuznetsk and other cities.

Dean of the Faculty of Physical technical prof. Schrager E.R. welcomed the participants and wished good scientific work. Plenary reports made by the representative of "KuzbassSpetsVzryv" ltd., which is the story of the company's ability to manufacture blasting in the vast territory of Siberia. Chief Engineer Ph.D. Sadokhin A.N. demonstrated the most interesting work on the topic of explosive loading of geological materials and did not rule out cooperation in experimental studies. Senior researcher Ph.D. Cherepanov R.O. (Institute of Applied Mathematics and Mechanics at Tomsk State University) reported about the possibilities of wavelet-transforms to solve modern problems of continuum mechanics.

Report Ph.D. Bobsunovskiy A.B. dedicated hybrid circuit monitoring system, which based on the measured parameters solve the inverse problem of determining the deformation structures bearing structures. Future researcher presented new products innovative company "Sarov Engineering Center" ltd. The results of the Russian-Polish research announced in the last report on the subject of shock-explosive loading ice. A new development of Tomsk scientists to study the dynamic fracture of Condensed Matter: mobile laboratory "Explosive loading of natural and geological materials" was presented.

One of the main goals of the conference was to attract and retain the science and innovation of young researchers – the future of Russian science. 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. Aspects of theoretical mathematics,
6. Mathematical and physical modeling of technical and natural systems.

At the close of the conference was attended by Academician Lipanov A.M., director Institut Mechanics UB RAS (Izhevsk). Academician spoke about the fruitful work to address practically significant problems for the space industry and awarded diplomas for the best reports the young participants.

Information about the conference can be found at: <http://ftf.tsu.ru/node/818>

*Until next time!*

Co-chairman Conference Program Committee  
Professor *Glazunov A.A.*

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

# ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

---

---

## PLENARY SESSION

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДСТВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

### THE USE OF MATHEMATICAL MODELING FOR THE SAFE OPERATION OF BUILDINGS AND STRUCTURES

**А.А. Кулешов, В.А. Солоненко, А.А. Ящук, А.Б. Бовсуновский,  
С.Б. Турсынханов**

**A.A. Kuleshov, V.A. Solonenko, A.A. Yashchuk, A.B. Bovsunovsky, S.B. Tursynhanov**

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики  
Томского государственного университета  
Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University  
rainbow@niipmm.tsu.ru

Большинство вопросов по обеспечению безопасности зданий и сооружений решаются на этапе проектирования с использованием математических моделей различной сложности и назначения. На этом использование математических моделей, как правило, заканчивается, а контроль безопасности при эксплуатации зданий и сооружений проводится на основе периодического или непрерывного мониторинга [1].

Классическая схема системы непрерывного мониторинга включает в себя измерительную систему и систему контроля измеренных параметров, где полученные данные сопоставляются с предельными значениями или допустимыми интервалами. Эти предельные значения и границы интервалов, определяются еще на этапе проектирования. Основным достоинством такой схемы является быстрота оценки данных, поступающих на вход системы контроля. Существенным же недостатком является отсутствие сведений о распределении контролируемых параметров в точках, где датчики измерительной системы не установлены.

В данной работе рассматривается использование гибридной схемы системы мониторинга, в которой на основе измеренных параметров решается обратная задача деформирования несущих конструкций сооружения. Результатом решения данной задачи является полная картина напряженно-деформированного состояния объекта мониторинга и возможность анализа контролируемых параметров по всем без исключения элементам конструкции.

Предлагаемая система является развитием системы мониторинга морской причальной конструкции [2]. Существенным дополнением к ранее реализованной схеме является учет воздействия гармонических

вибрационных нагрузок, которые возникают в результате работы мощного производственного оборудования. При этом в качестве статических и квазистатических нагрузок продолжают рассматриваться перепад температур воздуха, давления ветра и снега на стены и крышу сооружения.

В качестве объекта мониторинга рассмотрено строящееся промышленное здание фиксированной этажности с габаритными размерами 96x42x38 м. Архитектурно-конструктивной особенностью здания является металлический каркас рамно-связевого типа, изготовленный из стали. В процессе исследования на основе проектной документации построена геометрическая модель несущей конструкции, где большинство балочных профилей представлено в виде комплекса оболочек. Часть балок (например, перекрытия крыши) представлены линейными геометрическими моделями. На основании построенной геометрии создана математическая конечно-элементная модель и проведен ряд расчетов с целью определения мест установки датчиков измерительной системы.

В предложенный состав измерительного комплекса входят: датчики позиционирования в пространстве (GPS, лазерного или иного типа) для установки на крыше сооружения; датчики деформации (типа MuST на основе оптоволокна) для установки на вертикальные несущие колонны; акселерометры для установки на горизонтальные несущие балки этажных перекрытий; температурные датчики для установки внутри помещения.

В процессе решения обратной задачи деформирования несущих конструкций сооружения в блоке решателя измеренные значения деформации очищаются от динамического «шума» (усреднением по времени) и вклада температурных деформаций (на основе измеренной температуры). Затем вычисляются вклады ветровой и снеговой нагрузки. На основе показаний акселерометров определяются фазы гармонического воздействия промышленного оборудования. Итоговая картина напряженно-деформированного состояния объекта вычисляется как линейная комбинация заранее вычисленных деформационных картин по каждому из видов нагружения. Вклад динамических нагрузок вычисляется на основе заранее вычисленных собственных форм конструкции.

Разработанная системный позволяет проводить мониторинг объекта в режиме близком к реальному времени [3].

Работа выполнена в рамках договора № УРГАЛ 13/3180А от 30.01.2014 с ОАО «Ургалуголь».

### *Литература*

1. Болдырев Г.Г., Идрисов И.Х., Валеев Д.Н., Живаев А.А. Опыт практического применения систем мониторинга конструкций зданий // В мире неразрушающего контроля. СПб., 2010. С. 54-60



2. Бовсуновский А.Б., Бутов В.Г., Кулешов А.А., Солоненко В.А., Яцук А.А. Система мониторинга причальной конструкции // Изв. вузов. Физика. Томск, 2013. №7/3. С. 137–139.

. ГОСТ Р 22.1.12-2005. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования. М.: Изд-во стандартов, 2005. 23 с.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОБТЕКАНИИ ТЕЛА СЛОЖНОЙ ФОРМЫ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ПОТОКОМ EXPERIMENTAL STUDY OF GAS DYNAMICS AND HEAT TRANSFER IN A BODY OF COMPLEX SHAPE HIGH FLOW**

<sup>1,2</sup> С.Б. Маслов, <sup>2</sup> В.А. Архипов, <sup>2</sup> В.В. Фарапонов, <sup>2</sup> И.К. Жарова

<sup>1,2</sup> E.A. Maslov, <sup>2</sup> V.A. Archipov, <sup>2</sup> V.V. Farapov, <sup>2</sup> I.K. Zharova

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

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики  
Томского государственного университета

<sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic University

<sup>2</sup>Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University  
maslov\_eugene@mail.ru

Ключевым направлением в повышении дальности и скорости полета летательных аппаратов (ЛА) с внутриатмосферной зоной эксплуатации является применение прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД). Любой воздушно-реактивный двигатель имеет воздухозаборное устройство и выходное сопло для выпуска рабочих газов, сила реакции которых создает рабочую тягу.

Прямоточные воздушно-реактивные двигатели имеют входной диффузор, камеру сгорания с горючим, воспламенительные устройства, стабилизаторы пламени и выходное сопло. Сжатие воздуха в диффузоре ПВРД происходит за счет его кинетической энергии, вследствие чего ПВРД могут работать только в потоке воздуха. Набегающий поток воздуха поступает в расширяющийся диффузор и частично теряет скорость. Давление, плотность и температура на входе в диффузор повышаются и тем больше, чем больше начальная скорость потока. Поджатый в диффузоре воздух поступает в камеру сгорания и смешивается с продуктами газификации горючего, имеющими недостаток окислителя. При сгорании образовавшейся газовой смеси энтальпия возрастает, а давление незначительно уменьшается. Продукты сгорания истекают из выходного сопла со скоростью, большей скорости набегающего потока.

При полете ЛА со скоростью, в три раза превышающей скорость звука, давление в камере ПВРД может повыситься примерно в 25 раз. При скоростях, меньших примерно половины скорости звука, повышение

давления за счет торможения набегающего потока в диффузоре незначительно (не более, чем на 20 %), свободная энергия горячих газов мала, и в кинетическую энергию преобразуется лишь малая часть энтальпии продуктов сгорания. Вследствие этого при малых скоростях (числах Маха  $M < 0.5$ ) ПВРД неэффективен.

Одним из способов повышения эффективности ПВРД является подогрев поступающего в диффузор воздуха, вследствие чего давление в прямоточном двигателе заметно повышается. При этом за счет потерь энергии на трение и удары скорость истечения меньше скорости воздуха на входе в диффузор и на двигатель действует только сила аэродинамического сопротивления. При скоростях полета, превышающих скорость звука более, чем в три раза, прямоточные двигатели оказываются более экономичными, чем какие-либо другие двигательные установки. В ракетно-прямоточных двигателях в качестве источника тепловой энергии могут применяться жидкие, твердые, пастообразные и порошкообразные топлива.

В ПВРД горючее выбирается по теплоте сгорания, стоимости и эксплуатационным характеристикам. Высокая баллистическая эффективность твердых горючих материалов (ТГМ) может быть достигнута путем использования компонентов с высокой плотностью, при горении которых выделяется максимальное количество теплоты, а в продуктах сгорания преобладает доля легких двухатомных газов. Однако при разработке оптимальных композиций ТГМ, обладающих указанными свойствами, необходимо учитывать накладываемое на содержание горючего-связующего ограничение: объемная доля горючего-связующего в составе композиции не должна быть ниже величины, обеспечивающей возможность изготовления заряда с требуемыми физико-механическими характеристиками. Разработка ТГМ с высокой теплотворной способностью и скоростью газификации при обдуве ТГМ дозвуковым и сверхзвуковым потоками воздуха является актуальной задачей.

Не менее актуальна задача моделирования нестационарных процессов в проточном тракте ГПВРД, снабженном зарядом ТГМ. Математическое моделирование течения в моделях ГПВРД позволяет уже на этапе проектирования определить структуру потока и распределения газодинамических параметров (давление, скорость, температура) по каналу модели с учетом газификации ТГМ и изменения геометрических параметров канала вследствие выгорания ТГМ. Для построения адекватных математических моделей получение объективной экспериментальной информации о газодинамике и теплообмене при течении газового потока в канале образца ТГМ в диапазоне чисел Маха  $M = 0.2 \div 6.0$ .

Для экспериментального исследования структуры потока в канале сложной формы разработаны плоская и осесимметричная модели ГПВРД и проведены испытания в рассматриваемом диапазоне чисел Маха на

модернизированной аэродинамической установке. В процессе испытаний разработанных моделей ГПВРД получена информация о полях скоростей, температуры и давления.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грант РФФИ № 14-38-50592-мол\_НР.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ ЛЬДА THE INVESTIGATION OF THE ICE UNDER EXPLOSIVE LOADING**

<sup>1</sup>М.Ю. Орлов, <sup>2</sup>Л.С. Кружка,

<sup>1</sup>M.Yu. Orlov, <sup>2</sup>L.S. Kruzka

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики

Томского государственного университета

Военно-технологическая академия им. Я. Домбровского,

Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University

Military University of Technology, Poland

orloff\_m@mail.ru

The research of the behavior of certain natural materials are now relevant. This is due to the development of the northern territories, the extraction of natural resources in the Far North, etc. Currently, few works were devoted to this scientific problem (Carney K.S. et al. 2006; Combescure A et al. 2011; Sherburn A. et al. 2010; Gorelski V.A. et al. 2012; Orlov M. Yu. et al. 2014). It is known that many natural materials under certain conditions have a common mechanism of destruction.

Ice is a little known natural material. The modern concept of failure the ice are just beginning to develop. This is due to the complex structure of the ice, the presence of phase transitions during deformation, unique plastic properties. There are over 16 types of ice, the latter type of ice has an extraterrestrial origin. In the United States resumed the program “SCICEX” within which there is a collection of scientific data using the ships of the Navy. The existing experimental data on dynamic loading of ice is not consistent with each other due to the complex structure of ice. Experimental data on explosive loading of ice were not found.

In laboratory 21 of the Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics at Tomsk State University has developed a new physical-mathematical model of ice behavior under the shock and explosive loads, a numerical method to calculate its stress-strain state with allowance for its fragmental failure (Glazyrin V.P. et al. 2006;). Also the scientific data (theoretical and experimental) on the behavior of polycrystalline ice under shock and explosion have been summarized. Was modified numerical method for the calculation of explosive loading of ice for the problems of explosive destruction of thick ice (2 meters). For the development of a numerical method requires

reliable experimental data on the processes of destruction the ice with explosive conditions.

Laboratory 21 of the Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics at Tomsk State University has developed a new physical-mathematical model of ice behavior under the shock and explosive loads, a numerical method to calculate its stress-strain state with allowance for its fragmental failure. Also the scientific data (theoretical and experimental) on the behavior of polycrystalline ice under shock and explosion have been summarized.

In the present research was to investigate the process of explosive loading of bar ice. The object of this study is the medium first year ice. The explosive mass was 8 kg. The diameter holes in the ice was 11 cm. The ice thickness was 70 cm. The full-scale tests was conducted in this year on the Tom River in Siberian. The ice cover has been studied in detail for the presence of polynyas and other defects (crack, thaw holes, etc). The depth of water under the ice cover was more than 7 meters. The width of the river at this place was more than 500 meters. The water flow was not significant. The full-scale tests were carried out in conjunction with "KuzbassSpetsVzryv."

After under explosive the following results were obtained. Ice formed lane diameter of 4.3-4.5 meters. The geometrical shape of the lane was close to a circle. Detonation products formed by a large number of small fragments of ice, which can be seen in and around the lane. Large fractions of ice (more than 100 cm) is not found. Radius scatter debris was about 5 meters. Radial cracks on the surface of the ice is not revealed. The data are summarized in a relational database «EplosiveIceBaseDate».

The reported study was partially supported by RFBR, research projects №13-08-00509a, №13-08-00296a.

#### *Literature*

1. Physics and mechanics of ice Symposium. Copenhagen, Technical University of Denmark, Editor P. Tryde, 1983, p. 352.

2. *Glazyrin V.P., Orlov M.Yu. and Orlov Yu.N.* The destruction of the ice under the detonation products, *Physics*, no 8/2, 51 (2008), p. 136–142.

### **ООО КУЗБАСССПЕЦВЗРЫВ: ПРОИЗВОДСТВО ВЗРЫВНЫХ РАБОТ**

### **KUZBASSPETS SVZRYV COMPANY: PRODUCTION BLASTING**

ООО «КузбассСпецВзрыв»

Ltd "KuzbassSpetsVzryv"

**А.Н. Садохин**

**A.N. Sadochin**

ksv158@mail.ru, ksv@kusbass.net, kusbassv@mail.ru

На сегодняшний день ООО «КузбассСпецВзрыв», располагая производственной базой и высококлассными специалистами, а также необходимым оборудованием для ведения взрывных работ и доставки ВМ

до места производства взрывных работ имеет лицензии на применение и хранение взрывчатых материалов промышленного назначения. Расширяя сферу производственной деятельности в 2012 г., нами получено свидетельство СРО НП «Межрегиональное объединение строительных компаний» на отдельные виды работ, включая буровзрывные и горнопроходческие работы.

Успешная работа предприятия заключается в применении современных технологий сноса сооружений, в использовании уникальной современной техники для безопасного разрушения и промышленного демонтажа строений. Без преувеличения можем сказать – мы обладаем богатым опытом по демонтажу производственных зданий и сооружений не только в Кузбассе, но и во многих регионах России. Наше предприятие готово выполнять работы по сносу зданий и сооружений всех типов. Осуществляем быстрый, эффективный и максимально безопасный снос сооружений и зданий всех типов: промышленных, жилых, подземных убежищ, дымовых труб, элеваторов и силосов и других строительных конструкций из сборного и монолитного железобетона.

Взрывными работами, выполняемыми с применением взрывчатых веществ, обладающими большим количеством скрытой химической энергии, на строительстве разрабатываются скальные породы и производится рыхление мерзлых и тяжелых глинистых грунтов; для образования выемок различного назначения; для разрушения зданий и сооружений, подлежащих сносу, для дробления льда на крупных реках в весенний период, для корчевания пней и пр.

В строительстве для взрывных работ применяют главным образом промышленные ВВ, к которым относятся аммиачно-селитренные взрывчатые вещества – аммонит, аммонал, динамон и др. как менее опасные в обращении и игданит, составные части которого совершенно безопасны в обращении.

При возможности решения ключевых вопросов демонтажа выведенных из эксплуатации зданий и сооружений, а также при ликвидации недействующих производств, химически опасных предприятий бывшего советского оборонного комплекса и ликвидации чрезвычайных ситуаций применяются различные технологии специальных взрывных работ. Разработанные и реализуемые на нашем предприятии технологии взрывных работ, позволяют снижать вредное воздействие взрыва на окружающую среду до минимума и обеспечить промышленную безопасность труда, что допускает производить работы в стесненных условиях, в условиях действующих промышленных производств и коммуникаций, вблизи жилых застроек.

Наше предприятие базируется в Кузбассе и выполняет работы полностью собственными силами и средствами, самостоятельно решая весь комплекс подготовительных работ и взрывного дела, а также

рекультивации территории с экологическим мониторингом. Подготовительный этап, необходимый для начала производства взрывных работ, управленческий состав нашего предприятия решает в сжатые сроки, что позволяет нам производить работы на всей территории Российской Федерации.

Руководство ООО «КузбассСпецВзрыв» приветствует участников международной молодежной научной конференции «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики-2014» и является партнером секции №1 «Взрывные, детонационные процессы и свойства вещества при высокоэнергетических воздействиях». Желает плодотворной работы и новых научных результатов. Приглашаем к сотрудничеству в рамках грантов РФФИ, ФЦП «Научные кадры» для проведения экспериментальных взрывных работ.

### *Литература*

1. <http://кузбасспецвзрыв.рф/articles>

## **ООО «САРОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР» SAROV ENGINEERING CENTER LTD**

**М.А. Кочетков**

**М.А. Kochetkov**

ООО «Саровский инженерный центр»

Sarov Engineering Center Ltd

[mkochetkov@saec.ru](mailto:mkochetkov@saec.ru)

«Саровский Инженерный Центр» занимается развитием инновационных технологий компьютерного моделирования мирового уровня и их внедрением в практическую работу Российских предприятий на основе эффективных решений широкого круга прикладных проблем механики сплошных сред: статической, динамической, вибрационной прочности и тепломассопереноса: аэродинамики, газодинамики, гидравлики, теплопроводности.

Компания «Саровский Инженерный Центр» является научно-инженерным предприятием, работающим в области компьютерных технологий инженерного анализа. Специалисты компании имеют многолетний опыт работы в различных отраслях промышленности (авиация, космонавтика, атомная энергетика, нефтегазовая и автомобильная промышленность, машиностроение, охрана окружающей среды и др.), предоставляя отечественным и зарубежным предприятиям комплексные высокоточные инженерные решения с использованием технологий вычислительной гидрогазодинамики и прочностного анализа (CAD, CAE, FEA, CFD технологии).

Компания «Саровский Инженерный Центр» – единственный официальный представитель компании CD-adapco и официальный представитель компании Dassault Systemes SIMULIA на территории России и стран СНГ. Специалисты СИНЦ оказывают весь спектр услуг, включая комплексную интеграцию (поставку, обучение, техническую поддержку) программных комплексов CD-adapco и Dassault Systemes SIMULIA, а также выполняет расчеты на собственных вычислительных ресурсах по техническим заданиям Заказчиков.

Специалисты компании «Саровский Инженерный Центр» по инженерному анализу начали работать с промышленными предприятиями России в конце 80-х гг. выполняя компьютерные статические, динамические и тепловые расчеты различных машиностроительных конструкций. С конца 90-х гг. наши ученые и инженеры принимают участие в международном сотрудничестве. Инженеры СИНЦ прошли обучение в США и Европе в компаниях-разработчиках инженерного программного обеспечения STAR-CCM+ – CD-adapco (New York), LS-DYNA – LSTC (Livermore), Abaqus – Dassault Systèmes SIMULIA.

Развитие сотрудничества с компанией CD-adapco, начиная с 1999 г. привело к установлению прочных партнерских отношений. В настоящее время СИНЦ является официальным представителем компании CD-adapco в России, проводит тестирование и развитие программы STAR-CCM+ и других продуктов компании CD-adapco, активно и широко применяет новейшие средства компьютерного моделирования для решения сложных инженерных проблем в различных отраслях гражданской промышленности России.

Компания «Саровский Инженерный Центр» активно сотрудничает с различными российскими вузами: Московским государственным университетом, Самарским государственным аэрокосмическим университетом, Нижегородским государственным университетом, и др., содействуя повышению уровня научных исследований и качества подготовки студентов в области численных методов решения задач термогазодинамики.

Цель нашей компании: создание долгосрочных взаимовыгодных отношений с предприятиями страны на основе внедрения передовых компьютерных технологий мирового уровня.

### *Литература*

1. [www.saec.ru](http://www.saec.ru)
2. [www.cd-adapco.com](http://www.cd-adapco.com)
3. [www.3ds.com/ru](http://www.3ds.com/ru)

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

---

---

Session 1  
**EXPLOSION, DETONATION PHENOMENA AND  
PROPERTIES OF MATTER AT HIGH-INTENSIVE**  
**РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ  
БЕЛКА ИЗ КОСТИ**  
**DEVELOP ELECTRICAL TECHNOLOGY FOR PROTEIN  
EXTRACTION FROM BONE**

**А.К. Абишева, Е.О. Такиров, А.К. Хасенов, А.М. Джумаев**  
**А.К. Abisheva, E.O. Takirov, A.K. Khassenov, A.M. Dzhumayev**  
Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова  
Karaganda State University named after Y.A. Buketov  
a7jan@mail.ru

С каждым годом возрастающий в мире недостаток белка для обеспечения питания человека ставит проблему поиска новых и нетрадиционных источников белков. На сегодняшний день их производство должно быть более экономичным и эффективным. При этом необходимо повышать безотходность технологий, учитывать требования снижения энергических затрат и защиты окружающей среды. В этой связи создание эффективных и экономичных технологий производства белка и развитие научно-технического прогресса является актуальной проблемой, имеющей важное хозяйственно-бытовое значение [1].

Органические вещества находятся во всех растительных и животных организмах. О запасе белков в природе можно судить по общему количеству живого вещества на и нашей планете: масса белков составляет примерно 0,01% от массы земной коры.

Предлагается способ извлечения белка из костной массы с использованием электрогидравлического эффекта, который позволяет повысить эффективность выделения биологически ценного продукта и уменьшить энергические затраты на измельчение костного сырья. Изучается биологическая роль белков и их свойства. Представляется общий вид лабораторного участка установки. Осуществляется сравнение результатов по разным параметрам частоты следования импульсов, температуры и давления в среде, размеров частиц кости.

Обезжиривание кости и извлечение белка из матрикса осуществляется несколькими известными методами: с помощью кипящей воды, импульсным, гидромеханическим, экстракционным и др. Обязательным



условием обезжиривания кости является присутствие воды. Жир из костей вытапливают в условиях контакта с водой, так как иначе весь вытопленный, выжатый, расплавленный жир останется в кости. И поэтому вода, проникая внутрь кости, способствует разрушению морфологических образований [2].

ЭГЭ имеет широкое применение при обработке металлов (штамповка, развальцовка, очистка), дроблении горных пород, в получении различных коллоидов, в вибрационной технике, в горном деле, и даже в медицине (при экстракорпоральном дроблении камней в почках, мочевом и желчном пузыре человека).

Повышение качества изделий в ряде случаев связано с обеспечением химического состава материала. Использование механических дробилок считается не эффективным, в связи с изнашиванием инструмента и попаданием его частиц в приготавливаемый порошок. Функцию инструмента при электрогидравлическом дроблении выполняет жидкость, в основном вода [3].

Лабораторные исследования по извлечению жира из кости и белка из костного матрикса проводятся при отсутствии в окружающей среде токопроводящей пыли, паров, химически активных веществ, разрушающих изоляцию электродов, при температуре окружающего воздуха от +18 до +40<sup>0</sup>С и относительной влажности не более 75 % (при температуре +20<sup>0</sup>С).

Исследования по электрогидродинамическому способу показали, что биологическая ценность готового пищевого растворимого белка из кости превышает аналогичный показатель по сравнению с ранее известным способом в среднем на 18%. При этом выход пищевого белка, полученного по предлагаемой технологии, повышается в среднем до 52–53% по сравнению с известными способами.

### *Литература*

1. *Ленинджер А.* Основы биохимии: в 3 т. М.: Мир, 1985. 1051 с.
2. *Соколов А.А.* Методы извлечения жира // Технология мяса и мясопродуктов. М.: Пищевая промышленность. 1970. 740 с.
3. *Юткин Л.А.* Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение; Ленинград. отд-е, 1986. 253 с.

# ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПОРОШКОВ TECHNOLOGY FOR PRODUCING SILICON POWDER

**А.Ж. Бейсенбек**

**A.Zh. Beisenbek**

Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова

Karaganda State University named after Y.A. Buketov

anuar\_beysenbek@mail.ru

В настоящее время возникла большая потребность порошков кремния с высокой частотой в различных производствах и в областях техники. В парфюмерной промышленности порошки кремния используют при изготовлении солнцезащитной косметики, а элементный кремний получают в основном для полупроводниковой техники, в остальных случаях кремний используется как легирующая добавка в производстве сталей и сплавов цветных металлов. Наибольшее применение кремний находит в производстве сплавов для придания прочности алюминию, меди и магнию. Кристаллы кремния применяют в солнечных батареях и полупроводниковых устройствах – транзисторах и диодах. Приборы, изготовленные на кремниевых кристаллах, нашли применение в ядерной физике, инфракрасной оптике и других областях техники. Все перечисленные области использования представляют многотоннажные производства и высокий потребительский спрос, а также требует эффективную технологию с высокой производительностью [1].

Есть различные традиционные технологии и методы получения кремниевых порошков, однако они имеют свои недостатки. Известны способы получения порошков кремния с использованием азотом и гелием, что сильно увеличивает стоимость процесса, а также сложность аппаратного оформления и низкий выход порошков. К недостаткам метода дробления и измельчения относятся повышенные энергоемкости, небольшие степени дробления, а также при длительной эксплуатации мельницы шары и стержни изнашиваются. Это приводит к деформации формы, которая ухудшает процесс измельчения и поэтому периодически производится пересортировка шаровой загрузки.

В связи с вышесказанными недостатками возникает необходимость создать экономичную и эффективную технологию, обеспечивающие промышленную потребность производства кремниевых порошков. При Карагандинском государственном университете им. Е.А. Букетова в лаборатории «Электрогидродинамики» кафедры инженерной теплофизики создана электроимпульсная установка для измельчения металлургического кремния.

Водная среда, в которой происходит высоковольтный электрический разряд, является трансформатором энергии, выделившейся в канале разряда и вследствие малой сжимаемости приводит к резкому росту

давления. Электроимпульсный способ измельчения позволяет регулировать гранулометрический состав готового продукта с повышенной избирательностью [2, 3].

Экспериментальные исследования проводились при следующих постоянных параметрах установки: емкость конденсаторной батареи  $C=0,5$  мкФ; энергия разряда 112,5 Дж. и при различных значениях количество импульсов ( $n = 500, 750, 1000, 1250$ ). А исходный диаметр металлургического кремния составлял 5 мм.

Результаты исследования показали, что степень измельчения металлургического кремния измельченной до 0,2 мм при значении количества разряда импульсов 500 весьма низкой (21,6%), с увеличением количества разряда импульсов (от 750 до 1250 ударов) степень измельчения кремния возрастает и приблизительно одинакова (30,8; 34; 36%), оптимальным значением количества разряда импульсов является 1000, так как выход готового продукта измельченной до 0,2 мм составил 34%.

Элементный анализ металлургического кремния, обработанного электроимпульсным методом, проведены на сканирующем электронном микроскопе Tescan MIRA 3. Полученные данные химического анализа сравнивались с полученными образцами на вибрационно-конусном дробилке «ВКДМ 6». Экспериментальные данные показали, что основной элемент Si увеличился от 91,62 до 96,65 %.

Электроимпульсная технология позволяет измельчить кремний до нужной фракции. Полученные результаты дают возможность получить более обогащенный продукт, по сравнению с механическими дробилками и мельницами.

### *Литература*

1. Немчинова Н.В., Клёц В.Э. Кремний: свойства, получение, применение: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008. 272 с.
2. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, 1986. 253 с.
3. Нусупбеков Б.Р., Хасенов А.К., Нусупбеков А.Б. Разрушение металлургического кремния электрогидравлическими импульсными разрядами. Деформация и разрушение материалов. М., 2012, №9. С. 37–39.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАЧАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ЗАДАЧ  
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ  
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
ТРУБОПРОВОДОВ**

**DETERMINATION OF INITIAL DATA FOR PROBLEM  
MATHEMATICAL SIMULATION TO EVALUATE THE  
STRESS-STRAIN STATE OF PIPELINES**

**Богомолов Г.Н.  
Bogomolov G.N.**

ЗАО "Нижневартовский центр по техническому освидетельствованию оборудования и  
промышленной экспертизе объектов" (ЗАО "НЦТО")

Close joint-stock company "Nizhnevartovsk center of technical survey of the equipment and  
industrial examination of objects"

bogomol-ncto@mail.ru

На территории Ханты-Мансийского автономного округа по данным на 1 января 2014 г. добывается 48,7% общероссийского объема добычи нефти. В эксплуатации находится 476 месторождений, крупнейшее из которых Самотлорское месторождение, расположенное в непосредственной близости с г. Нижневартовском. Добыча попутного нефтяного газа в ХМАО составляет 52% от общероссийского, переработкой попутного нефтяного газа занимается 9 крупных газоперерабатывающих заводов [1, 2].

Для обеспечения непрерывного производства по добычи такого объема углеводородного сырья используется более 80 тыс. км. трубопроводов различного назначения. Большая часть общего количества трубопроводов построена еще в 70-80-х гг. прошлого века, максимальный срок эксплуатации которого 30 лет. С каждым годом износ трубопровода увеличивается, что влечет за собой увеличение потенциальной опасности возникновения аварий, которые помимо материального ущерба нефтяным компаниям, наносят и экологический урон окружающей среде [3].

С целью выявления аварийных участков и своевременного ремонта, а порой их заменой, Ростехнадзором введены правила по техническому диагностированию и экспертизе промышленной безопасности объектов нефти и газа. Для проведения неразрушающего контроля, основного инструмента оценки состояния объекта, используются различные методы, утвержденные ПБ 03-440-02 "Аттестация персонала в области неразрушающего контроля": визуально-измерительный, радиационный, ультразвуковой, проникающими веществами, магнитный, вихретоковый, вибродиагностический, акустико-эмиссионный, тепловой, электрический и т.д. Каждый из методов требует определенный вид оборудования и уровень квалификации специалистов, с допуском работ на конкретный тип объекта.

Одним из относительно молодых методов является контроль напряженно-деформированного состояния. Согласно ГОСТ Р 52330-2005 "Контроль неразрушающий. Контроль напряженно-деформированного состояния объектов промышленности и транспорта. Общие требования" данный метод неразрушающего контроля основывается на выявлении зон концентрации напряжений, определении степени концентрации и характера внутренних механических напряжений, оценку распределения полей и кинетику развития зон концентрации напряжений. Сопоставление результатов с расчетными и предельными значениями параметрами НДС исследуемого материала. Вокруг данного метода до сих пор ведутся бурные дискуссии об его актуальности, практической реализации и эффективности. Сложность реализации данного метода состоит в определении начальных данных о степени напряженности действующего объекта, в данном случае трубопровода, его марки стали, температуры, толщины, имеющихся дефектах; каким внешним нагрузкам подвергался за время эксплуатации и соблюдались ли технологии строительства, согласно проектной документации.

С развитием численных методов увеличением производительности ЭВМ создания новых подходов и методов появилась возможность по-новому рассматривать вопрос оценки НДС трубопровода. Использование методов математического моделирования позволяет не только получить количественные данные о напряженном состоянии трубопровода, но и получить качественные данные с выделением зон максимальных значений внутренних напряжения, что, в свою очередь, позволяет проводить проверку результатов с помощью прибора на самом объекте.

В работе представлены виды параметров, которые можно определить на действующем трубопроводе, при помощи имеющегося в лаборатории неразрушающего контроля ЗАО "НЦТО" оборудования, обозначена реальная проблема, произошедшая на одном из обслуживаемых объектах и предложен один из вариантов решения оценки НДС трубопровода при помощи компьютерного моделирования.

### *Литература*

1. ОАО "СИБУР Холдинг". М., 2014 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.sibur.ru>
2. Аналитический отчет "Производство и переработка попутного нефтяного газа в России". М., 2013 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.rupec.ru>
3. Канева М.П., Протасов А.А., Коровин В.А., Подлеснова В.И. Формирование системы мониторинга состояния нефтепромысловых трубопроводов в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре // Вестн. недропользователя ХМАО. 2007. Вып. 18.

# **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ МАССИВА ИЗВЕСТНЯКА EXPERIMENTAL STUDY OF THE PROCESSES OF EXPLOSIVE LOADING ARRAY LIMESTONE**

**В.В. Голубятников, М.Ю. Орлов**

**V.V. Golubatnikov, M.Yu. Orlov**

Национальный исследовательский Томский государственный университет

National Research Tomsk State University

orloff\_m@mail.ru

Экспериментально исследован процесс взрывного нагружения известнякового массива на одном из промышленных карьеров Томской области. Объект исследования природный известняк. Экспериментальные работы осуществлялись на территории карьера общей площадью около 100 м<sup>2</sup>. Перед взрывными работами был проведен первичный осмотр, который подтвердил отсутствие дефектов поверхности, воды под массивом на глубине не более 10 метров. Наличие трещин в приповерхностных слоях известняка также не обнаружено.

На базе НИИ Томского государственного университета создана мобильная лаборатория «Взрывное нагружение природных материалов», объектами исследования которых являются лед, известняк (различной твердости), уголь, гранит и т.д. Планируется создать одноименную реляционную базу данных. Отметим, что настоящая экспедиция является уже 5-й.

Постановка натурального эксперимента заключалась в следующем. В массиве были сделаны 4 скважины диаметром 110 мм каждая. Глубина каждой скважины составила 4 м, а расстояние между ними 3 м. В качестве взрывчатого вещества использовалась смесь эмульста Ас-30 ФП и гранулита ПС-2 массой почти 30 кг. Средством инициирования был детонирующий шнур ДШЭ-12. Эксперимент проведен в конце октября 2014 г. совместно с ОАО «КузбассСпецВзрыв» в дневное время суток. Температура воздуха около 0 °С. Взрывались сразу 4 скважины.

В результате подрыва ВВ было получено следующее. Массив известняка был полностью разрушен в радиусе 12 м. Осколки природного камня можно было обнаружить в радиусе 50 м, причем встречались крупные камни размерами в диаметре не менее полуметра. Под действием продуктов детонации образовывалась пыль, которая оседала еще некоторое время после подрыва заряда. Экспериментальная площадка (вернее ее остатки) были зафотографированы через 5 мин после взрыва ВВ.

В заключение отметим, что количество ВВ (30 кг) является чрезмерным для проведения эксперимента. В результате не удалось измерить и детально изучить диаметр и глубину взрывного кратера. Необходимые результаты можно будет достичь либо уменьшением массы ВВ либо увеличением глубины скважины.

Работа выполнена при поддержке РФФИ 13-08-00509а.

## *Литература*

1. Орлов М.Ю., Богомолов Г.Н., Голубятников В.В., Садохин А.Н. Исследование процессов динамического нагружения природных материалов. Ч. 1: Эксперимент и расчет взрывного нагружения известняка // Фундаментальные основы баллистического проектирования: IV Всероссийская научно-техническая конференция. Санкт-Петербург, 23–28 июня 2014 г.: сб. материалов / под ред. Б.Э. Керта; Балт. гост. техн. университет. СПб., 2014. С. 164–165.

## **ДРОБЛЕНИЕ ВОЛЛАСТОНИТОВОЙ РУДЫ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНЫМ СПОСОБОМ WOLLASTONITE ORE CRUSHING ELECTROHYDROIMPULSE WAY**

**А.М. Мекеева, Е.Е. Тлеуберлиев**

**A.M. Mekeyeva, Y.Y. Tleuberliev**

Карагандинский государственный университет им. академика Е.А.Букетова

Karaganda State University of the name of E.A.Buketov

aikent\_2492@mail.ru

В последние годы развитие научно-технического направления требует особого внимания в нахождении новых минералов, соответственно, новых методов их обработки. И на сегодняшний день привлечено особое внимание на природный минерал – волластонит. Как показали геологические исследования, Казахстан имеет большие запасы минералов, в том числе волластонитовых руд. Для расширения области применения минерала требуются новые методы его обработки. Применение измельченного волластонита позволит получить не только новейшие продукции с важными свойствами, но и способствует развитию промышленности РК, то есть развитию экономики, пользуясь дефицитом природного минерала в европейских странах [1].

На сегодняшний день известны методы обработки волластонитовых руд и работающие промышленные установки, так называемые механические дробильные установки. Используемый сухой метод обогащения требует больших затрат энергии, ему присуща неэкологичность, а также неэффективность выработки волластонита из минерала. Мы предлагаем разрядно-импульсную технологию для измельчения минерала, в основе которого лежит принцип электрогидравлического эффекта в жидкости (дробление волластонитовой руды электрогидроимпульсным способом).

Для исследовательских работ было создано электрогидравлическое устройство, включающее в себя электроды, загрузочную горловину, барабанную мельницу, барабанный грохот, сетку, сборник, лифтеры, решетку, коллектор, генератор импульса токов, высоковольтный испытательный стенд, блок поджига, повышающий трансформатор и

накопитель энергии, управляемый разрядник, делитель напряжения, рабочий стакан, токовый шунт, компьютерный осциллограф [2].

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что при пробое жидкости вокруг канала разряда, возникает зона высокого давления, диаметр которой пропорционален мощности импульса. Жидкость, получив ускорение от расширяющегося с большой скоростью канала разряда, перемещается от него во все стороны, образуя на том месте, где был разряд, значительную по объему полость, названную кавитационной, вызывая основной гидравлический удар. При осуществлении последовательного ряда импульсных разрядов в жидкости каждый последующий может возникнуть только после того, как кавитационная полость от предыдущего разряда успеет захлопнуться, что и определяет возможную максимальную частоту разрядов электрогидравлической установки. Таким образом, воздействия, осуществляемые при получении энергии ударных волн, приводят к дроблению и измельчению волластонитовой руды. По предлагаемому электрогидравлическому способу измельчается волластонит, представляющий собой ценный минерал.

В процессе эксперимента преимущественное внимание было уделено двум проблемам: установлению зависимости напряжения коммутации разряда от величины межэлектродного зазора в разряднике и зависимости длины зоны разрушения от аккумулируемой энергии на накопителе. Важным моментом является то, что длина зоны разрушения не всегда прямо пропорциональна энергии взрыва. С ростом проводимой энергии наблюдается тенденция к замедлению длины зоны разрушения. Наименьшее значение энергии, при котором начинается разрушение отложений исследованной трубы диаметрами 33, 38 и 73 мм, равно около 55 Дж. Из полученных результатов следует, что длина, определяющая область разрушения, может составить, как минимум, несколько калибров диаметра трубы.

Исследования показали, что основным параметром, приводящим к интенсивному измельчению волластонитовой руды, является частота электрического разряда. При всех значениях частоты разряда наблюдается общая закономерность влияния расстояния разрядного промежутка на коммутирующем устройстве на эффективность дробления волластонитовой руды. С ростом частоты следования импульсов устанавливается равномерное дробление руды. Из полученных результатов видно, что с ростом энергии наблюдается увеличение интенсивности дробления руды, а самым оптимальным диаметром исходной фракций является 5 мм. Таким образом, основными факторами, влияющими на механизм измельчения, являются интенсивность импульса волны давления, его длительность, характер ввода энергии в канал разряда,



общая длительность процесса измельчения, высокоскоростные потоки жидкости, образуемые в результате объемной микрокавитации.

### *Литература*

1. Черноглазова Т.В. Волластонит и его применение в промышленности. Алматы: АО «Алаш», 1999.
2. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение; Ленинград. отд-е, 1986. 253 с.

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ УДАРНИКОВ С ВВ COMPRATIVE APPROACHES TO THE MODELLING OF EXPLOSIVELY FORMED PROJECTILES**

**М. Маркович, М. Милинович, П. Елек, С. Йарамаз, Д. Мицкович  
M. Markovic, M. Milinovic, P. Elek, S. Jaramaz, D. Mickovic**

Университет в Белграду, Сербия - Факультет машиностроения,  
Кафедра систем вооружения

University of Belgrade – Faculty of Mechanical Engineering, Weapon Systems Department  
mdmarkovic@mas.bg.ac.rs mmilino@mas.bg.ac.rs pelek@mas.bg.ac.rs  
sjaramaz@mas.bg.ac.rs dmickovic@mas.bg.ac.rs

In the last twenty years, EFP projectiles represent a significant concept in designing missile penetration warheads, aimed for the armored land targets as well as ship targets, air targets etc. The main feature of these types of warheads is possibility to shoot targets in motion from above at the appropriate distances, which relieves missile of requirements to achieve direct hit. This is especially important in attacks on fast cruising armored land targets. Penetrability of these projectiles [1-3] is less than traditional shaped charge warheads [4] used in direct shooting missions.

Usual shooting distance is about 50 to 150 m [5] and projectiles have used either cluster sub-munitions with appropriate searching sensors for the group shootings or integral designed missile warheads for individual shoots. The functionality of projectile is based on Miszny-Schardin phenomena [1, 2], which creates explosive formed projectile by directed explosive discharging. By explosion effect [6, 7], reshaped metal disc [8] takes part of detonation energy [9, 10] and transforms it into the kinetic energy capable to realize distance penetration.

Regarding that initial velocity is a function of several elements integrating into warhead subassemblies, the analytical method exposed in [2] and numerical [11-13] are considered as approaches in this paper to setup testing influenced parameters on the initial velocity values. These data are compared with allowable results of experimental test exposed in [14]. The aim of research is

comparing of numerical and analytical approach as reduced to the absolute EFP velocity referred as the warhead main performance.

The following conclusions are based on the presented study and obtained results:

- Analytical model gave an approximate image of the EFP forming process. However, final shape of the liner cannot be obtained by this method. Determination of EFP velocity gives acceptable results for the preliminary considerations in design.

- Numerical method gives more accurate results regarding EFP velocity in comparison with analytical method and these results are very close to experimental data. Error of numerical research was about 1.5%, comparing with analytical, where error appears about 13%. These data has to be taken as approximately confidence because of small number of experiments.

- Comparative advantage of numerical method is obviously description of the projectile form regarding covered or uncovered explosive charge. This orientated considerations of projectile purpose only by numerical and experimental testing.

- Obviously, the same configuration of liners and explosive charges with and without metal covers produced different shapes of explosive formed projectiles discovered by numerical approach. Warhead *type 1* produced EFP as the plastic solid shape with forward folded fins form, and *type 2* produced EFP in the shape of hollow cylinder with back folded fins form.

- Various types of EFP warhead give different processes forming times and the different energy distributions along axial and radial displacement directions. This could be important if system shoots targets from the various distances.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

This research has been supported by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia, through the project III-47029, in the 2014 year, which is gratefully acknowledged

## **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ ЛЬДА НА ВОДНОЙ ПОДЛОЖКЕ NUMERICAL STUDY OF THE PROCESS OF EXPLOSIVE LOADING OF ICE WATER-SUBSTRATE**

**Ю.Н. Орлова**

**J.N. Orlova**

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

National Research Tomsk Polytechnic University

orlovaun@mail.ru

В настоящее время практически значимой задачей является исследование процессов взрывного нагружения льда на воде. Практическая значимость

заключается в необходимости более эффективного разрушения толстого (2 м и больше) слоя льда при взрыве. Лед такой толщины нередко образуется на сибирских реках зимой в результате экстремально низких температур ( $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже). Цель исследований была в выявлении влияния глубины закладки заряда взрывчатого вещества (ВВ) на процесс деформирования и разрушения льда на водной подложке.

Динамическое поведение (ударное и взрывное) льда описывается с позиций феноменологической макроскопической теории механики сплошных на основе фундаментальных законов сохранения. Среда является упруго-пластической, пористой, прочной, учитывающей свойства прочности, ударно-волновые явления и совместное образование отрывных и сдвиговых разрушений. Модель разрушения не привязана к какому-либо одному критерию разрушения и допускает применение силовых, деформационных и объемных критериев разрушения. В процессе счета допускается появление новых свободных поверхностей, в том числе разделяющих рассматриваемые тела на отдельные фрагменты. Давление в продуктах детонации, которая предполагается мгновенной, выбрано в виде политропы Ландау–Станюковича. Физико-механические характеристики льда взяты из общедоступных литературных источников, фазовые переходы не учитываются [1].

Физическая постановка задача следующая. Толщина льда и глубина водной подложки были равными по 250 см соответственно. Глубина закладки ВВ варьировалась в диапазоне от 22 до 221 см. В качестве ВВ использован безоболочечный заряд тринитротолуола ТНТ: начальная плотность ВВ  $\rho_0 = 1,6\text{ г/см}^3$ , скорость детонации 6900 м/с. Масса заряда ВВ была 4,8 кг, размеры в сечении (21×23) см, заряд ВВ располагался на оси симметрии. Рассмотрено 8 вариантов закладки ВВ, в каждом последующем глубина закладки увеличивалась. На контактной границе «Лед – ВВ», «Лед – Вода», а также в кромках льда задано условие скольжения. Расчетная область автоматически разбивалась «конвертом» на 17248 триангуляционных элемента. Серия вычислительных экспериментов состояла из 8 вариантов и проведена в 2D осесимметричном случае.

Результаты расчетов получены рассчитанными конфигурациями системы «Лед – ВВ – Вода», а также в виде графиков и таблиц. Полученные результаты позволили сформулировать рекомендации по наиболее эффективному разрушения толстого льда на водной подложке. Рекомендации реализованы весной прошлого года на р. Томь в Кемеровской области ОАО «КузбассСпецВзрыв».

### *Литература*

1. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлова Ю.Н., Орлов Ю.Н., Богомолов Г.Н. Экспериментально-теоретическое исследование процессов взрывного нагружения льда // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 7–3. С. 35–37

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ СНЕГА NUMERICAL MODELING OF EXPLOSIVE LOADING SNOW

**Е.Ю. Повереннов, Е.Г. Глазова, А.В. Кочетков, С.В. Крылов**

**E.G. Glazova, A.V. Kochetkov, S.V. Krylov, E.Yu. Poverennov**

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
Nizhny Novgorod State University named NI Lobachevsky, Nizhny Novgorod  
kochetkov@dk.mech.unn.ru

Изучение процессов взрывного нагружения массивов снега является актуальным с точки зрения оценки критических параметров лавинообразования, взаимодействия снега с различными преградами и его воздействия на элементы конструкций и живые организмы. В данной работе для моделирования таких процессов используются численные методы на основе явных схем интегрирования уравнений механики сплошной среды в лагранжевых и совместных эйлерово-лагранжевых переменных. Рассматривается численное решение одномерной задачи о сферическом взрыве заряда ВВ с помощью пакета прикладных программ «Динамика-1» [1].

Снег моделируется пластической сжимаемой средой с нелинейными зависимостями давления от плотности, различными для процессов активного нагружения и разгрузки, при этом допускающей и сдвиговое деформирование. В качестве данных уравнений используются степенные зависимости, предложенные в [2]. Для верификации уравнения состояния и применяемых численных методик решение задачи о взрывном нагружении слоя снега сопоставляется с экспериментальными данными по распространению сферических взрывных волн в снегу естественного сложения и искусственно уплотненном [3]. Анализировались временные зависимости радиальных и тангенциальных напряжений, полученные в точках, расположенных на различных расстояниях от заряда ВВ и на одной глубине с ним. Приводится сравнение размеров камуфлетной полости, полученных численно и в результате эксперимента.

Соответствие опытных и численных результатов свидетельствует об адекватности используемой модели динамического поведения снега и возможности ее применения для решения прикладных задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №14-08-31149 мол\_а; № 13-08-97091 р\_поволжье\_а; №13-08-00219 а; №14-08-00197 а).

## *Литература*

1. Афанасьев С.А., Баженов В.Г., Кочетков А.В., Фельдгун В.Р. Пакет прикладных программ "Динамика-1" // Прикладные проблемы прочности и пластичности.

Автоматизация научных исследований по прочности: всесоюз. межвуз. сб. Горьк. ун-т. 1986. С. 21–29.

2. Miller D.A., Tichota R.G. and Adams E.E., 2011. An explicit numerical model for the study of snow's response to explosive air blast. Cold Regions Science and Technology, 69(2–3): 156–164.

3. Ляхов Г.М., Салицкая В.И., Аверченко А.М., Захаров С.Д., Бахрушина Л.Г. Взрывные волны в снегу // ФГВ. 1989. Т. 25, №4. С. 124–130.

## **РАСЧЕТ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ МЕТАЛЛИЗИРОВАННОГО СТТ С УЧЕТОМ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОВОЙ ФАЗЕ CALCULATION OF ALUMINIZED SOLID ROCKET PROPELLANT BURNING RATE WITH PROVISION FOR GAS-PHASE PROCESS**

**В.А. Порязов, А.Ю. Крайнов**

**V.A. Poryzov, A.Yu. Krainov**

Национальный исследовательский Томский государственный университет

National Research Tomsk State University

poryazov@mail.ru

Основой большинства современных моделей горения смесевых твердых топлив являются модели характерной ячейки поверхности горения СТТ, в частности полуаналитическая модель Германса [1]. Применимость ее для моделирования эрозионного горения продемонстрирована в работе [2]. При горении смесевых твердых топлив с добавлением порошка алюминия скорость горения зависит не только от давления, но и дисперсности и массовой доли порошка алюминия в составе смесевых твердых топлив.

Модель [1, 2] позволяет рассчитать скорость горения как величину, определяемую массовыми потоками компонентов топлива с поверхности горения смесевых топлив. Массовый поток компонентов топлива определяется тепловым балансом на поверхности топлива, складывающимся из теплового потока из газовой фазы и суммарным тепловыделением в к-фазе. Тепловыделение в к-фазе обусловлено экзотермическим процессом разложения окислителя; эндотермическим пиролизом горючего и экзотермической реакцией между парами окислителя и горючего в зазорах вокруг частиц окислителя. Частицы окислителя рассматриваются как шарики одинакового размера, равномерно распределенные в объеме топлива. Частицы алюминия представляют собой шарики одинакового размера, равномерно распределенные в связке.

При моделировании горения металлизированного смесевых твердых топлив [3] в газовой фазе учитывается экзотермическая химическая реакция первого порядка по закону Аррениуса, конвекция и диффузия реагента, давление считается постоянным и независимым от расстояния до поверхности горения, учитывается расширение газа при его нагревании.

Горение частиц металла описывается согласно экспериментальным данным [4], воспламенение частиц металла происходит при достижении температуры частицы равной заданной величине, теплообмен между частицами металла и газом происходит по закону Ньютона, движение частиц металла происходит под действием сил трения со стороны газа. С учетом малой объемной концентрации частиц в газе влиянием движения частиц на движение газа пренебрегается. Не учитываются агломерация частиц на поверхности конденсированной фазы, взаимодействие частиц друг с другом в газовой фазе.

В расчетах массовая доля алюминия варьировалась в диапазоне 7–18% по массе, размер частиц алюминия варьировался в диапазоне 1–100 мкм, давление над поверхностью горения 20–100 атм. В результате проведенных расчетов установлена зависимость линейной скорости горения от давления, размеров и массовой доли частиц алюминия в составе системы.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания № 10.1329.2014/К.

#### *Литература*

1. *Hernance C.E.* A model of composite propellant combustion including surface heterogeneity and heat generation // *AIAA Journal*, 1966, Vol. 4, № 9. P. 1629.

2. *Булгаков В.К., Липанов А.М.* Теория эрозийного горения твердых ракетных топлив. М.: Наука, 2001. 122 с.

3. *Липанов А.М.* Физико-химическая и математическая модели горения смесевых твердых топлив. Ижевск, 2007. 112 с.

4. *Порязов В.А., Крайнов А.Ю.* Математическое моделирование горения смесевых составов, содержащих мелкодисперсный алюминий // *Изв. вузов. Физика*. 2013, т. 56. № 9/3. С. 196–199.

5. *Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В., Логачев В.С., Коротков А.И.* Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука, 1972. 294 с.

## **СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ СТАЦИОНАРНЫХ И НЕСТАЦИОНАРНЫХ СКОРОСТЕЙ ГОРЕНИЯ ПОРОХА Н ПРИ МЕНЯЮЩЕМСЯ ДАВЛЕНИИ COMPARATION VALUE OF CALCULATED STEADY AND NONSTEADY POWDER N COMBUSTION RATE WITH PRESSURE CHANGE**

**В.А. Порязов, А.Ю. Крайнов**

**V.A. Poryzov, A.Yu. Krainov**

Национальный исследовательский Томский государственный университет

National Research Tomsk State University

poryazov@mail.ru

Процесс горения пороха представляет собой сложный физико-химический процесс, начинающийся в глубине пороха и заканчивающийся

на некотором удалении от поверхности горения. Теория стационарного горения порохов была построена Я.Б. Зельдовичем [1]. Впервые проблема устойчивости горения при изменении давления была сформулирована в 1942 г. в ИФХ АН СССР. Разработанная теория [2] основывается на том, что скорость горения зависит не только от мгновенного значения давления окружающей среды, но и от скорости его изменения. В ней описаны особенности нестационарного горения порохов при изменении давления, и дано качественное объяснение явления погасания пороха при сбросе давления. В работе [3] представлены результаты теоретического исследования погасания пороха при резком уменьшении давления на основе феноменологической модели нестационарного горения пороха, получены критерии погасания при резком уменьшении давления. В работе [4] проведено сравнение результатов моделей Зельдовича и Новожилова решения нестационарной задачи при идентичном профиле изменения давления во времени.

В представленной физико-математической модели горения пороха Н предполагается, что в твердом веществе идут химические реакции, продуктами которой является газ, содержащий летучие горючие компоненты. Газообразные продукты разложения появляются на последней стадии реакции по достижении глубины превращения 0.99. Летучие горючие компоненты реагируют в газовой фазе до конечных продуктов. Предполагается, что теплофизические характеристики твердой фазы – плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности являются постоянными величинами. Теплоемкость газовой фазы не зависит от температуры, и по величине равна удельной теплоемкости твердого вещества, число Льюиса газовой фазы равно единице, коэффициент диффузии не зависит от температуры, молекулярная масса газовой фазы принимается постоянной величиной, параметры состояния газа подчиняются уравнению состояния идеального газа. В твердом веществе пороха и в газовой фазе протекают химические реакции первого порядка, скорость которых зависит от температуры по закону Аррениуса. Давление газа над поверхностью горения не зависит от координаты, но зависит от времени. На поверхности горения ставятся граничные условия четвертого рода (условия сопряжения).

Получены расчетные зависимости скорости горения от времени при заданных законах изменения давления. Проведено сравнение полученных зависимостей с результатами расчетов по модели Зельдовича–Новожилова.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания № 10.1329.2014/К.

## *Литература*

1. Зельдович Я.Б. К теории горения порохов и взрывчатых веществ // Журнал экспериментальной и теоретической физики // Избранные труды. Химическая физика и гидродинамика. 1942. Т. 12. С. 498–524.
2. Зельдович Я.Б. Теория горения пороха и приложение ее к реактивным снарядам // Теория горения порохов и взрывчатых веществ. М.: Наука, 1982. С. 186–225.
3. Новожилов Б.В. Нестационарное горение твердых ракетных топлив. М.: Наука, 1973. 176 с.
4. Липанов А.М., Соломонов Ю.С., Алиев А.В. Дорофеев А.А., Черепов В.И. Твердотопливные регулируемые двигательные установки. М.: Машиностроение. 2011. 415 с.

## **ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ВЫСОКОПОРАФИНИСТОЙ НЕФТИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАРАЖАНБАС ELECTROHYDROPULSE PROCESSING TECHNOLOGY HIGH-PARAFFINIC OIL KARAZHANBAS**

**М.Н. Сагимбекова, К.К. Саденова  
Sagimbekova M.N., Sadenova K.K.**

Карагандинский государственный университет им. академика Е.А. Букетова  
Karaganda State University named after academician E.A. Buketov  
mereke\_sn\_93@mail.ru

Республика Казахстан, является первый среди государств СНГ, где приступили к комплексному изучению физико-химических свойств высоковязкой нефти с целью улучшения физико-химических характеристик, таких как плотность, вязкость, а также выход легких фракций, которая обусловлена наличием тяжелых углеводородных фракций. Наиболее перспективным путем улучшения физико-химических свойств высоковязкой тяжелой нефти, увеличения выхода легких и средних углеводородных фракций является волновое воздействие электрогидроимпульсным разрядом на тяжелую углеводородную органическую массу высоковязкой нефти.

Электрогидроимпульсный разряд в жидкости сочетает в себе одновременное воздействие на вещество сильного механического сжатия, мощного ультразвука, жесткого рентгеновского, УФ- и ИК-излучения. Образующиеся в процессе разряда электромагнитные поля также оказывают сильное влияние как на сам разряд, так и на ионные процессы, протекающие в окружающей его жидкости. Под их воздействием происходят разнообразные физические изменения и химические реакции в обрабатываемом материале. Исследования по улучшению физико-химических свойств высоковязкой нефти с использованием электрогидроимпульса имеют особое теоретическое и прикладное



значение для физической химии, а также для процессов нефтепереработки, катализа и теплоэнергетики [1, 2].

Исследования о влиянии электрогидроимпульсного разряда на деструкцию и восстановление тяжелой части углеводородной массы высоковязкой нефти, об определении оптимальных условий выхода дистиллятных фракций и установлении кинетических и термодинамических параметров данного процесса в литературе практически отсутствуют. Целью данной исследовательской работы является исследование влияния электрогидроимпульсного воздействия на высоковязкую нефть месторождения Каражанбас, определение оптимальных условий повышения выхода легкой и средней фракций в присутствии донора водорода [3].

Нами было исследовано влияние различных факторов электрофизических характеристик электрогидроимпульсной установки (продолжительность обработки нефти с помощью ЭГЭ, межэлектродное расстояние ячейки обработки, емкость конденсаторной батареи, разрядное) на повышение выхода фракции до 300 °С и определены оптимальные условия переработки тяжелой нефти с помощью ЭГЭ.

Было установлено, что для уменьшения кинематической вязкости и увеличения выхода, легких и средних фракций до 300 °С наилучшими являются следующие электрофизические характеристики ЭГЭ установки: межэлектродное расстояние 6–8 мм, разрядное напряжение обработки 10 кВ и при этом емкость конденсаторной батареи 0,1 мкФ, количество добавленного донора водорода 0,2–0,3 мл на кг исходного сырья. В результате экспериментальных исследований нами предложен упрощенный одностадийный метод переработки высоковязкой тяжелой нефти месторождения Каражанбас, без использования активных каталитических добавок, с помощью электрогидроимпульсного воздействия, позволяющего улучшить физико-химические (реологические) свойства, обеспечить высокий выход легких и средних фракций до 300 °С.

Таким образом, полученные результаты исследования показали, что уменьшение величины кинематической вязкости высоковязкой нефти месторождения Каражанбас происходит при электродном расстоянии в ячейке обработки электрогидроимпульсными разрядами от 4 до 8 мм, а продолжительность времени обработки электрогидроимпульсным воздействием увеличивает выход легкой и средней фракций ВВН от 23% до 54 %, при времени выдержки в интервале от 4 до 8 минут, а разрядное напряжение коммутирующего устройства при этом составляет 10 кВ, а емкость конденсаторной батареи 0,1 мкФ.

### *Литература*

1. Крупец В.И., Усов А.Ф., Цукерман В.А. Электрогидроимпульсная дезинтеграция материалов: М.: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2002. С. 324.

2. Жукова Е.М., Севостьянов В.П., Холкина Т.В. Стабилизация полимерсодержащих цементов методом электрогидравлического воздействия // Изв. вузов. Сер. Химия и химическая технология. 2008. Т. 51. № 11. С. 110-113.

3. Байкенов М.И., Сатыбалдин А.Ж. Исследование влияние катализатора на углеводородный состав нефти месторождения Каражанбас при электрогидроимпульсной обработке // Вестн. КарГУ. Сер. Химия. 2008, № 4(52). С. 73-79.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ НА ПРОЦЕСС ОЧИСТКИ И АКТИВАЦИИ ВОДЫ RESEARCH INFLUENCE TECHNOLOGY OF ELECTRIC DISCHARGE ON PROCESS CLEANING AND ACTIVATION OF WATER**

**Г.А. Ранова, Н.К. Танашева, К.К. Саденова**

**G.A. Ranova, N.K. Tanasheva, K.K. Sadenova**

Карагандинский государственный университет им. академика Е.А.Букетова

Academician E.A.Buketov Karaganda State University

gguullddeenn@mail.ru

Источники водоснабжения подвергаются загрязнению впоследствии интенсивного развития промышленности и инфраструктуры, их качество во многих регионах нельзя признать удовлетворительным. В настоящее время существуют различные методы очистки воды – реагентный метод, метод ионного обмена, метод электродиализа, метод обратного осмоса, метод электролиза, адсорбционный метод. Однако каждый метод имеет свои преимущества и недостатки. Недостатки при реагентом методе – громоздкость оборудования, при методе ионного обмена – большой расход реагентов для регенерации ионитов и обработки смол, при методе электродиализа – дефицитность и дороговизна мембран, при методе обратного осмоса – сложность эксплуатации, высокие требования к герметичности установок обратного осмоса, при методе электролиза – аноды из дефицитного материала, при адсорбционном методе – дороговизна и дефицитность сорбентов.

Суть активации воды заключается в том, что она насыщается отрицательными зарядами при процессе обработки в виде избыточных электронов, которые распространяются в окружающем пространстве. Активированная вода, как и другие жидкости любого организма и растений, по сути – это слабые электролиты. Кроме того, частицы активированной воды имеют структуру адекватные структуре жидкостей в клетках организма и растений. Поэтому организм и растения воспринимает эту воду как «свою» жидкость и она сразу включается в процессы жизнедеятельности организма и растения.

Известны научные разработки с использованием подводного электрического разряда – названного электрогидравлическим эффектом – в

области металлургии (очистка литья), горнодобывающей отрасли (разрушение и бурение горных пород), энергетики (очистка труб и интенсификация теплообмена), сельского хозяйства (обработка семян), медицины (разрушение камней в почках) и т.д. Также существуют запатентованные устройства и способы для обеззараживания жидких сред с применением подводного электрического разряда [1] разработанные российскими и узбекскими учеными. Тем не менее, сведения об используемых и выпускаемых промышленных образцах практически отсутствуют.

Наибольший удельный вес водопотребления приходится на орошаемое земледелие, затем на лиманное орошение. Наряду с указанными сезонными ирригационными сооружениями на северо-восточных районах страны Республики Казахстан для круглогодичного удовлетворения потребностей населения используются тепличные комплексы. Предлагаемый авторами метод является особо эффективным для получения сельскохозяйственной продукции тепличного производства.

Новизной предлагаемой работы является использование электроимпульсного явления – подводного электрического разряда в технологии очистки, обеззараживания и активации воды.

Авторами работы были проведены испытания на опытных образцах быстрорастущих растений с применением обработанной активированной воды. Испытания проводились на двух тепличных участках с одинаковыми агротехническими условиями. В результате исследований были установлены сравнительные количественные характеристики роста растений, политых обработанной и необработанной водой.

Для практического применения предлагается проточный процесс обеззараживания и активации воды. Обрабатываемая жидкость, с микроорганизмами проходя через рабочий участок, подвергается воздействию направленных отражателем мощных ударных волн и электромагнитных явлений, создаваемых электрическими разрядами. Обеззараженная и активированная вода после рабочего участка поступает для практического использования.

Результаты исследований могут быть полезны при объяснении и понимании физико-биологических явлений на клеточном и молекулярном уровне в условиях мощного ударно-волнового воздействия и воздействия электромагнитных явлений (в том числе процессов прекращения жизнедеятельности микроорганизмов и активации воды).

### *Литература*

1. Юткин Л.А. Перспективы применения электрогидравлической обработки // Новое в электрофизической и электрохимической обработке материалов. М.: Машиностроение, 1966. 253 с.

# ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫЙ СПОСОБ ОБРАБОТКИ БИОЭТАНОЛА ELECTRIC PULSE PROCESSING METHOD BIOETHANOL

**Е.О. Такиров, Н.С. Жакиев, А.К. Хасенов, А.К. Абишева**  
**Y.O. Takirov, N.S. Zhakiyev, A.K. Khassenov, A.K. Abisheva**  
Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова  
Karaganda State University named after Y.A. Buketov  
yelya\_ok91@mail.ru

Этиловый эфир бензойной кислоты  $C_6H_5COOC_2H_5$ , бесцветная жидкость, немного тяжелее воды, хорошо растворим в бензоле, этаноле, диэтиловом эфире. Бензойная кислота (бензокарбоновая кислота) и ее эфиры содержатся в составе продуктов жизнедеятельности растительных организмов. Как видно в исходном биоэтаноле содержится до 2,56% этилового эфира бензойной кислоты. По мере увеличения количества ударов электроимпульсного разряда наблюдается снижение содержания этилового эфира бензойной кислоты до 1,42%, а затем происходит постепенное увеличение ее содержания выше исходных значений [1]. Это объясняется наличием в молекуле этилового эфира бензойной кислоты электронодонорных (OR, COR, Aril) и электроноакцепторных (COOR, COR) заместителей. Наличие электроноакцепторных заместителей в бензольном кольце обеспечивает возможность протекания реакции нуклеофильного замещения. Наличие в соединении электроноакцепторных групп (орто- и пара- положения бензольного кольца с низкой электронной плотностью) облегчает протекание нуклеофильной атаки в этих положениях. Молекула этилового эфира бензойной кислоты распадается на такие соединения, как диметильные, триметильные производные, триметилвые эфиры бензойной кислоты и бензола. В результате этого происходит уменьшение содержания этилового эфира бензойной кислоты по сравнению с исходным биоэтанолом [2].

С увеличением количества ударов электроимпульсного разряда увеличивается электронная плотность атомов углерода бензольного кольца. Увеличение электронной плотности заместителей способствует протеканию обратных реакции с присоединением свободных карбоновых кислот, содержащих карбоксильную группу COOH, связанных с этильным радикалом. Электронодонорные заместители способствуют облегчению присоединения электрофилов. В результате происходит постепенное увеличение содержания этилового эфира бензойной кислоты до 3,11% [3].

При электроимпульсном методе обработки биоэтанола возможно образование высокореакционных радикальных частиц типа  $\cdot H$  и  $\cdot OH$ , которые инициируют следующие реакции: декарбоксилирование без раскрытия цикла, деалкилирование, восстановление бензохиноидных структур, декарбоксилирование с раскрытием цикла. После обработки биоэтанола электроимпульсным методом произошло образование ряда

органических веществ, из-за деструкции в сложной углеводородной среде, повышении интенсивности процессов диссоциации, гидрогенизации и образовании более низкомолекулярных соединений.

С увеличением количества ударов содержание *n*-декановой кислоты уменьшается. Полученные результаты свидетельствуют о том, что электроимпульсный разряд порождает деструкцию в сложной углеводородной среде, повышает интенсивность процессов диссоциации и гидрогенизации (деструкция поликонденсированных структур, разрыв связей высших карбоновых кислот, образование активных радикалов и др.). В результате образуются более низкомолекулярные соединения, это, в свою очередь, дает возможность повысить выход легких соединений. Эти изменения можно объяснить преимущественным протеканием реакции полимеризации, рекомбинации и других, приводящие к конденсированную углеводородной системы.

В составе исходного биоэтанола содержится большое количество карбоновых кислот и их эфиры (этиловый эфир октановой кислоты – 7,55%, декановая кислота – 9,72%, этиловый эфир декановой кислоты – 24,99%). Эти кислоты, содержащие карбоксильную группу COOH, и их эфиры в свободном состоянии находятся в плодах многих растений, входят в состав жиров, эфирных и растительных масел. Важную роль карбоновые кислоты играют в обмене веществ.

После обработки биоэтанола электроимпульсным методом произошло образование ряда органических веществ, из-за деструкции в сложной углеводородной среде, повышении интенсивности процессов диссоциации, гидрогенизации и образовании более низкомолекулярных соединений. Также после воздействия электроимпульсным методов в составе биоэтанола появились дополнительные примеси.

### *Литература*

1. Федоренко В.Ф., Колчинский Ю.Л., Шилова Е.П. Состояние и перспективы производства биотоплива: научно-аналитический. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2007. 132 с.
2. Аблаев А.Р. Биотопливо: мыслить за пределами нефтяной трубы // Российское экспертное обозрение, 2009. <http://www.rusrev.org>.
3. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект. М.; Л.: Машгиз, 1955. 52 с.
4. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, 1986. 256 с.

**РЕАГЕНТ ПЛАСТИФИКАТОР ДЛЯ ВОДОУГОЛЬНОГО  
ТОПЛИВА ПОЛУЧАЕМОГО НА ОСНОВЕ  
ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
REAGENT PLASTICIZER FOR COAL-WATER FUEL DERIVED  
FROM ELECTROHYDROPULSE INFLUENCES**

**Н.К. Танашева, А.Ж. Тлеубергенова, К.К. Саденова  
N.K. Tanasheva, A.Zh. Tleubergenova, K.K. Sadenova**

Карагандинский государственный университет им. академика Е.А. Букетова  
Karaganda State University after by named academic E.A Buketov  
shymkent.a7@mail.ru

В первой половине XXI в. прогнозируется повышение роли угля в энергетике, что обусловлено его крупными запасами и истощением месторождений нефти и газа. В то же время экологические проблемы, возникающие при использовании угольного топлива, требуют разработки и внедрения новых эффективных с экономической и экологической точек зрения угольных технологий, которые обеспечат существенный экологический эффект с максимально высокой полнотой использования добытого топлива. Вокруг многих угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий в гидроотвалах и отстойниках скапливается большое количество добываемого угля, представленного в виде тонкодисперсных угольных шламов, перевод которых в технологически приемлемое топливо позволит не только улучшить экологическую обстановку в регионах, но и получить существенный экономический эффект.

В связи с этим становится актуальным использование шламов в виде водоугольных суспензий (ВУС), разработка эффективных процессов получения и применения которых должна базироваться на научно обоснованных процессах физического и физико-химического воздействия на исходный уголь с учетом свойств его органической и минеральной составляющих [1]. Водоугольные суспензии – это смеси измельченного угля с водой. Для придания суспензии свойств стабильности и необходимой текучести в суспензию вводится небольшое количество реагента-пластификатора. В результате образуется искусственная дисперсная система, представляющая новый вид топлива из угля – водоугольное топливо (ВУТ).

Для измельчения частиц шламов каменных углей Шубаркульского месторождения и получения тонко измельченных фракций заданных размеров используются электрические разряды в жидкости, являющиеся источником ударных волн [2]. Ударные волны, распространяясь в среде жидкость – твердые угольные частицы, разрушают и измельчают обрабатываемые угли до мелких фракций, необходимых для получения водоугольного топлива.

С целью подбора наиболее эффективных пластификаторов для водоугольных суспензий, приготовленных из угольных шламов, было изучено влияние нескольких пластификаторов. Данные реагенты удовлетворяют требованиям, предъявляемым к реагентам-пластификаторам, и легкодоступны [3].

Для проведения экспериментальных работ по получению водоугольного топлива в лаборатории физики импульсных явлений в гетерогенных средах кафедры Инженерной теплофизики им. Ж.С. Акылбаева был собран рабочий участок с электрогидроимпульсной установкой.

Установка работает следующим образом, подготовленные угольные шламы направлялись в рабочую ячейку, где происходил подводный электрический взрыв в присутствии пластификатора. Полученная в результате ЭГИ обработанная водоугольная суспензия направлялась на установку обогащения, принцип действия которой основывался на методе ультразвуковой агломерации. Ультразвуковой диспергатор состоит из проточного преобразователя и блока управления. Диспергатор выполняет функцию дополнительного дробления, где и образуется химическая связь между полученной суспензией. Полученное топливо сливается в бак.

После проведения исследования, видно, что наилучшей стабильностью обладают суспензии с добавкой реагента-пластификатора С. В связи с требованиями к водоугольным суспензиям, предназначенным к прямому сжиганию в котлоагрегатах, было весьма важным определить вязкость полученных водоугольных суспензий, по значениям которой можно было делать выводы об их текучести. Добавление стабилизатора – реагента С в количестве 1% от массы углемазутных гранул обусловлено тем, что при этом расходе водоугольное топливо обладает лучшей стабильностью. Установлено, что стабильность водоугольных суспензий, полученных на основе углемазутных концентратов, определяется физико-химическими свойствами реагентов-пластификаторов.

#### *Литература*

1. Уилсон К.Л. Уголь – «Мост в будущее». М.: Недра, 1985.
2. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, 1986. 253 с.
3. Папин А.В. Физико-химические изменения углей при измельчении в жидких средах // Молодые ученые Кузбассу: материалы конф. Кемерово. 2003. С. 257–258 с.

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**

**1D ICE MATERIAL MODEL GENERALIZATION IN 3D FOR ITS  
IMPLEMENTATION INTO ANSYS**

**E.K. Kharik, V.P. Roubtsova, Mario Fafard, Morse Brian, Côté Alain**  
Université Laval,

Hydro-Quebec Research Institute (IREQ) Université Laval  
ekaterina.kharik.1@ulaval.ca, roubtsova.varvara@ireq.ca  
Mario.Fafard@gci.ulaval.ca, Brian.Morse@gci.ulaval.ca  
cote.alain@ireq.ca

Dams experience numerous ice loads during the winter period. Determining the thrust of ice on a dam is an important factor in the design of a safe structure as it is essential to ensure stability for all those living along the rivers downstream cold regions (Canada, Russia, United States, Northern Europe, China, Japan, etc.). The nature of ice loads is not yet fully understood. One of the approaches to provide a better understanding of such mechanisms is numerical simulation of the field processes. ANSYS (commercial finite element program) is useful for this aim. A material model can be implemented into ANSYS via user material subroutine Usermat. Usermat is an ANSYS user-programmable feature that allows users to write their own material constitutive equations for modelling behaviour of material, which is not included into ANSYS.

A typical ice cover on a reservoir upstream of a hydroelectric dam usually consists of two layers: a snow ice layer (T1 - isotropic) overtopping of a columnar ice layer (S1 and/or S2, anisotropic). S2 ice crystals have an elongated form. The direction of columns is perpendicular to a reservoir surface. Ice cover is laterally confined by reservoir shores and a dam wall. Columnar ice S2 is more rigid under such conditions than T1 snow ice.

The Sinha's creep model [2] for slowly developing ice loads has been chosen to simulate the behaviour of S2 columnar ice loaded perpendicular to the ice columns (one of 2 types of ice occurring on the dam reservoir). This model is based on the 1D compression tests. The model predicts total strain ( $\epsilon$ ) in terms



of elastic ( $\varepsilon_e$ ), delayed-elastic ( $\varepsilon_d$ ), and viscous or permanent strain ( $\varepsilon_v$ ), and is summarized by the following equations:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_d + \varepsilon_v = \frac{\sigma}{E} + c_1 \left( \frac{d_1}{d} \right) \left( \frac{\sigma}{E} \right)^s \left\{ 1 - \exp \left[ - (a_T t)^b \right] \right\} + \dot{\varepsilon}_v \left( \frac{\sigma}{\sigma^1} \right)^n \quad (1)$$

where  $t$  is the time duration of the stress  $\sigma$ ,  $E$  is the Young's modulus,  $a_T$ ,  $b$ ,  $c_1$ ,  $n$ ,  $s$  are constants,  $d_1$  is the unit grain size,  $\dot{\varepsilon}_v$  is the viscous strain rate for unit stress  $\sigma^1$ ,  $d$  is the grain size,  $Q$  is the activation energy,  $R$  is the gas constant,  $T_1$  and  $T_2$  are temperatures. Values of the model material constants can be found in [2].

The concept of equivalent stress and equivalent strain was used to generalize the Sinha's 1D model in 3D case [3]. The elastic strain was calculated according to the Hooke's law for transversely isotropic material with the  $xz$  plane of isotropy.

The columnar ice material model was implemented into ANSYS via user material subroutine Usermat, that was tested at different cases, namely, uniaxial constant stress test on 3D confined and unconfined solid, 2D plane strain solid; uniaxial constant stress rate test on 3D unconfined solid; uniaxial constant strain rate test on 3D confined and unconfined solid, 2D plane strain solid. The numerical results were compared with experimental ones to ensure the correct implementation of the material model. It was shown a good agreement between numerical results and various experimental data that encourages further studies of the model application to calculation the ice load on a dam wall.

### References

1. *Taras A. et al.* Ice thrust measurements at Arnprior and Barrett Chute Dams // Committee on River Ice Processes and the Environment. Winnipeg, 2011. P. 317–328.
2. *Sinha N.K.* Grain boundary sliding in polycrystalline materials // Philosophical magazine. A. 1979. Vol. 40. No. 6. P. 825–842.
3. *Altenbach H., Naumenko K.* Modeling of creep for Structural Analysis, Foundations of Engineering Mechanics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007

## РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЛЕДОВЫХ ПЕРЕПРАВ DEVELOP WAYS TO IMPROVE THE BEARING CAPACITY OF ICE CROSSINGS

**Н.О. Баурин, К.И. Ипатов, Р.В. Соколов, А.А. Ламаш**  
**N.O. Baurin, K.I. Ipatov, R.V. Sokolov, A.A. Lamash**

Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема, г. Биробиджан.  
Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan  
vellkom@list.ru

Большая часть Дальнего Востока и Сибири являются малоосвоенными или труднодоступными территориями, где транспортное сообщение

возможно в летний период по воде, а в зимний период – по зимникам и ледовых переправам. Длительный период ледостава – основной фактор, определяющий сроки открытия объектов подобного рода. Его продолжительность определяется временем естественного нарастания толщины льда до необходимой для обеспечения требуемой несущей способности ледяных переправ. Для увеличения сроков эксплуатации ледяных переправ могут быть использованы методы армирования ледяного покрова, для чего могут использоваться различные армирующие элементы.

Целью работы является разработка способов создания ледовых переправ путем армирования ледяного покрова, а также предварительная экспериментальная оценка предельной несущей способности ледовых переправ с учетом наличия армирующих элементов.

Ранее проведенные предварительные эксперименты с использованием в качестве армирующих элементов металлического каркаса в виде стальной проволоки и стальных пластин показали, что несущая способность ледовых балок возросла более чем в два раза, в зависимости от количества армирующих элементов.

В экспериментах использовались ледяные балки, приготовленные из пресноводного льда толщиной  $h=20$  см с внедрением в них стальной проволоки толщиной 3 мм. Прикладываемой усилие на балку не превышало 100 кН [1].

Проведенные эксперименты позволили предложить несколько способов повышения несущей способности ледовых переправ (патенты на изобретения РФ №2482239, 2459900).

Первый способ [2] заключается во вмораживании по обеим сторонам переправы по всей ее длине предварительно растянутых стальных пружин. После их вмораживания растягивающие усилия снимают. За счет этого увеличивается грузоподъемность.

Второй способ [3] достигается посредством вмораживания по обеим сторонам переправы по всей ее длине стальных тросов. При этом на тросы предварительно устанавливаются элементы, жестко соединенные с тросами, перед их вмораживанием тросы растягивают, а после их вмораживания растягивающие усилия снимают. Грузоподъемность увеличивается за счет создания сжимающих усилий.

Как показывает эксперимент, использование предложенных способов могло бы увеличить несущую способность ледовых переправ и существенно продлить их срок эксплуатации за счет более раннего ввода их в строй, благодаря внедрению армирующих элементов в более тонкий слой льда, чем при традиционных методах создания переправ.

Работа выполнена в рамках проекта №487 задания на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания вузу №2014/422.

## *Литература*

1. Козин В.М., Попенко Н.В., Попенко О.Н. Повышение несущей способности ледяных переправ // Математическое моделирование физических и информационных процессов: Материалы всероссийской научно-практической конференции, г. Биробиджан, 2012. С. 64–67.
2. Способ создания ледовой переправы / Патент РФ №2482239 Козин В.М., 2013.
3. Способ создания ледовой переправы / Патент РФ №2459900 Козин В.М., 2012.

## **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ И СКОРОСТИ ТИТАНОВОГО ОБРАЗЦА НА ПРОЦЕСС ДКУП NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF TITANIUM SPECIMEN'S PRESSURE AND VELOCITY ON THE DCAP PROCESS**

**А.С. Бодров**

**A.S. Bodrov**

Национальный исследовательский Томский государственный университет

National Research Tomsk State University

alex.bodrov@mail.ru

Получение объемных наноструктурных и ультрамелкозернистых материалов является одним из активно развиваемых направлений в современном материаловедении. Динамическое канально-угловое прессование (ДКУП) – один из методов получения таких материалов посредством интенсивной пластической деформации. Данный метод является вариантом метода равноканального углового прессования, позволяющим повысить скорость пластического деформирования образца.

Численное моделирование процесса ДКУП проводится в трехмерной постановке в рамках упругопластической модели среды. Используется модель повреждаемой среды, характеризующаяся возможностью зарождения и эволюции в ней микроповреждений. Система уравнений, описывающая нестационарное адиабатическое движение сжимаемой среды состоит из уравнений неразрывности, движения, энергии. Моделирование разрушений проводится с помощью кинетической модели активного типа. Для описания пластического течения используется условие Мизеса. Учтены зависимости модуля сдвига и динамического предела текучести от температуры и уровня поврежденности материала. Для решения задачи используется модифицированный метод конечных элементов без глобальной матрицы жесткости, предназначенный для решения задач высокоскоростного нагружения [1–3].

Процесс ДКУП моделируется на примере титановых образцов сечением 16x16 мм, длиной 65 мм. Угол пересечения каналов составляет 90° с наклонной площадкой под углом 45° в области внешнего угла. На тыльной поверхности образца задается постоянная нагрузка  $P_0$ , моделирующая

давление пороховых газов (динамическая схема нагружения). На границах каналов ставится условие жесткой стенки [4, 5]. Наклонная площадка представляет собой большую грань прямой призмы, основаниями которой являются равнобедренные прямоугольные треугольники, прямой угол и катеты которых совпадают внешним углом и соответствующими ребрами пересекающихся каналов. В расчетах размер и положение наклонной площадки соответствует величине катетов  $z_0 = 4$  мм. Варьируется величина нагрузки  $P_0$  и начальное положение лицевой поверхности образца  $H_0$  в вертикальном канале.

Результаты расчетов показывают, что при движении в вертикальном канале под действием давления в зависимости от пройденного расстояния и величины  $P_0$  образец разгоняется до различных скоростей, что существенно влияет на процесс ДКУП. Построено изображение области допустимых значений параметров  $P_0$  и  $H_0$  для успешного деформирования титанового образца заданных размеров.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14–08–31208 и Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 2014/223 (код проекта 1943).

### *Литература*

1. Шипачев А.Н., Зелепугин А.С., Ильина Е.В., Зелепугин С.А. Моделирование динамического канально-углового прессования титановых образцов по двухпоршневой схеме нагружения // Деформация и разрушение материалов. 2012. №10. С. 7–11.
2. Шипачев А.Н., Суглобова И.К., Ильина Е.В., Зелепугин С.А. Выбор параметров нагружения титановых образцов при динамическом канально-угловом прессовании // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2011. №2(14). С. 111–116.
3. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортон В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996. 407 с.
4. Зелепугин С.А., Зелепугин А.С., Бодров А.С., Олимпиева Н.В. Трехмерное моделирование процессов пластического деформирования металлических образцов при динамическом канально-угловом прессовании // Изв. вузов. Физика. 2013. № 7/3. С. 50–52.
5. Зелепугин С.А., Зелепугин А.С., Бодров А.С., Позднышева Н.В. Трехмерное моделирование пластического деформирования титановых образцов при динамическом канально-угловом прессовании // Забабахинские научные чтения: сб. материалов XII Международной конференции 2–6 июня 2014. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2014.

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА  
ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ПОЛЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ  
ПРОВОДНИКОВ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ  
И МАГНИТОДИФФУЗИОННОЙ ПОСТАНОВКАХ ЗАДАЧИ  
COMPARATIVE ANALYSIS OF THE SIMULATION DATA BY  
INDUCTIVE HEATING OF LIGHT-WALL CYLINDRICAL  
CONDUCTORS IN THE ELECTRO-TECHNICAL  
AND MAGNETO-DIFFUSIVE STATEMENTS OF THE PROBLEM**

<sup>1</sup>С.И. Володченков, <sup>2</sup>Н.В. Селюнина, <sup>3</sup>С.В. Синяев

<sup>1</sup>S.I. Volodchenkov, <sup>2</sup>N.V. Selyunina, <sup>3</sup>S.V. Sinyaev

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ)

Национальный Исследовательский Томский государственный университет

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики

Томского государственного университета

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics (RFNC-ARSRIEP)

National Research Tomsk State University

Scientific Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics

of Tomsk State University

ssv@niipmm.tsu.ru

Представлены результаты математического моделирования индукционного нагрева тонкостенного полого цилиндрического проводника переменным аксиальным магнитным полем. В магнитодиффузионной постановке построено точное аналитическое решение одномерной задачи для экспоненциально затухающего синусоидального внешнего магнитного поля. С помощью предложенного алгоритма идентификации полученное решение сравнивается с численным решением задачи нагрева проводника в магнитном поле соленоида при колебательном разряде конденсаторной батареи. Эта задача решается в классической электротехнической нульмерной постановке. Оценивается влияние процесса диффузии магнитного поля в проводник на основные параметры процесса его индукционного нагрева. Показана применимость электротехнического подхода к задаче нагрева тонких полых цилиндрических проводников применительно к устройствам многоочагового бесконтактного зажигания топлив различной консистенции.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ  
В ВОЗДУШНО-ЦЕНТРОБЕЖНОМ КЛАССИФИКАТОРЕ  
NUMERICAL SIMULATION OF AERODYNAMIC  
SINCENTRIFUGAL AIR CLASSIFIER**

**О.В. Браун, А.В. Шваб  
O.V. Braun, A.V. Shvab**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University  
taredel@mail.ru, avshvab@inbox.ru

Проводится моделирование аэродинамики воздушно-центробежного классификатора, зона сепарации которого представляет собой вращающуюся камеру с входным коридором, отделенным стенками от сепарационной зоны и двумя выходами для воздуха, прошедшего классификацию. Численное решение проводится в цилиндрической системе координат методом расщепления полей скорости и давления на разнесенной сетке с использованием экспоненциальной и обобщенной неявной схем. Также были исследованы влияния режимных параметров на аэродинамику в сепарационной зоне центробежного аппарата. Достоверность результатов обосновывается сравнением с аналитическим решением.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
ДЛЯ РАСЧЕТА ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛА  
С ГИПЕРЗВУКОВОЙ СКОРОСТЬЮ В АТМОСФЕРЕ.  
APPLICATION OF HYBRID PARALLEL TECHNOLOGIES TO  
CALCULATE THE MOTION OF THE COSMIC BODY AT  
HYPERSONIC SPEEDS IN THE ATMOSPHERE**

**В.Л. Гойко  
V.L. Goiko**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University  
goiko@ftf.tsu.ru

Ежедневно в атмосферу Земли влетают с метеорными скоростями (более 11,2 км/с) несколько миллионов космических тел – твердых объектов размером примерно от нескольких долей сантиметра и более. Метеороиды влетают со скоростями от 11,2 до 72 км в секунду в любом направлении, в любое время суток и года, в любом месте земного шара. Возникает вопрос о моделировании движения метеороидов.

В данной работе представлено численное решение задачи движения космического тела в атмосфере с гиперзвуковой скоростью.

Основой для построения расчетного алгоритма выступила разностная схема численного решения нестационарных уравнений газовой динамики с нахождением потоков по методу С.К. Годунова [1]. Расчетная схема преобразована для использования параллельного алгоритма. Параллельность достигнута за счет использования технологии MPI (Message Passing Interface) [2]. Суть параллельного алгоритма заключается в разбиении расчетной области на число подобластей, равное числу процессоров. Каждый процессор обрабатывает свою подобласть и обменивается информацией с соседними процессорами. Последовательная программа была существенно изменена в ходе написания параллельного алгоритма, в общей сложности было добавлено свыше 100 строк кода, причем необходимо было правильно организовать пересылки между процессорами.

Космическое тело при входе в атмосферу на метеорной скорости (20 км/с) взрывается в полете и мгновенно переходит в облако газов, данное облако и рассматривается в дальнейшем при расчете. Рассматривалось разрушение данного облака при разных углах атаки. Для задачи о движении космического тела использовалась равномерная прямоугольная расчетная сетка. Начальные условия задавались с учетом параметров международной стандартной атмосферы на высоте 20 км.

Использование параллельного алгоритма существенно снизило время, необходимое для проведения расчета. В качестве высокопроизводительного вычислительного комплекса для проверки эффективности параллельного алгоритма выступил кластер на базе Национального исследовательского Томского государственного университета СКИФ-Cyberia. Для расчета использовались узлы с двумя шестиядерными процессорами Intel Xeon X5670 и 24 Гб оперативной памяти. Написан модуль для преобразования результатов вычислений в формат Silo [4], позволяющий использовать для визуализации полученных данных программный комплекс VisIt. [4]

Несмотря на все временные затраты, связанные с модернизацией последовательной программы для возможности использовать большее количество вычислительных процессоров, выигрыш во времени расчета существенен. При условии оптимизации программы и правильном подборе компилятора (в данной работе использовался компилятор от Intel, позволивший существенно ускорить проведение расчетов) можно эффективно использовать высокопроизводительные вычислительные комплексы.

### *Литература*

1. Годунов С.К. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.

2. Немнюгин С.А., Стесик О.Л. Параллельное программирование для многопроцессорных вычислительных систем. СПб.: БХВ-Петербург, 2002. 400 с.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: учеб. пособ.: в 10 т. Т. 6: Гидродинамика. 5-е изд., стереот. М.: Физматлит, 2001. 736 с.
4. *Silo*. A mesh and field I/O library and scientific database [Электронный ресурс]. URL: <https://wci.llnl.gov/codes/silo/index.html>
5. *VisIt*. Software that delivers parallel [Электронный ресурс]. URL: <https://wci.llnl.gov/codes/visit>

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ В ВИХРЕВОЙ КАМЕРЕ. SIMULATION OF TURBULENT SWIRLING FLOW IN THE VORTEX CHAMBER.**

**М.Ю. Гойко  
M.Yu. Goiko**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University  
[goiko@ftf.tsu.ru](mailto:goiko@ftf.tsu.ru)

В настоящей работе для численного исследования аэродинамики классификатора в качестве прототипа выбрана вихревая камера, которая представляет собой цилиндрическую область с не вращающимися стенками. В камере такого типа, закрученный поток газа вместе с частицами через входное сечение поступает в вихревую камеру и под действием перепада давления вместе с мелкой фракцией частиц выходит через выходное сечение. Крупная же фракция частиц, за счет действия на нее центробежной силы, которая преобладает над аэродинамической силой сопротивления частиц, отбрасывается на периферийную стенку классификатора и, оседая по ней, попадает в крупный продукт фракционного разделения. Известно, что вихревые камеры такого типа обладают достаточно большой производительностью по расходу несущей среды и твердой фазы. Однако эффективность фракционного разделения частиц по размерам существенно ниже, чем в воздушно-центробежных классификаторах. С нашей точки зрения, одной из причин относительно низкой эффективности процесса фракционного разделения мелко-дисперсных порошков является существенная неоднородность поля окружной скорости. Для ее выравнивания будем использовать дополнительное вращение стенок вихревой камеры.

Движение закрученного потока несущей среды описывается уравнениями Навье – Стокса в осесимметричной постановке в цилиндрической системе координат и в безразмерном виде. Решение данной задачи проводилось в переменных «вихрь – функция тока» и «скорость – давление». Решение системы уравнений в переменных вихрь-



функция тока и в переменных скорость-давление можно привести к решению системы нестационарных скалярных уравнений переноса, которые решаются эволюционным методом до установления по времени. Для каждого скалярного уравнения переноса в системе уравнений вихрь-функция тока и скорость-давление используется обобщенный неявный метод переменных направлений в дельта-форме, который имеет второй порядок точности по времени.

Также был проведен анализ движения твердой фазы, используя дискретно-траекторный метод частиц, который основывается на расчете траекторий отдельных частиц в лагранжевой системе координат. Уравнения, описывающие движение твердой частицы, представляют собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, справедливых для любой фиксированной частицы. Частицы в начальный момент времени находятся в  $j$ -х точках старта во входном сечении вихревой камеры. Задавая местоположение и вектор скорости частицы во входном сечении вихревой камеры в момент времени  $t=0$  и выполняя интегрирование уравнений, можно рассчитать ее траекторию движения и определить в мелкий или крупный продукт разделения она попадает.

Достоверность получаемых решений определялась тестовыми исследованиями на сеточную сходимость, а также сравнением численных решений полученных с использованием двух подходов: вихрь-функция тока и скорость-давление. Численные исследования поля окружной скорости показали, что вблизи стенок вихревой камеры образуются существенные градиенты окружной скорости при отсутствии вращения стенок, что может стать причиной попадания крупных частиц в мелкий продукт процесса фракционного разделения. В случае же вращения стенок камеры поле окружной скорости существенно выравнивается не только вблизи стенок аппарата, но также во всей области, где собственно и происходит сепарация крупных частиц.

### *Литература*

1. Ушаков С.Г., Зверев Н.И. Инерционная сепарация пыли. М.: Энергия. 1974. 166.
2. Патент РФ № 2407601, ПК В07В7/083. Способ воздушно-центробежной классификации порошков и устройство для его осуществления / Зятиков П.Н., Росляк А.Т., Васенин И.М., Шваб А.В., Демиденко А.А., Садретдинов Ш.Р. // опубл. Б.И. №36, 27.12.2010.
3. Шваб А.В., Хайруллина В.Ю. Исследование закрученного турбулентного течения между вращающимися профилированными дисками // Теоретические основы химической технологии. 2011. Т. 45, №5. С. 557–565.
4. Роуч П. Вычислительная гидромеханика. М.: Мир, 1977. 618 с.
5. Патанкар С., Петухов Б.С. Численные методы решения задач теплообмена. М.: Энергоатомиздат, 1984. 124 с.
6. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. М.: Мир, 1990. Т. 2: Россия. 337 с.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСТЕКАНИЯ КАПЛИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ  
ПО ТВЕРДОЙ СТЕНКЕ В ПЛОСКОЙ ПОСТАНОВКЕ  
МЕТОДОМ VOF  
SIMULATION OF TWO-DIMENSIONAL VISCOUS DROP  
SPREADING ON A SOLID WALL USING VOF METHOD**

**А.В. Десятник, М.А. Пономарева, В.А. Якутенок  
A.V. Desyatnik, M.A. Ponomareva, V.A. Yakutenok**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University  
desyatnik@litecfd.net

Исследование динамики вязких капель является фундаментальной проблемой гидродинамики и представляет интерес для многих технологических и природных процессов. Важной характеристикой такого течения является форма свободной поверхности капли и динамика изменения ее геометрических размеров. Исследованию процесса взаимодействия капель жидкости с твердой стенкой посвящено значительное число работ, например [1, 2].

Рассматривается процесс растекания капли вязкой жидкости по горизонтальной твердой стенке при различных значениях числа Рейнольдса без учета поверхностных эффектов. При формулировке задачи используется плоское приближение, тем самым, фактически рассматривается растекание цилиндрического объема жидкости, который условно называется каплей. В начальный момент времени граница области, занимаемой жидкостью, имеет форму окружности радиуса  $R$ . Течение вязкой несжимаемой жидкости описывается уравнениями Навье–Стокса совместно с уравнением неразрывности, которые в безразмерных переменных записываются в виде

$$\text{Re} \left( \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \right) = -\nabla p + \nabla^2 \mathbf{V} + \mathbf{W},$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0,$$

где  $\text{Re} = \rho UR / \mu$  – число Рейнольдса;  $\rho$  – плотность жидкости;  $R$  – радиус капли;  $U = \rho g R^2 / \mu$  – масштаб скорости течения;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости;  $\mathbf{W} = \{0, -1\}$ ;  $g$  – сила тяжести;  $\mathbf{V} = \{u, v\}$  – вектор скорости;  $u, v$  – компоненты вектора скорости в направлении осей  $x, y$  декартовой системы координат соответственно;  $p$  – безразмерное давление, отнесенное к масштабу давления  $\rho g R$ ;  $t$  – безразмерное время, отнесенное к масштабу времени  $\mu / \rho g R$ . На твердой стенке выполняется условие

прилипания  $\mathbf{V} = 0$ . Граничные условия на свободной поверхности заключаются в отсутствии касательного напряжения и равенстве скачка нормального напряжения внешнему давлению.

Основной сложностью моделирования течений вязкой несжимаемой жидкости со свободной поверхностью является наличие меняющейся во времени области решения. Для расчета динамики свободной поверхности используется технология, предлагаемая в методе VOF (Volume of Fluid) [3, 4]. Ее основная идея заключается во введении специальной функции  $F(x, y)$ , которая определяет относительный объём, занятый жидкой фазой в ячейке сетки. Эта функция описывается уравнением

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} = 0.$$

Функция  $F$  принимает значение единицы в ячейке сетки полностью заполненной жидкостью, и нулевое значение в пустой ячейке. Ячейки, в которых  $0 < F < 1$ , содержат свободную поверхность.

Расчеты показали, что без всяких затруднений возможно моделирование процесса растекания для  $1 < Re < 800$ . Представлены формы свободной поверхности, а также графики, демонстрирующие характер изменения высоты капли и радиуса пятна контакта с твердой стенкой от времени, для различных значений числа  $Re$  ( $Re = 5, 10, 80, 250, 800$ ).

Достоверность полученных результатов подтверждается совпадением расчетных форм свободной поверхности для  $Re = 1$  с формами, полученными методом граничных элементов в [5] в приближении ползущего течения.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект № 12-08-00313а) и Гранта Президента РФ (МК-3687.2014.1).

### *Литература*

1. Bonn D., Eggers J., Indekeu J., Meunier J., Rolley E. Wetting and spreading // Reviews of modern physics. 2009. Vol. 81, 739.
2. Eddi A., Winkels K.G. Short time dynamics of viscous drop spreading // Physics of fluids. 2013. Vol. 25, 013102.
3. Hirt C.W., Nichols B.D. SOLA: A Numerical Solution Algorithm for Transient Fluid Flows // Los Alamos National Laboratory Report LA-5852. 1975.
4. Hirt C.W., Nichols B.D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // Journal of Computational Physics. 1981. Vol. 39. P. 201–225.
5. Пономарева М.А., Якутенок В.А. Моделирование растекания капли вязкой жидкости в плоской постановке при больших числах Бонда / Вестн. Том. гос. ун-та. Сер. Математика и механика. 2007. №1. С. 79–83.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗАКРУТКИ  
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФРАКЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ  
THE RESEARCH OF INFLUENCE OF PARAMETERS OF SPIN  
THE FRACTIONAL EFFICIENCY OF SEPARATION OF PARTICLES**

**Н.С. Евсеев, А.В. Шваб  
N.S. Evseev, A.V. Schvab**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University  
evseevns@gmail.com

В работе проводится моделирование аэродинамики двухфазного закрученного турбулентного потока в сепарационной камере воздушно-центробежного классификатора. Поле скоростей закрученного турбулентного потока газовой фазы определялось на основе уравнений Рейнольдса, замыкание которых осуществлялось при помощи двухпараметрической модели турбулентности Уилкокса. Движение тонкодисперсной твердой фазы моделируется совокупностью расчетов траекторий движения отдельных частиц в лагранжевой системе координат с учетом действия инерционных, центробежных, гравитационных и аэродинамических сил. Решение системы уравнений переноса импульса и уравнения неразрывности для несущей среды проводилось в переменных «скорость–давление» методом физического расщепления по времени полей давления и скорости. Конвективные и диффузионные слагаемые уравнения переноса радиальной, аксиальной, окружной составляющих вектора скорости, а также кинетической энергии и удельной скорости диссипации записываются с помощью экспоненциальной схемы. В данной работе анализируется влияние параметров закрутки на сепарацию тонкодисперсных частиц и эффективность фракционного разделения частиц в пневматическом центробежном аппарате. Экспериментальные данные показывают, что в таких расчетах существенно завышена реальная эффективность процесса разделения, так как в них не учитываются случайные факторы, которые могут изменить траекторию движения частицы. Одним из важнейших факторов, влияющих на диффузию твердой примеси в турбулентном потоке, является участие частиц в пульсационном движении несущей среды. Это явление турбулентной диффузии частиц понижает эффективность процесса классификации частиц по размерам. В работе учитывается турбулентная диффузия в соответствии с работой [1], согласно которой пульсационные значения скоростей определяются вероятностным законом Гаусса, причем дисперсией в этом законе является кинетическая энергия пульсационного движения.

Достоверность и работоспособность численного решения установившегося турбулентного закрученного потока несущей среды проверялась тестовыми исследованиями на сеточную и итерационную сходимость, а также сравнением численных расчетов с экспериментальными данными.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-08-00367А.

## Литература

1. Мостафа А.А, Монджиа Х.Ц., Макдонелл В.Г., Самуэлсен Г.С. Распространение запыленных струйных течений: Теоретическое и экспериментальное исследование // Аэрокосм. техника. № 3. С. 65–82.

## ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ДВУМЕРНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ С ПОМОЩЬЮ СХЕМЫ РАСЩЕПЛЕНИЯ PARALLEL ALGORITHMS FOR SOLVING THE TWO- DIMENSIONAL HEAT EQUATION USING THE SPLITTING SCHEME

С.А. Ильин

S.A. Il'in

Национальный исследовательский Томский государственный университет

National Research Tomsk State University

sergei\_i27@mail.ru

Рассматриваются параллельные алгоритмы для решения двумерного уравнения теплопроводности с помощью схемы расщепления.

Постановка задачи:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), 0 < x < A, 0 < y < B \\ u(x, y, 0) = 300^\circ \text{K} \\ \lambda \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = \sigma \left( u^4 \Big|_{x=0} - T^4 \right); \lambda \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=A} = 0; \lambda \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha_1 \left( u \Big|_{y=0} - T \right); \lambda \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=B} = \alpha_2 \left( T - u \Big|_{y=B} \right) \end{cases}$$

$$A = 0.1 \text{ м}, B = 0.3 \text{ м}, \lambda = 384 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}, \alpha_1 = 100 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}, \alpha_2 = 0.1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}, T = 3000^\circ \text{К}$$

Цель работы – построение новых параллельных алгоритмов для решения эволюционных уравнений в частных производных с помощью схемы покоординатного расщепления. Рассматриваются два подхода: алгоритмы для многопроцессорных систем с распределенной памятью, распараллеливание с помощью технологии OpenMP [3].

В параллельных вычислениях много внимания уделялось параллельному решению линейных систем, в частности трехдиагональных систем [1]. В настоящее время наметился переход от мелкозернистых к крупнозернистым алгоритмам для ленточных систем линейных уравнений с узкой лентой. Крупнозернистый алгоритм – это наличие больших подзадач, которые можно

решать параллельно, а мелкозернистый алгоритм – это небольшие подзадачи для параллельного решения.

При рассмотрении параллельных алгоритмов выбираем одномерную декомпозицию так, чтобы сеточная область была разделена на части вдоль сеточных линий  $j=\text{const}$ . Поэтому на первом дробном шаге, где  $j=\text{const}$ , пересылок данных между процессорными элементами при реализации метода прогонки не требуется, а на втором дробном шаге, где  $i=\text{const}$ , происходит применение алгоритмов, рассмотренных ниже.

Алгоритм параметрической прогонки Н.Н. Яненко будет осуществляться на основе принципа декомпозиции, т.е. последний узел предыдущей области совпадает с нулевым в последующей. Затем, вычисляем значения решения на границе подобластей и восстанавливаем значения решения в промежуточных узлах для каждого процессора одновременно.

В работе рассматриваются 2 парадигмы параллельного программирования: параллельное программирование с помощью технологий OpenMP и параллельное программирование с помощью технологий MPI. Для методов, реализуемых с помощью технологии MPI, проведен теоретический анализ и выполнена практическая реализация. На основе технологии MPI был реализован метод параметрической прогонки Яненко, который показал, что практическое ускорение равно 8, если запускаем на 10 ядрах, а эффективность равна примерно 80%.

Работа выполнена по Государственному Заданию Министерства образования и науки РФ, №5.628.2014/К.

#### *Литература*

1. Старченко А.В., Берцун В.Н. Методы параллельных вычислений. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2013. 223 с.
2. Яненко Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физике. Новосибирск: Наука, 1967. 197 с.
3. Высокопроизводительные вычисления на кластерах. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2008. 200 с.

### **ПРИМЕНЕНИЕ ВЕСОВОГО ИНТЕРПОЛЯЦИОННОГО СПЛАЙНА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОНОТОННЫХ РАЗНОСТНЫХ СХЕМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ КОНВЕКЦИИ-ДИФФУЗИИ THE USE OF WEIGHTING INTERPOLATION SPLINE TO CONSTRUCT MONOTONE DIFFERENCE SCHEMES FOR SOLVING THE EQUATIONS OF CONVECTION-DIFFUSION**

**А.А. Карпова, А.В. Старченко  
А.А. Karpova, A.V. Starchenko**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University  
siriys.tomsk@mail.ru

Одной из основных проблем механики сплошной среды (МСС) являются краевые задачи для нестационарного уравнения конвекции-диффузии.

Данные задачи могут быть решены различными численными методами. Отметим, что особое внимание уделяется монотонным разностным схемам.

В работе рассматривалась простейшая модель конвективно-диффузионного распространения вещества в сплошной среде. Физическая постановка задачи заключается в нахождении значения концентрации примеси в точках области  $[0, H]$  в определённый момент времени. Для упрощения модели предполагается, что вектор скорости водного потока и диффузия постоянны в рассматриваемой области. Тогда в случае, когда конвективная и диффузионная составляющие осей  $OY$  и  $OZ$  пренебрежимо малы, такой перенос можно описать одномерным дифференциальным уравнением параболического типа:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + u \frac{\partial \Phi}{\partial x} = D \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + R(x, t),$$

где  $u(t, x)$  – вектор скорости воздушного потока  $\left( \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \right)$ ;  $D > 0$  – коэффициент диффузии;  $R(x, t)$  – источник вещества концентрации  $\Phi$ .

Слагаемое  $\frac{\partial}{\partial x}(u \cdot \Phi)$  отвечает за конвективный перенос, а слагаемое

$\frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)$  соответствует переносу вещества диффузией. Задача рассматривается в области  $\Omega = \{0 < x < H\}$  с границей  $\partial\Omega = \{x = 0, x = H\}$ , где  $t \in [0, T]$ .

В данной работе поставленная задача решалась с помощью метода конечного объёма (МКО) на равномерной сетке [1]. Были рассмотрены несколько аппроксимаций конвективного члена уравнения: противопотоковая схема первого порядка точности, MLU-схема Ван Лира, монотонная интерполяция весовым кубическим сплайном [2], а также разностная схема, построенная с помощью базисного аппроксимационного сплайна [3].

Собирая воедино разностные аналоги начального и граничных условий, а также самого уравнения получаем следующую разностную схему:

$$\begin{cases} \Phi_i^0 = \Phi_{00}(x_i), \\ \frac{\Phi_i^{n+1} - \Phi_i^n}{\tau} + u \frac{\Phi_{i+1/2}^n - \Phi_{i-1/2}^n}{h} = D \frac{\Phi_{i+1}^n - 2\Phi_i^n + \Phi_{i-1}^n}{h^2} + R_i^n, \\ \Phi_0^{n+1} = \Phi_0(t^{n+1}), \\ \Phi_N^{n+1} = \Phi_{N-1}^{n+1}. \end{cases}$$

В ходе численных экспериментов для одномерного уравнения с точечным источником было установлено, что монотонная разностная схема, построенная на основе весового интерполяционного сплайна, и MLU-метод дают результаты, довольно близкие к точному решению. Две других рассматриваемых схемы показали результат на порядок хуже.

Работа выполнена по Государственному заданию Министерства образования и науки РФ №5.628.2014/К.

### *Литература*

1. Ильин В.П. Методы конечных разностей и конечных объемов для эллиптических уравнений. Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, 2000. 345 с.
2. Квасов Б.И. Методы изогеометрической аппроксимации. М.: Физматлит, 2006. 360 с.
3. Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л. Методы сплайн / под ред. Н.Н. Яненко. М.: Наука, 1980. 352 с.

## **ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ГОРЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ GAS-DYNAMIC APPROACH TO MODELLING A BURNING SURFACE**

**А.Е. Кирюшкин**

**A.E. Kiryushkin**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University  
sashakir94@mail.ru

При решении задач внутренней баллистики РДТТ в одномерном или квазиодномерном приближениях газо- и энергоприход с боковой поверхности может моделироваться как с использованием граничных условий, так и через источники членов в уравнениях сохранения [1–3].

В данной работе рассматривается решение стационарной задачи для постоянного газоприхода двумя вышеперечисленными способами. Показывается, что решения в обоих случаях совпадают.

Также рассматривается стационарная задача, в которой газоприход на левой границе зависит от давления по закону  $\rho u = m_T p^V$ , где  $m_T$  и  $V$  – константы, причем  $0 < V < 1$ . Решение данной задачи двумя способами приводит к одинаковому результату.

Далее описывается нестационарная задача о втекании газа в канал постоянного сечения. Эта задача решается численно по схеме Годунова первого порядка точности [4], причем потоки на границах ячеек вычисляются по методу Ван-Лира [5]. Проведенные расчеты показали, что традиционная реализация левого условия (твердая стенка) приводят к тому, что значения давления, скорости и плотности в приграничной ячейке



отличаются от точного решения на несколько процентов. В других ячейках значения параметров совпадают с точным решением.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания № 10.1329.2014/К

### *Литература*

1. Райзберг Б.А., Ерохин Б.Г., Самсонов К.П. Основы теории рабочих процессов в ракетных системах на твердом топливе. М.: Машиностроение, 1972. 383 с.
2. Ерохин Б.Г., Липанов А.М. Нестационарные и квазистационарные режимы работы РДТТ. М.: Машиностроение, 1977. 200 с.
3. Рычков А.Д. Математическое моделирование газодинамических процессов в каналах и соплах. Новосибирск: Наука, 1988. 222 с.
4. Годунов С.К. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.
5. Van Leer B. Flux-Vector Splitting for the Euler Equations // Lecture Notes in Physics. 1982. Vol. 170. P. 507–512.

## **О РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ВЯЗКОГО СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ЗАТУПЛЕННОГО ТЕЛА THE MODEL OF A VISCOUS SHOCK LAYER**

**И.А. Котов, В.Д. Гольдин**

**I.A. Kotov, V.D. Gol'din**

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики

Томского государственного университета

Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Tomsk State University

kia1992@bk.ru, vdg@math.tsu.ru

Развитие ракетно-космической техники требует решения задач, связанных со сверх- и гиперзвуковым движением тел в атмосферах планет. Такое движение возникает, например, при спуске летательных аппаратов с орбиты, в баллистике движения снарядов, в астрономии при изучении входа в атмосферу Земли тел со сложной формой неземного происхождения (кометы, метеориты, астероиды и т.д.).

В настоящее время наиболее популярным подходом при решении рассматриваемых задач является схема Прандтля. В рамках этого подхода течение в ударном слое разбивается на две области: область невязкого течения и тонкий пограничный слой, примыкающий к поверхности обтекаемого тела. Граничные условия на внешней границе пограничного слоя определяются из решения уравнений Эйлера. При необходимости при малых и умеренных числах Рейнольдса эти решения уточняются с учетом эффектов второго порядка теории пограничного слоя, в частности эффекта вязко-невязкого взаимодействия.

Более точной моделью является модель вязкого ударного слоя [1–3]. Преимущества этой модели в том, что она содержит в себе все члены уравнений Эйлера и члены второго приближения теории пограничного слоя; в ней также можно учесть разнообразные физико-химические процессы, протекающие в ударном слое. С другой стороны, для ее реализации требуется меньше вычислительных затрат, чем при решении полной системы уравнений Навье–Стокса. Кроме того, она дает возможность рассчитать параметры движения в широком диапазоне чисел Рейнольдса, с использованием экономичных численных методов высокой точности.

В настоящей работе уравнения вязкого ударного слоя записываются в системе координат, связанной с поверхностью тела [1]. В качестве граничных условий используются обобщённые соотношения Ренкина–Гюгонио на ударной волне [1–3], условия непротекания и прилипания на поверхности тела, условия симметрии на оси течения; температура поверхности тела считается заданной.

Для численного решения задачи используется метод И.В. Петухова, имеющий 4-й порядок аппроксимации по координате, нормальной к поверхности тела и 1-й порядок – по продольной координате [4, 5]. Полученная система разностных уравнений решается методом матричной про-гонки.

Для определения отхода ударной волны предполагается использовать вариант метода глобальных итераций, предложенный в работе [6].

Для решения сформулированной задачи составлена программа на языке Object Pascal 8.0. Тестирование программы проведено для модельной системы уравнений.

Работа выполнена по госзаданию №9.1024.2014/к Минобрнауки РФ.

### *Литература*

1. *Гиперзвуковая* аэродинамика и теплообмен спускаемых космических аппаратов и планетных зондов / под ред. Г.А. Тирского. М.: Физматлит, 2011. 546 с.
2. *Лунёв В.В.* Течение реальных газов с большими скоростями. М.: Физматлит, 2007. 760 с.
3. *Cheng B.K.* The Blunt-Body Problem in Hypersonic Flow at Low Reynolds Number // JAS Paper. 1963. № 63–92.
4. *Калиткин Н.Н., Рогов Б. В., Соколова И.А.* Двустадийный маршевый расчет вязких течений через сопла Лавалья / Математическое моделирование. 1999, №7. С. 95–117.
5. *Петухов И.В.* Численный расчет двумерных течений в пограничном слое // Численные методы решения дифференциальных и интегральных уравнений и квадратурные формулы. М.: Изд-во АН СССР, 1964. С. 304–325.
6. *Помогаева С.В.* Метод глобальных итераций в задаче сверхзвукового невязкого обтекания затупленных тел / Научная конференция студентов механико-математи-ческого факультета ТГУ: сб. конф. Томск, 24–30 апреля 2014 г. Томск: Томский государственный университет, 2014. С. 47–48.

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АППРОКСИМАЦИОННОЙ  
СХОДИМОСТИ НЕПРЯМОГО МЕТОДА ГРАНИЧНЫХ  
ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ  
ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ**  
**NUMERICAL INVESTIGATION OF INDIRECT BOUNDARY  
ELEMENT METHOD APPROXIMATIONS FOR AXISYMMETRIC  
VISCOUS FLUID FLOW SIMULATION**

**А.Е. Кузнецова, М.А. Пономарева, В.А. Якутенюк  
А.Е.Kuznetsova, M.A. Ponomareva, V.A. Yakutenok**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University,  
Lina\_Kuznetsova@inbox.ru

В [1] предложен алгоритм решения задач об осесимметричном течении вязкой жидкости при малых числах Рейнольдса. Основой является использование непрямого метода граничных элементов (НМГЭ) [2]. Данный подход успешно использовался для моделирования плоских течений вязкой жидкости со свободной поверхностью, в том числе для жидкостей с неньютоновской реологией [3]. Настоящая работа посвящена исследованию аппроксимационных свойств НМГЭ для осесимметричного случая. В качестве тестовой задачи выбрано течение в круглой трубе (течение Пуазейля). Причем краевая задача формулируется так, чтобы на границах задавались как компоненты вектора скорости, так и компоненты вектора усилий. Это необходимо для дальнейшего обобщения на случай присутствия свободной поверхности.

Полученные в [1] фундаментальные тензора скоростей и усилий интегрируются численно с применением простой квадратуры прямоугольников со средней точкой. Кроме интегрирования по элементу в осесимметричном случае необходимо интегрирование в осевом направлении. Поэтому имеется три параметра, непосредственно влияющих на точность численного решения: количество элементов, количество интервалов интегрирования по углу и количество интервалов интегрирования на самом элементе. При использовании более сложных квадратурных формул последние два параметра соответствуют количеству узлов. В работе при помощи вычислительного эксперимента показано влияние на точность результатов указанных параметров. Отклонение приближенного решения от точного оценивалось в норме  $L_2$ . Полученные зависимости позволяют осуществить выбор вышеуказанных параметров для достижения необходимой точности вычислений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ (МК-3687.2014.1) и РФФИ в рамках научного проекта № 14-08-31579 мол\_а.

## Литература

1. Якутенок В.А., Пономарева М.А., Кузнецова А.Е. Моделирование осесимметричных течений вязкой несжимаемой жидкости непрямым методом граничных элементов // Вестн. ТГУ. Сер. Математика и механика. 2014. № 5(31). С. 114–123.
2. Якутенок В.А. Численное моделирование медленных течений вязкой жидкости со свободной поверхностью методом граничных элементов // Математическое моделирование. 1992. Т. 4, № 10. С. 62–70.
3. 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. 57. С. 289–304.

## ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА НЕСТАЦИОНАРНЫЕ РЕЖИМЫ ТУРБУЛЕНТНОЙ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В ЗАМКНУТОЙ ПОЛОСТИ С ЛОКАЛЬНЫМ ИСТОЧНИКОМ ЭНЕРГИИ EFFECT OF SURFACE EMISSIVITY ON UNSTEADY NATURAL CONVECTION IN AN AIR FILLED CAVITY WITH LOCAL HEAT SOURCE

И.В. Мирошниченко, М.А. Шеремет  
I.V. Miroshnichenko, M.A. Sheremet

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University  
miroshnichenko@land.ru

Рассматривается задача турбулентной естественной конвекции и поверхностного теплового излучения в замкнутой полости с локальным источником энергии. Большой интерес представляет исследование влияния приведенной степени черноты ограждающих стенок на структуру потока, а также на распределение локальных и интегральных характеристик.

Физическая область решения представляет собой квадратную полость с горизонтальными адиабатическими и вертикальными изотермическими стенками с локально расположенным на нижней стенке источником энергии постоянной температуры [1]. Внутри полости находится воздух, который считается вязкой, ньютоновской жидкостью, удовлетворяющей приближению Буссинеска. Режим течения турбулентный. Теплообмен излучением от источника тепловыделения и между стенками моделируется на основе приближения поверхностного излучения. Поверхности стенок считаются диффузносерами.

Для более детального исследования профилей температуры и скорости вблизи ограничивающих стенок была введена неравномерная разностная сетка с использованием особого алгебраического преобразования координат. В результате транспортные уравнения в безразмерных

переменных «функция тока – завихренность» с учетом отмеченного выше преобразования координат приняли вид:

$$\frac{d^2\xi}{dX^2} \frac{\partial\Psi}{\partial\xi} + \left(\frac{d\xi}{dX}\right)^2 \frac{\partial^2\Psi}{\partial\xi^2} + \frac{d^2\eta}{dY^2} \frac{\partial\Psi}{\partial\eta} + \left(\frac{d\eta}{dY}\right)^2 \frac{\partial^2\Psi}{\partial\eta^2} = -\Omega, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial\Omega}{\partial\tau} + \left(U - \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial v_t}{\partial\xi}\right) \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial\Omega}{\partial\xi} + \left(V - \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial v_t}{\partial\eta}\right) \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial\Omega}{\partial\eta} = \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial}{\partial\xi} \left[ \left( \frac{\sqrt{\text{Pr}}}{\sqrt{\text{Ra}}} + v_t \right) \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial\Omega}{\partial\xi} \right] + \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial}{\partial\eta} \left[ \left( \frac{\sqrt{\text{Pr}}}{\sqrt{\text{Ra}}} + v_t \right) \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial\Omega}{\partial\eta} \right] + \\ + \left( \frac{d^2\xi}{dX^2} \frac{\partial v_t}{\partial\xi} + \left(\frac{d\xi}{dX}\right)^2 \frac{\partial^2 v_t}{\partial\xi^2} - \frac{d^2\eta}{dY^2} \frac{\partial v_t}{\partial\eta} - \left(\frac{d\eta}{dY}\right)^2 \frac{\partial^2 v_t}{\partial\eta^2} \right) \times \left( \Omega + 2 \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial U}{\partial\eta} \right) + 4 \frac{d\xi}{dX} \left(\frac{d\eta}{dY}\right)^2 \frac{\partial^2 v_t}{\partial\xi \partial\eta} \frac{\partial V}{\partial\eta} + \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial\Theta}{\partial\xi}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial\Theta}{\partial\tau} + U \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial\Theta}{\partial\xi} + V \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial\Theta}{\partial\eta} = \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial}{\partial\xi} \left[ \left( \frac{1}{\sqrt{\text{Ra Pr}}} + \frac{v_t}{\text{Pr}_t} \right) \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial\Theta}{\partial\xi} \right] + \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial}{\partial\eta} \left[ \left( \frac{1}{\sqrt{\text{Ra Pr}}} + \frac{v_t}{\text{Pr}_t} \right) \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial\Theta}{\partial\eta} \right]. \quad (3)$$

В качестве модели турбулентности рассматривалась стандартная  $k$ - $\varepsilon$  модель:

$$\frac{\partial K}{\partial\tau} + U \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial K}{\partial\xi} + V \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial K}{\partial\eta} = \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial}{\partial\xi} \left[ \left( \frac{\sqrt{\text{Pr}}}{\sqrt{\text{Ra}}} + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial K}{\partial\xi} \right] + \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial}{\partial\eta} \left[ \left( \frac{\sqrt{\text{Pr}}}{\sqrt{\text{Ra}}} + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial K}{\partial\eta} \right] + \bar{P}_k + \bar{G}_k - E, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial\tau} + U \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial E}{\partial\xi} + V \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial E}{\partial\eta} = \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial}{\partial\xi} \left[ \left( \frac{\sqrt{\text{Pr}}}{\sqrt{\text{Ra}}} + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{d\xi}{dX} \frac{\partial E}{\partial\xi} \right] + \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial}{\partial\eta} \left[ \left( \frac{\sqrt{\text{Pr}}}{\sqrt{\text{Ra}}} + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{d\eta}{dY} \frac{\partial E}{\partial\eta} \right] + \\ + \left[ c_{1\varepsilon} (\bar{P}_k + c_{3\varepsilon} \bar{G}_k) - c_{2\varepsilon} E \right] \frac{E}{K}, \end{aligned} \quad (5)$$

Начальные и граничные условия для сформулированной задачи (1)–(5) подробно описаны в [2].

В результате проведенных исследований установлены распределения изолиний функции тока, температуры, кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации. Также была найдена зависимость средних конвективного и радиационного чисел Нуссельта от времени и приведенной степени черноты ограждающих стенок. С увеличением  $\varepsilon$  наблюдается характерное снижение интенсивности конвективного теплообмена на поверхности вертикальных стенок, в то время как среднее радиационное число Нуссельта увеличивается.

Работа реализована в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (задание № 13.1919.2014/К).

## Литература

1. Мартюшев С.Г., Шеремет М.А. Численный анализ конвективно-радиационного теплопереноса в замкнутой воздушной полости с локальным источником энергии // Компьютерные исследования и моделирование. 2014. Т. 6, № 3. С. 383–396.
2. Шеремет М.А. Математическое моделирование турбулентных режимов сопряженной термогравитационной конвекции в замкнутой области с локальным источником тепла // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18, №1. С. 117–131.

## ОБ АДДИТИВНОЙ РАЗНОСТНОЙ СХЕМЕ ДЛЯ РАСЧЕТА НА КЛАСТЕРЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОСЛОЙНОГО ОРТОТРОПНОГО КОЛЬЦА ADDITIVE DIFFERENTIAL CALCULATION SCHEME ON THE CLUSTER THERMAL CONDITION OF MULTILAYERED ORTHOTROPIC RINGS

В.Л. Михневич  
V.L. Michnevich

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University  
vlmihnevich@gmail.com

Рассматривается краевая задача о нагреве многослойного ортотропного кольца

$$\left\{ \begin{array}{l} U(r, \varphi, 0) = U_0(r, \varphi) \\ \lambda_0 \frac{\partial U}{\partial r} \Big|_{r=R_0} = \alpha_0 (U(R_0, \varphi, t) - T_{e_1}) \\ \frac{\partial U}{\partial t} = \left( a^2(r) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + b^2(r) \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} \right), \\ \lambda_{n-1} \frac{\partial U}{\partial r} \Big|_{r=R_n} = \alpha_1 (T_{e_2} - U(R_n, \varphi, t)) \\ \lambda_i \frac{\partial U}{\partial r} \Big|_{r=R_{i-0}} = \lambda_{i+1} \frac{\partial U}{\partial r} \Big|_{r=R_{i+0}} \\ U(R_{i+0}, \varphi, t) = U(R_{i-0}, \varphi, t) \\ U(r, \varphi, t) = U(r, \varphi + 2\pi, t) \\ t \in [0, T_{max}], r \in [R_0, R_n], \varphi \in [0, 2\pi) \end{array} \right.$$

$$\widehat{K}[R_0, R_n] = K[R_0, R_1] \cup \dots \cup K[R_{n-1}, R_n],$$

$$0 < R_0 < R_1 < \dots < R_n,$$

$$K[R_i, R_{i+1}] = \{(r, \varphi): R_i \leq r \leq R_{i+1}, \varphi \in [0, 2\pi]\}, \quad i = 1 \dots n - 1,$$

где  $a^2, b^2, \alpha_1, \alpha_2, \lambda_i, T_{e_1}, T_{e_2}$  – заданные параметры среды.

Для аппроксимации используется неявная аддитивная схема расщепления [1] со вторым порядком точности по  $r$  и  $\varphi$  и первым по  $t$ . На первом дробном шаге для каждого  $\varphi = \varphi_j, j = \overline{1, M}$  система имеет вид  $A\bar{u}^{n+\frac{1}{2}} = \bar{f}$ , а на втором дробном шаге для каждого  $r = r_i, i = \overline{1, M}$   $B\bar{u}^{n+1} = \bar{\varphi}$ , где матрицы  $A, B$  имеют следующую структуру

$$A = \begin{pmatrix} b & c & 0 & \dots & 0 \\ a & b & c & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & a & b & c \\ 0 & \dots & 0 & a & b \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} p & q & 0 & \dots & r \\ r & p & q & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & r & p & q \\ q & \dots & 0 & r & p \end{pmatrix}$$

Расчетные формулы параллельного алгоритма основаны на использовании встречных прогонок на каждом дробном слое [2, 3].

В докладе приводится анализ разностной схемы, результаты расчетов на кластере ТГУ СКИФ Cyberia. Проведена оценка ускорения и эффективности алгоритма с ростом размерности задачи и количества процессоров.

#### *Литература*

1. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. М.: Наука, 1978.
2. Логанова ЛВ., Головашкин Д.Л. Параллельный алгоритм реализации метода встречных циклических прогонок для двумерных сеточных областей // Вычислительные технологии. Т. 16, № 4. Новосибирск, 2011. С. 64–71.
3. Головашкин Д.Л., Филатов М.В. Параллельные алгоритмы метода циклической прогонки // Компьютерная оптика. 2005. №. 27. С. 123–130.
4. Старченко А.В., Берцун В.Н. Методы параллельных вычислений. Томск: Изд-во Том. ун-та 2013. 232 с.

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОПЫЛЕВОЙ СМЕСИ В ПРОСТРАНСТВЕ С ЛЕСОЗАЩИТНОЙ ПОЛОСКОЙ MODELING OF PROCESSES OF MOTION IN THE GAS-DUST MIXTURE SPACE WITH WINDBREAKS**

**Ж.Ж. Оспанова  
Z.Z. Osanova**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University  
janna\_oj@mail.ru

В настоящее время процессы урбанизации, наращивания промышленных производств и развитие больших городских агломераций

приводит к тому, что обостряется проблема чистого воздуха и защиты населенных территорий от вредных промышленных выбросов. Значительная урбанизация (к началу XXI в. население крупных городов всего мира составило почти треть от населения земного шара) привела к повышению концентрации крупных источников выбросов вредных веществ вблизи городов и территорий плотной застройки. К таким источникам можно отнести промышленные предприятия, отопительные котельные, автомобильный транспорт.

Целью работы являлось построение численной модели взаимодействия массивов растительности с двухфазными газодинамическими потоками на основании уравнений газовой динамики с помощью программного комплекса ANSYSCFX.

Задачами исследований было построение численной модели процесса распространения пылевого облака в трехмерном массиве на основе уравнений газовой динамики в пакете ANSYSCFX. С помощью реализованной численной методики и ранее известных экспериментальных данных решение модельной задачи распространения пылевого облака в трехмерном пространстве.

В работе [1] приведены результаты моделирования турбулентного течения воздуха и переноса примесей в условиях городской застройки. Описаны влияния геометрических размеров, метеорологических факторов, наличия и размеров растительности и местоположения, а также интенсивности движения уличного автотранспорта. Показано, что высокие уровни концентрации примесей в условиях городской застройки наблюдаются при низкой скорости ветра, показано влияния источников выбросов в приземном слое.

В качестве математической модели для описания пылевого облака принимается модель сплошной среды, состоящей из частиц пыли. При этом учитываются силы, действующие на частицы со стороны воздуха, а также размер частиц пыли и изменения количества движения частиц при столкновениях с элементами деревьев. При этом предполагается, что в таких столкновениях на деревьях выпадает масса пыли, пропорциональная поверхности этих элементов, пылевому потоку на них и некоторому коэффициенту захвата частиц  $K_p$ , который может изменяться от нуля до единицы. Одновременно полагается, что при столкновениях с элементами лесного массива частицы полностью теряют свое количество движения.

В указанных допущениях интегральные уравнения сохранения массы и количества движения пылевого облака имеют вид (3.8) – (3.9):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \xi \rho_s d\Omega + \int_{\Omega} \xi \rho_s (\vec{U}_s \cdot \vec{n})_{as} = - \int_{\Omega} K_p (1 - \xi) \rho_s |\vec{U}_s| d\Omega,$$



$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho_s \xi \vec{U}_s d\Omega + \int_S \xi (\vec{U}_s \cdot \vec{n}) \rho_s v_s ds =$$

$$\int_{\Omega} \frac{\rho_s}{m_s} \vec{f}_s d\Omega - \int_{\Omega} (1 - \xi) \rho_s |\vec{U}_s| \vec{U}_s d\Omega - \int_{\Omega} \rho_s \vec{g} \xi ds,$$

где  $\rho_s$  – плотность пылевого облака,  $\vec{U}_s$  – вектор скорости частиц;  $m_s$  – масса одной частицы;  $\vec{f}_s = S_m C_R (\vec{U} - \vec{U}_s)$  – сила, с которой воздух действует на частицу;  $S_m$  – площадь Миделя частицы;  $C_R$  – коэффициент сопротивления;  $\vec{g}$  – ускорение силы тяжести;  $K_p$  – коэффициент осаждения частиц на кронах.

Моделирование частиц пыли основано на Эйлеровом подходе, моделируется движение массы частиц в объеме. Для решения уравнений движения частиц пыли (3.8)–(3.9) также применяется метод конечных объемов. На гранях используется противопоточная форма записи разностей скоростей.

В результате проделанной работы было проведено численное моделирование процесса распространения пылевого облака в пространстве с лесозащитными полосами с помощью программного пакета ANSYS.

#### *Литература*

1. Нутерман Р.Б. Моделирование турбулентных течений и переноса примеси в элементах городской застройки: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: Том. гос. ун-т, 2008. 156 с.
2. Орлов С.А. Математическое моделирование процессов аэродинамики в лесных массивах и насаждениях: дис. канд. физ.-мат. наук. Томск: Том. гос. ун-т, 2012.
3. Разаренов А.И. О влиянии лесных полос на запыленность атмосферного воздуха / Лесное хозяйство Поволжья. Саратов, 1999. Вып. 4. С. 53–56.
4. Садовничий Ф.П. Зависимость диаметра крон в культурах сосны от высоты и возраста // Лесное хозяйство. 1964. №7. С. 44–46.

## РЕШЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ УРАВНЕНИЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ НА ПРИМЕРЕ РАСЧЕТА ЗАДАЧИ О ДВИЖЕНИИ КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛА В АТМОСФЕРЕ SOLUTION OF UNSTEADY GAS DYNAMICS EQUATIONS ON THE EXAMPLE OF CALCULATING THE MOTION OF THE COSMIC BODY AT HYPERSONIC SPEEDS IN THE ATMOSPHERE

**В.Л. Гойко, А.С. Помилуйко**

**V.L. Goiko, A.S. Pomiluyko**

Национальный исследовательский Томский государственный университет

National Research Tomsk State University

goiko@ftf.tsu.ru

В данной работе представлено численное решение нестационарных уравнений газовой динамики. Эффективность применяемого метода

решения нестационарных пространственных газодинамических течений продемонстрирована на примере решения задачи о движении космического тела в атмосфере методом С.К. Годунова.

Для пространственных задач газовой динамики законы сохранения массы, импульса и энергии в дифференциальном виде выглядят следующим образом:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0.$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial (p + \rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial \rho uv}{\partial y} + \frac{\partial \rho uw}{\partial z} = 0.$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho uv}{\partial x} + \frac{\partial (p + \rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial \rho vw}{\partial z} = 0.$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial \rho uw}{\partial x} + \frac{\partial \rho vw}{\partial y} + \frac{\partial (p + \rho w^2)}{\partial z} = 0.$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial (e + p)u}{\partial x} + \frac{\partial (e + p)v}{\partial y} + \frac{\partial (e + p)w}{\partial z} = 0.$$

Система уравнений замыкается уравнением полной энергии

$$e = \rho \left( \varepsilon + \frac{q^2}{2} \right).$$

Основой для построения расчетного алгоритма выступила разностная схема численного решения нестационарных уравнений газовой динамики с нахождением потоков по методу С.К. Годунова [1]. Расчетная схема преобразована для использования параллельного алгоритма. Параллельность достигнута за счет использования технологии MPI (Message Passing Interface) [2]. Суть параллельного алгоритма заключается в разбиении расчетной области на число подобластей, равное числу процессоров. Каждый процессор обрабатывает свою подобласть и обменивается информацией с соседними процессорами.

Космическое тело при входе в атмосферу на метеорной скорости (20 км/с) взрывается в полете и мгновенно переходит в облако газов, данное облако и рассматривается в дальнейшем при расчете. Рассматривалось разрушение данного облака при разных углах атаки. Для задачи о движении космического тела использовалась равномерная прямоугольная расчетная сетка. Начальные условия задавались с учетом параметров международной стандартной атмосферы на высоте 20 км.

Использование параллельного алгоритма существенно снизило время, необходимое для проведения расчета. В качестве высокопроизводительного вычислительного комплекса для проверки эффективности параллельного алгоритма выступил кластер на базе Национального исследовательского Томского государственного университета СКИФ - Cyberia.

### *Литература*

6. Годунов С.К. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.

7. Немнюгин С.А., Стесик О.Л. Параллельное программирование для многопроцессорных вычислительных систем. СПб.: БХВ-Петербург, 2002. 400 с.

8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: учеб. пособ. для вузов: в 10 т. Т. VI: Гидродинамика. 5-е изд., стереот. М.: Физматлит, 2001. 736 с.

## **ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СВЕРХЗВУКОВОГО НЕВЯЗКОГО ОБТЕКАНИЯ ЗАТУПЛЕННЫХ ТЕЛ AN ALGORITHM FOR SOLVING THE PROBLEM OF SUPERSONIC INVISCID FLOW AROUND BLUNT BODIES**

<sup>1</sup>С.В. Помогаева, <sup>2</sup>В.Д. Гольдин

<sup>1</sup>S.V. Pomogaeva, <sup>2</sup>V.D. Goldin

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

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики  
Томского государственного университета

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University

<sup>2</sup>Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University  
lanapom.92@gmail.com, vdg@math.tsu.ru

Данная работа посвящена задаче сверхзвукового обтекания тел затупленной формы. Подобные задачи встречаются в таких научных областях как баллистика, ракетостроение, метеорная физика, самолетостроение и др.

При сверхзвуковом обтекании произвольного тела возмущенное течение сосредоточено в ударном слое, расположенном между поверхностью тела и головной ударной волной. Целью исследования является определение поля течения в ударном слое при невязком обтекании осесимметричного затупленного тела.

Задача решается на основе уравнений Эйлера, записанных в системе координат, связанной с поверхностью тела. Граничными условиями для системы служат условие непротекания на поверхности тела, условия симметрии на оси течения и соотношения Ренкина–Гюгонио на поверхности головной ударной волны [1].

Получить решение поставленной задачи аналитическим путем невозможно ввиду ряда трудностей. Исходная система уравнений в частных производных является нелинейной, имеет переменный тип: эллиптический – в дозвуковой и гиперболический – в сверхзвуковой области. Положение ударной волны заранее неизвестно и должно определяться в процессе решения.

Одним из методов решения задач такого типа является метод глобальных итераций [2]. Он состоит из двух этапов: а) при известном с предыдущей итерации положении ударной волны решается система дифференциальных уравнений; б) по известному полю течения в ударном слое уточняется положение ударной волны. Эти этапы поочередно повторяются в итерационном процессе до достижения сходимости.

В настоящей работе предлагается оригинальный вариант метода глобальных итераций. Суть метода состоит в выводе и решении интегро-дифференциального уравнения относительно отхода ударной волны.

В процессе линеаризации задачи вводится вектор приращений  $\Delta = (\delta y_s, \delta p_s, \delta p'_s, \delta t_\beta)^T$ , компоненты которого связаны между собой некоторыми алгебраическими и дифференциальными соотношениями. Здесь  $\delta y_s$  – приращение отхода ударной волны;  $\delta p_s$  – приращения давления на ударной волне, а  $\delta t_\beta$  – приращения вспомогательного параметра  $t_\beta$  прямо пропорционального производной от  $y_s$ .

Путем разрешения уравнений внутри области можно вычислить параметры течения через вектор  $\Delta$ . Подставляя полученные выражения в граничные условия на ударной волне, получим интегро-дифференциальное уравнение вида

$$\frac{d}{dz} \left[ a(z) \frac{df}{dz}(z) \right] + b(z) \left[ \frac{df}{d\xi} \right] + c(z) [f(\xi)] = d(z),$$

где  $z \geq 0$ ,  $f(z) \equiv \delta y_s(z)$ , а  $b(z)$  и  $c(z)$  – интегральные операторы, действующие на функции  $f(\xi)$  и  $\frac{df}{d\xi}$  при  $\xi \leq z$ .

Анализ коэффициентов уравнения на известных решениях показывает, что коэффициент при старшей производной  $a(z)$  равен нулю при  $z=0$  и при некотором  $z^* > 0$ . Условием, замыкающим алгоритм, является условие гладкости решения в окрестности точки  $z^*$ .

Полученное дифференциальное уравнение аппроксимируется двумя различными разностными соотношениями в зависимости от  $z$ : при аппроксимации второй производной в области  $z < z^*$  используется

центральная разность, а при  $z > z^*$  – односторонняя. Решение в дозвуковой области ( $z < z^*$ ) определяется методом прогонки, а в сверхзвуковой – вычисляется по явным формулам.

В итоге, на первом этапе метода глобальных итераций поле течения определяется путем решения конечно-разностных уравнений по неявной схеме, а на втором этапе определяется отход ударной волны с помощью описанного выше алгоритма.

Работа выполнена в соответствии с госзаданием № 9.1024.2014/к Минобрнауки РФ.

### *Литература*

1. Лунев В.В. Течение реальных газов с большими скоростями. М.: Физматлит 2007. 759 с.
2. Гиперзвуковая аэродинамика и теплообмен спускаемых космических аппаратов и планетных зондов / под ред. Г.А. Тирского. М.: Физматлит. 2011. 546 с.

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ПЛОСКОЙ КАВЕРНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА SIMPLE NUMERICAL SIMULATION OF VISCOUS FLOW IN A PLANAR CAVITY USING SIMPLE ALGORITHM**

**И.А. Рыльцев**

**I.A. Ryltsev**

Национальный исследовательский Томский государственный университет

National Research Tomsk State University

Stalak133@mail.ru

В современном мире компьютерное моделирование является эффективным способом изучения сложных физических процессов. В случаях, когда эксперимент не может быть осуществлен по каким либо причинам (время проведения, непредсказуемость результатов, финансовая сторона), компьютерное моделирование дает возможность исследовать изучаемый процесс, не смотря на эти проблемы. После проведения численных экспериментов, полученные данные анализируются и сравниваются с реальным поведением изучаемого объекта, затем делают вывод о корректности выбранной модели.

В данной работе рассматривается задача о течении ньютоновской несжимаемой жидкости в каверне. Течение описывается уравнениям Навье–Стокса совместно с уравнением неразрывности. Верхняя стенка движется в горизонтальном направлении, другие три стенки сосуда остаются неподвижными. На твердых стенках выполняются условие прилипания.

Численное решение задачи осуществляется с помощью алгоритма SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation), который был разработан Брайаном Сполдингом и Сухасом Патанкарком [1]. Область течения покрывается разнесенной разностной сеткой. Численный метод реализован на каждом шаге по времени в два этапа. На первом этапе рассчитывается поле скорости в расчетных узлах разнесенной сетки. На втором этапе корректируются поля давления и скорости для выполнения уравнения неразрывности. На каждом шаге по времени организуется итерационный процесс. При этом были реализованы различные схемы дискретизации уравнения движения: противопоточная и экспоненциальная. Проведен сравнительный анализ результатов расчета.

Чтобы реализовать алгоритма расчета течения жидкости, была написана и отлажена программа на языке C++ в среде Microsoft Visual Studio. Для представления картины течения, после решения исходной системы рассчитывалось распределение функции тока, изолинии которого являются линиями тока. Был проведен ряд вычислительных экспериментов.

В результате была получена картина стационарного течения жидкости в каверне с подвижной стенкой, характеризующаяся формированием циркуляционных зон в центре и углах области. Далее исследовалась зависимости характеристик течения от числа Рейнольдса. С увеличением числа Рейнольдса в нижних углах области образуются дополнительные вихри, а центральная циркуляционная зона смещается к центру. Для ньютоновской жидкости было построено поле давления. Получено, что максимальное давление реализовано в правом верхнем углу, минимальное – в левом.

### *Литература*

1. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ, ПОЛУЧЕННОГО НА ОСНОВЕ РАЗНОСТНОЙ ENO СХЕМЫ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА ТОЧНОСТИ NUMERICAL SOLUTION OF GAS DYNAMICS EQUATIONS WITH ENO DIFFERENCE SCHEMES OF HIGH-ORDER ACCURACY**

**Е.Л. Светличная**

**E.L. Svetlichnaya**

Национальный исследовательский Томский государственный университет

National Research Tomsk State University

Sv.Ek.Leon@mail.ru

Известно, что формальное увеличение порядка аппроксимации разностных схем не всегда приводит к действительному увеличению

точности решения, в связи с чем разработаны новые схемы, например, ENO схемы, позволяющие достаточно успешно реально повысить порядок точности.

Целью данной работы является изучение поведения решений одномерных уравнений газовой динамики, полученных с помощью разностных ENO схем высокого порядка точности, а примере задачи о распаде произвольного разрыва.

Алгоритм ENO реконструкции позволяет восстанавливать распределение газодинамических параметров внутри расчетной ячейки на основе построения интерполяционного полинома по тем точкам, для которых разделенные разности соответствующего порядка имеют минимальное по модулю значения. По восстановленному распределению газодинамических параметров определяются параметры на левой и правой границах внутри ячеек.

Для определения потоков газодинамических параметров на границах ячеек в данной работе использовался метод Ван-Лиры. Исследования численного решения проводилось на основе схем второго, третьего и четвертого порядков точности.

Для проверки способности разностных схем надежно рассчитывать профили ударной волны и контактного разрыва, а также корректно описывать профиль параметров в области волны разрежения в качестве тестовой была выбрана задача Сода, представляющая собой задачу Коши для уравнений Эйлера сжимаемого газа со следующими начальными условиями. Слева от разрыва:  $P_L=1$ ,  $\rho_L=1$ ,  $U_L=0$ ; справа от разрыва:  $P_R=0.1$ ,  $\rho_R=0.125$ ,  $U_R=0$ .

Исследование численного решения проводилось при различных значениях числа Куранта с одинаковым порядком точности и одинаковым разбиении области решения. Также рассматривалось поведение решения при измельчении сетки для схем с одним и тем же порядком точности при заданном числе Куранта и проводилось сравнение решений, полученным на основе схем различного порядка точности. Численные решения сравнивались с точным решением задачи Сода.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Уменьшение значение числа Куранта ведет к увеличению диссипативных свойств схемы, вследствие чего, с одной стороны, уменьшается амплитуда осцилляции, и решение становится более точным в области контактного разрыва, а с другой – точность решения ухудшается в области централизованной волны разрежения.

2. Измельчение разностной сетки ведет к увеличению точности решения во всех характерных областях, а именно, контактного разрыва, централизованной волны разрежения и ударной волны.

3. Увеличение порядка разностной ENO схемы требует понижение значения числа Куранта для корректного разрешения контактного разрыва и ударной волны.

4. Начиная со схем третьего порядка точности, они дают осцилляционные решения. В области гладкого течения лучший результат показывает схема третьего порядка, так как точность схемы четвертого порядка существенно снижает число Куранта, равное 0.05.

5. Уменьшение числа Куранта снижает точность решения в области гладких течений, т.е. в области центрированной волны разрежения, поэтому дальнейшее увеличение порядка аппроксимации разностной ENO схемы не оправдано применительно к решению уравнений газовой динамики в области с разрывами.

### *Литература*

1. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я. Численные методы решения многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.

2. Пинчуков В.И., Шу Ч.-В. Численные методы высоких порядков для задач аэродинамики. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 232 с.

3. Миньков Л.Л., Шрагер Э.Р. Численные методы решения одномерных нестационарных уравнений газовой динамики. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1999. 44 с.

4. Harten A., Osher S. Uniformly high-order accurate non-oscillatory schemes, I // SIAM Journal of Numerical Analysis. Vol. 24. 1987. P. 279–309

5. Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme. V. A second-order to Godunov's method // J. Comput. Phys. 1979. No. 1. P. 101–136.

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА АНСАМБЛЕЙ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРОВОДНИКОВ АКСИАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ MATHEMATICAL MODELING OF INDUCTIVE HEATING ENSEMBLES OF LIGHT-WALL CYLINDRICAL CONDUCTORS BY AXIAL MAGNETIC FIELD**

<sup>1</sup>Н.В. Селюнина, <sup>2</sup>С.В. Синяев

<sup>1</sup>N.V. Selyunina, <sup>2</sup>S.V. Sinyaev

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

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики

Томского госуниверситета

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University

<sup>2</sup>Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics

at Tomsk State University

ssv@niipmm.tsu.ru

Приводятся моделирующие уравнения, методика и результаты численных расчетов быстрого индукционного нагрева ансамблей полых



тонкостенных цилиндрических проводников в переменном магнитном поле соленоида применительно к процессам многоочагового нагрева и зажигания реакционноспособных составов. Оценивается влияние различных параметров моделируемого устройства на динамику нагрева ансамблей индукционно связанных между собой проводников в соленоиде до высоких температур вплоть до температуры их плавления. Оценивается влияние количества ансамблей проводников на эффективность процесса их нагрева.

**ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В МАТЕМАТИЧЕСКОМ  
МОДЕЛИРОВАНИИ ДИНАМИКИ ЛИНЕЙНОЙ  
МАКРОМОЛЕКУЛЫ  
PARALLEL COMPUTING FOR MATHEMATICAL MODELING  
OF THE DYNAMICS OF LINEAR MACROMOLECULES**

**Ю.Б. Трегубова**

**Y.B. Tregubova**

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова

Altai state technical university after I.I.Polzunov

[jtregubova@gmail.com](mailto:jtregubova@gmail.com)

Механическое поведение полимерных систем сочетает упругость твердого тела и текучесть жидкости, его определяют как вязкоупругое. Это свойство является одним из проявлений медленных релаксационных процессов, которые связывают, прежде всего, с релаксацией отдельной макромолекулы в системе.

В рамках модели гауссовых субцепей или шариков и пружинок всякая макромолекула может быть эффективно представлена как цепочка связанных броуновских частиц. При этом макромолекула разбивается на  $N$  субцепей длиной  $M/N$  каждая, и ее поведение описывается движением линейной цепочки из  $N+1$  броуновских частиц, связанных между собой последовательно упругими силами. Конкретизация функций, определяющих физические характеристики вещества, осуществляется в рамках микроструктурного (статистического) подхода. Такой подход позволяет учитывать как молекулярное строение вещества, так и процессы межмолекулярного взаимодействия.

Пренебрегая взаимным гидродинамическим взаимодействием частиц в линейном по скоростям приближении, динамика единичной цепочки может быть описана набором стохастических уравнений, удовлетворяющих второму закону динамики [1].

Решения уравнений были получены в виде значений величины смещения центра масс макромолекулы методом Рунге–Кутты. Результаты вычислений не зависят от числа  $N$  ( $N > 10$ ) субцепей в моделируемой

макромолекуле, что позволяет утверждать о корректности выбранной модели макромолекулы и схемы описания динамики ее поведения. Поэтому для простоты итоговые вычисления проводились для  $N = 20$ .

Расчеты можно было проводить на персональном компьютере и персональном настольном суперкомпьютере SUPERMICRO X8DT3. Персональный компьютер содержит один 64-разрядный процессор AMD Athlon X2 QL64. Частота работы процессора 2,1 ГГц. Частота шины 3600 МГц. Процессор содержит 2 ядра. Суперкомпьютер SUPERMICRO X8DT3 содержит два 64-разрядных процессора QuadCore Intel Xeon X5620. Частота работы процессора 2,4 ГГц. Частота шины 2933,6 МГц. Каждый процессор содержит 4 ядра.

Так как процессоры обоих компьютеров обладают более чем одним ядром, было проведено распараллеливание задачи по реализациям.

Для выявления наиболее оптимальной вычислительной среды расчет одной и той же конфигурации модели был произведен на обоих компьютерах для различного числа используемых процессов. Заметим, что используемое при расчетах программное обеспечение не позволяет открывать и использовать для задачи число процессов, превышающее количество физических ядер процессора, поэтому в данной работе термины ядро и процесс в большинстве случаев взаимозаменяемы.

Таким образом, с одной стороны, время, затрачиваемое на расчет при использовании одного и двух процессов на персональном компьютере, больше, но сопоставимо со временем аналогичного расчета на суперкомпьютере, с другой – суперкомпьютер обладает 8 ядрами, поэтому в итоге показывает минимальное время выполнения. Причем выигрыш достигает 8,3 раза по сравнению с использованием 1 ядра персонального компьютера и 7,4 раза по сравнению с 1 ядром суперкомпьютера. Поэтому все дальнейшие расчеты выполнялись на суперкомпьютере SUPERMICRO X8DT3.

Было проведено усреднение полученных смещений центра масс макромолекулы. Время, затрачиваемое на расчет, с увеличением количества реализаций растет практически линейно. Линейный рост времени выполнения расчета наблюдается при использовании различного числа открываемых потоков. Причем скорость увеличения времени выполнения растет тем быстрее, чем меньше используется расчетных потоков.

С увеличением количества реализаций кривая усредненного численного решения становится все более гладкой, сохраняя все характеристические особенности, что еще раз подтверждает корректность выбранной математической модели.

### *Литература*

1. Pokrovskii V.N. A justification of the reputation-tube dynamics of a linear macromolecule in the mesoscopic approach // Physica. 2006. Vol. A366. P. 88–106.

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ  
СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ КОНИЧЕСКОГО АДАПТЕРА ДЛЯ  
ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА "КОМПОЗИТ НК АНИЗОГРИД"  
DEVELOPMENT SOFTWARE PACKAGE FOR THE GENERATION  
OF STRUCTURAL MODELS TAPER ADAPTER FOR PROGRAM  
COMPLEX "COMPOSITE NK ANIZOGRID"**

**А.Д. Ульянов**

**A.D. Ulyanov**

Новокузнецкий институт (филиал) федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего профессионального образования

"Кемеровский государственный университет"

Novokuznetsk Institute (branch) of the federal state

budget educational institution of higher professional education

"Kemerovo State University" Novokuznetsk Institute (branch)

zbrg@mail.ru

В программном комплексе "Композит НК Анизогрид" в качестве входных данных для расчета используется набор текстовых файлов, называемых в совокупности структурной моделью, с информацией о конечно-элементной модели. Генерация файлов требуемого содержания для регулярных сетчатых анизогридных оболочек обычно производится средствами интерпретируемого языка "Ядро". Но при рассмотрении моделей специального класса конструкций удобнее использовать специализированные программные модули.

Для создания структурной модели данной конструкции был реализован модуль "Генератор". В нем реализованы основные шаги генерации данных структурной модели конического адаптера. Подобный подход позволяет получить больший контроль над геометрией модели через перегрузку методов основного класса.

Модуль "Генератор" представляет из себя класс языка C++. Для получения конечных данных следует последовательно выполнить последовательность методов-шагов, формирующих данные.

Первый шаг состоит в построении двумерного представления части модели, содержащей генерацию проекции сетчатой поверхности на плоскость. На данном шаге генерируются только основания и спиральные ребра. Второй шаг заключается в построении кольцевых ребер конструкции. Третий шаг алгоритма реализует деление исходных отрезков на конечные элементы.

Итогом первых трех шагов становится готовая развертка трехмерной структурной модели конструкции со швом. После выполняются последовательно методы преобразования двумерной развертки в трехмерную структурную модель.

Первым вызывается метод трансформации развертки. Трансформация включает в себя не только преобразование вершин в трехмерные, но и

объединение всех вершин, располагающихся вдоль шовного спирального ребра.

Далее по порядку выполняется процедура задания нагрузок на конструкцию через жесткий узел. Суть процедуры в том, что верхнее основание адаптера сводится к одной вершине – жесткому узлу. Жесткий узел находится на том же уровне по высоте, но перемещается в центр окружности в плоскости верхнего основания. К этому необычному узлу непосредственно прикладывается нагрузка. Для того чтобы не утратить данные об исходной геометрии модели, на затронутых сведением конечных элементах задаются эксцентриситеты.

После задания нагрузок на жесткий узел выполняются процедуры генерации местных и локальных осей для элементов и вершин.

В следующем этапе построения модели необходимо задать должным образом информацию о типе сечения. В данный момент "Композит НК Анизогрд" поддерживает 2 способа определения сечения в элементе: установка индекса типового сечения и установка габаритов прямоугольного сечения для каждого элемента. Оба способа имеют свою специфику, поэтому данному методу требуется две реализации, чтобы ее учесть для учета переменного сечения в ребрах.

Оба способа в настоящий момент поддерживаются модулем "Генератор", тем самым расширяя возможности построения структурных моделей для конструкций данного класса.

Подобные конструкции могут допускать наличие вырезов выпуклой формы. При построении структурной модели в модуле генератор есть возможность формирования выпуклых вырезов по проекции эллипса на сетчатую поверхность и последующего скругления внутренних острых углов.

На завершающем этапе работы с модулем "Генератор" есть возможности планирования вычислительного эксперимента. На специально отведенной форме графической оболочки модуля можно выбрать варьируемые параметры и интервалы варьирования с количеством разбиений на этих интервалах. После подтверждения ввода, автоматически будет сгенерирована план матрица эксперимента. В настоящий момент поддерживается варьирование только параметров сечений, но по мере необходимости имеется возможность добавления и других параметров для вариации. В предварительно выбранной папке создадутся нумерованные папки со структурными моделями на каждую запись из сгенерированной план-матрицы эксперимента. Так же генерируется специальный файл, предназначенный для учета выполненных экспериментов.

Основное требование, предъявляемое к разрабатываемому модулю это гибкость настроек генерируемой структурной модели. На данном этапе данные требования выполняются за счет удобства редактирования исходного кода, так как модуль проектировался с учетом часто изменяющихся требований к получаемой в результате модели. Но в

будущем планируется обеспечить работоспособность механизма настройки доступа к параметрическим зависимостям и варьируемым параметрам через графический интерфейс.

**ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ПРОСТОЙ  
ИТЕРАЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ НЕЛИНЕЙНЫХ  
АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ  
ТЕЧЕНИЙ СТЕПЕННОЙ ЖИДКОСТИ НЕПРЯМЫМ МЕТОДОМ  
ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**  
**AN EFFECTIVE SIMPLE ITERATION SCHEME OF NONLINEAR  
ALGEBRAIC EQUATIONS SYSTEM SOLVING FOR POWER LAW  
FLUID FLOW SIMULATION BY INDIRECT BOUNDARY ELEMENT  
METHOD**

**М.А. Пономарева, М.П. Филина, В.А. Якутенюк**  
**M.A. Ponomareva, M.P. Filina, V.A. Yakutenok**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University,  
filina.mari@mail.ru

Работа посвящена использованию метода простой итерации для решения системы нелинейных алгебраических уравнений при реализации непрямого метода граничных элементов для случая двумерных ползущих течений неньютоновской жидкости со свободной поверхностью. Реализация данного метода для нелинейных уравнений включает вычисление интеграла по области от изначально неизвестной функции плотности источников, распределенных по области течения. В результате дискретизации гранично-интегральных уравнений получается система нелинейных алгебраических уравнений. Для ее решения применяется метод простой итерации. В случае течения степенной жидкости при малых значениях показателя нелинейности возникает необходимость использования процедуры релаксации. В работе представлено описание варианта метода простой итерации, использующего данную процедуру и результаты численного решения тестовой задачи. Разработанный алгоритм оказался эффективным в широком диапазоне изменения показателя нелинейности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента РФ (МК-3687.2014.1) и РФФИ в рамках научного проекта № 14-08-31579 мол\_а.

*Литература*

6. 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. 57. С. 289–304.

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

---

---

Session 3  
**STUDY OF PERSPECTIVE MATERIALS IN APPLICATIONS  
OF CONTINUUM MECHANICS**

**SHORT OVERVIEW OF THE SMART WATER PROJECT RESULTS**

**N. Dobrinkova**

Assist. Prof. PhD in Institute of Information and Communication Technologies – Bulgarian  
Academy of Sciences(Affiliation)  
nido@math.bas.bg

In the framework of Smart Water project supported under DG “ECHO” call for prevention and preparednes ICT-BAS team has started working on the territory of Svilengrad municipality located on the Bulgarian-Greek-Turkish border where flood events caused by high waves of Maritza river and its tributaries occur every two years.

Maritza is the biggest Bulgarian river. The river is subject of observations in Svilengrad since 1914, during the period 1914–1972 they have been made on the stone bridge of the river built in 15th century (cultural heritage of UNESCO), and after 1972 the observations are realized on the new railway bridge. Since 1990 the observations have been accomplished on the new highway bridge.

The references provide the following data about the orohydrographic characteristics of the river catchment up to the hydrometric point.

The subject considered is all feeders of Maritza River on the territory of Svilengrad municipality. These feeders influence directly the formation of high flows and their accounting guarantees safe exploitation of the existing protective installations close to the river. The most important feeders of Maritza River with a catchment area above 8 sq. km in the order of their influx are:

- Siva river – a right feeder on the boundary with Ljubimets municipality;
- Mezeshka river – a right feeder;
- Goljiamata reka (Kanaklijka) – a left feeder;
- Levka river – a left feeder;
- Selska reka – a left feeder;
- Jurt dere – a left feeder;
- Tolumba dere – a left feeder;

- Kalamitza – a left feeder.

The work performed by the ICT-BAS team was to calculate potential flood hazard zones of the river in its location on the territory of Svilengrad municipality where 10, 100 and 1000 years of wave probability has been calculated. The different variations reflected in creation of web-based tool with GIS maps where red, orange, yellow and green zones depending on the depth of the flood water wave has been created.

This tool has an idea to support the decision makers in Civil Protection units in their evacuation maneuvers and reactions.

**Acknowledgements:** The work has been supported by by project Simple Management of Risk Through a Web Accessible Tool for EU Regions - ECHO/SUB/2012/638449. Acronym: SMART WATER. Web site: <http://www.smartwaterproject.eu/>. (funded grants, projects, etc.)

## ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ AL-P-O ЦЕОЛИТОВ INVESTIGATION OF PROPERTIES OF AL-NA ZEOLITES

<sup>1</sup>А.Ю. Бузимов, С.Н. Кульков, <sup>2</sup>В. Ескл

<sup>1</sup>A.Yu. Buzimov, S.N. Kulkov, <sup>2</sup>W. Eckl

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

National Research Tomsk State University

<sup>2</sup>Fraunhofer Institute for Chemical Technology ICT, Germany

buzimov92@gmail.com

Известно, что керамические материалы из-за их уникальных свойств являются объектами для интенсивных исследований. Возможность синтеза сложных оксидов, таких как «искусственные цеолиты», является перспективой для применений в медицине, химии, биологии и материаловедении. Особенно важное значение имеет удельная поверхность, которая определяет свойства цеолитов и её изменение при воздействии различных факторов: температура отжига, время нахождения в естественных условиях, механическая активация с целью получения новых видов цеолитов с заданными физико-химическими свойствами.

В работе изучены цеолиты промышленных марок SAPO-34 и SCT.

Для определения удельной поверхности цеолитов был использован метод низкотемпературной адсорбции азота. По экспериментальным данным построены изотермы адсорбции для исходных цеолитов, которые варьируются в пределах от 500–700 м<sup>2</sup>/г.

Результаты рентгеноспектрального анализа показали, что порошок цеолита в исходном состоянии, состоит из Al, O, Si, P для SAPO-34; из Al, O, Si, P, Ti, для SCT. Частицы порошков цеолитов имеют форму приблизительно одинаковую, близкую к кубической. Частицы SCT имеют размер от 5 до 15 мкм, SAPO-34 от 5 до 20 мкм.

Расшифровка рентгенограмм показала, что структура цеолита SCT соответствует структуре Aluminum Hydrogen Phosphate (номер карточки

ASTM 41-23) и структура цеолита SAPO-34 соответствует структуре Aluminum Silicate Phosphate (номер карточки ASTM 41-570).

В цеолитах присутствует аморфная фаза, содержание которой с изменением температуры отжига в интервале до 1000°C не изменяется.

Для SCT экспериментально установлено, что количество аморфной фазы уменьшается с увеличением удельной поверхности. Для SAPO-34 установлено, что с увеличением количества аморфной фазы удельная поверхность является постоянной.

Показано, что не существует изменение кристаллической структуры до 1000 °С, а количество аморфной фазы и удельной поверхности зависит от температуры. Это означает, что можно получить необходимую удельную поверхность путем изменения температуры отжига, которая предусматривает количество аморфной фазы в системе.

Изучена кинетика изменения удельной поверхности порошков цеолитов после отжига при температуре 300 °С с изотермической выдержкой 1 ч. Методом БЭТ определена удельная поверхность порошков при выдержке в нормальных условиях в течение 1000 часов.

Отжиг порошков показал, что происходит уменьшение удельной поверхности (для SAPO-34 с 634 до 508 м<sup>2</sup>/г, для SCT с 692 до 517м<sup>2</sup>/г), в течение первых 100 часов, а затем она практически не изменяется.

Количество аморфной фазы при выдержке до 1000 часов при комнатной температуре возрастает от 83 до 90%.

Количество аморфной фазы коррелирует с изменением удельной поверхности: удельная поверхность уменьшается с ростом содержания аморфной фазы.

Показано, что после отжига при температуре 300 °С удельная поверхность цеолитов имеет максимальное значение, затем в течение первых 100 ч выдержки происходит резкое уменьшение удельной поверхности, а далее она практически не изменяется.

**ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТЬ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ  
СВОЙСТВ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ ZR-NB  
В УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОМ СОСТОЯНИИ  
THERMAL STABILITY OF STRUCTURE AND MECHANICAL  
PROPERTIES OF THE ZR-NB ALLOYS IN ULTRAFINE-GRAINED  
STATE**

**Д.Ю. Булышко  
D.Yu. Bulynko**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University

Как известно, сплавы циркония нашли широкое применение в современных атомных реакторах на тепловых нейтронах в качестве конструкционного материала, главным образом, ввиду малой доли



«паразитного» поглощения нейтронов в активной зоне реактора. При этом сплавы циркония в обычном состоянии не отличаются высокой прочностью, из-за чего их применение в качестве конструкционных материалов в атомных реакторах нового поколения ограничено. Существенно повысить прочностные характеристики циркониевых сплавов можно путем формирования в них ультрамелкозернистого состояния. Однако, как известно, эксплуатационные температуры в ядерных реакторах достигают 400 °С. Такие температуры могут инициировать в ультрамелкозернистых сплавах циркония, полученных методами интенсивной пластической деформации (ИПД), деградацию структуры и, как следствие, изменение структурно чувствительных свойств. Таким образом, становится необходимым изучение термостабильности ультрамелкозернистой структуры циркониевых сплавов.

В данной работе для исследования использовался сплав Zr-1Nb (марка Э110). Ультрамелкозернистая структура в сплаве была получена посредством 4 циклов прессования со сменой оси деформации и постепенным понижением температуры прессования от 973 до 573 К. Данные электронно-микроскопических исследований структуры сплава Zr-1Nb после ИПД показали наличие большеугловых разориентировок между элементами структуры и присутствие упругих напряжений в отдельных зернах. Средний размер элементов зеренно-субзеренной структуры, определенный по темнопольному изображению, составил  $0,25 \pm 0,1$  мкм.

Исследование термостабильности ультрамелкозернистой структуры сплава было проведено путем часовых и длительных отжигов в интервале температур 373–823 К. Электронно-микроскопические исследования микроструктуры сплава Zr-1Nb после часовых отжигов в интервале температур 573–873 показали, что ультрамелкозернистая структура сплава стабильна до температуры 673 К. В структуре сплава после отжига при температуре 723 К появляются отдельные рекристаллизованные зерна размерами 1–2 мкм. Плотность таких зерен мала, поэтому средний размер зерен в сплавах, определенный по темнопольному изображению, увеличивается незначительно. Длительные, до 12 часов, отжиги при температуре 723 К также не приводят к существенному росту зерен. Электронно-микроскопические исследования показали увеличение размера элементов зеренно-субзеренной структуры до размеров, превышающих 1 мкм, лишь в отдельных участках образца, в большей части объема материала сохраняется ультрамелкозернистое состояние.

После отжига при температуре 773 К рост зерен наблюдается во всем объеме образцов. При этом средний размер зерен не превышает 1 мкм. Отжиг при температуре 873 К в течение 1 часа приводит к полной рекристаллизации структуры и росту зерен до 1–3 мкм. Исходя из полученных результатов, для изучения кинетики рекристаллизации структуры данного сплава была выбрана температура 753 К. При данной температуре были произведены отжиги в течение 3, 5 и 7 часов.

В результате 3-часового отжига произошел значительный рост отдельных элементов структуры. В то же время большинство элементов структуры имели размер менее 1 мкм. Средний размер элементов зеренно-субзеренной структуры сплава увеличился до 0,73 мкм. Дальнейшее увеличение времени отжига не привело к значительному увеличению среднего размера элементов структуры. Так, после 5-часового отжига средний размер элементов составлял 0,82 мкм, а после отжига в течение 7 часов 0,86 мкм соответственно. Судя по данным просвечивающей электронной микроскопии, с увеличением времени отжига происходил в основном рост ранее рекристаллизованных зерен, в результате чего структура сплава становилась все менее однородной, и наряду с субмикронными зернами в сплаве образовывались зерна размером в несколько микрон. Описанный выше характер эволюции структуры сплава Zr-1Nb в ходе отжига может быть объяснен выделением по границам зерен частиц второй фазы, которые закрепляют границы зерен и тем самым препятствуют однородному развитию процесса рекристаллизации.

Помимо изучения термостабильности структуры сплава Zr-1Nb в ходе отжига было проведено исследование механических свойств сплавов Zr-1Nb и Zr-2,5Nb при температуре 400°C, соответствующей температуре эксплуатации сплавов в активной зоне ядерного реактора. Как видно из графиков, при повышенных температурах ультрамелкозернистые сплавы Zr-1Nb и Zr-2,5Nb также обладают более высокими прочностными характеристиками по сравнению с мелкозернистыми сплавами (предел текучести возрастает примерно в 3 раза, а предел прочности почти в 2 раза). Также стоит отметить, что прочностные характеристики ультрамелкозернистого сплава Zr-1Nb несколько превышают прочностные характеристики сплава Zr-2,5Nb, однако деформация до разрушения в ультрамелкозернистом сплаве Zr-2,5Nb при температуре 400°C в 2 раза больше по сравнению со сплавом Zr-1Nb и практически равна деформации до разрушения в соответствующем мелкозернистом сплаве.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что ультрамелкозернистая структура сплава Zr-1Nb, полученная методом ИПД, стабильна до температуры 723 К. Процесс рекристаллизации происходит путем роста отдельных зерен, в результате чего структура сплава становится неоднородной.

**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ОКСИДА МАГНИЯ  
В КОМПОЗИТЕ СО СТАБИЛИЗИРОВАННЫМ ОКСИДОМ  
МАГНИЯ ДИОКСИДОМ ЦИРКОНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ  
СПЕКАНИЯ И СТРУКТУРУ МАТЕРИАЛА**  
**STUDY OF THE INFLUENCE OF MAGNESIA CONCENTRATION ON  
SINTERING PARAMETERS AND STRUCTURE OF THE IN  
MAGNESIA-STABILIZED ZIRCONIA COMPOSITE**

**А.С. Буюков, С.Н. Кульков**

**A.S. Buykov, S.N. Kulkov**

Национальный исследовательский Томский государственный университет

National Research Tomsk State University

Alesbuyakov@gmail.com

Керамика на основе оксидов металлов играет особую роль в медицине в качестве остеозамещающего материала, поскольку она наиболее близка к неорганической составляющей костной ткани с точки зрения биохимической совместимости по типу химической связи. С точки зрения остеоимплантологии интерес представляет композит, на основе стабилизированного оксидом магния диоксида циркония, который входит в реестр ISO, как материал, пригодный для изготовления остеоимплантов [1], и оксида магния, который является биологически-активным материалом. На данный момент нет исследований, показывающих, какие изменения претерпевает структурно-фазовое состояние композита  $ZrO_2(MgO)-MgO$  в при концентрациях от чистого  $ZrO_2(MgO)$  до чистого  $MgO$ , при спекании в широком диапазоне температур.

Целью проводимых исследований является изучение влияния концентрации оксида магния в композите со стабилизированным оксидом магния диоксидом циркония на параметры спекания и структуру материала. Порошки  $ZrO_2(MgO)$  и  $MgO$  были получены аналогично исследованным в [2–4]. Порошки смешивались механически с различным содержанием  $MgO$  от 0 до 100 % с последующим прессованием и спеканием при температурах от 1200 °C до 1650 °C с выдержкой в течение часа.

Определены объемная усадка, пористость, плотность и фазовый состав образцов. Плотность и объем порового пространства образцов изучены методом гидростатического взвешивания, теоретическая плотность определялась по правилу смеси с учетом объемной доли фаз  $ZrO_2(MgO)$  и  $MgO$ . Для размера кристаллитов и микродисторсии кубической кристаллической решетки исследуемой керамики был проведен рентгеноструктурный анализ.

Объемная усадка имеет максимальное значение порядка 75 % в образцах, спеченных при температуре 1650 °C с содержанием  $MgO$  1–5 %. Со снижением температуры величина усадки резко уменьшается и имеет явную зависимость от количества  $MgO$ . Так, в образцах, спеченных при температуре 1200 °C без  $MgO$ , усадка составляет порядка 55 %, но с

ростом концентрации MgO величина усадки заметно уменьшается, достигая минимума 35 %.

Наименьшую пористость, и соответственно наибольшую плотность, имеют образцы, спеченные при максимальной температуре в исследуемом диапазоне – 1650 °С. В этом случае объем порового пространства составляет всего 6 % в образцах с 75 % MgO. При снижении температуры спекания объем порового пространства увеличивается без явной зависимости от количества дополнительного MgO и достигает своего максимума 55 % при содержании MgO 50 % в образцах, спеченных при температуре 1200 °С.

Изменения в структурно-фазовом состоянии изучены рентгеноструктурным анализом. Области когерентного рассеяния (ОКР) моноклинной фазы растут, с увеличением содержания в композите оксида магния, причем с ростом содержания MgO значения ОКР выходят в насыщение. Зависимость размера кристаллитов кубической фазы от содержания MgO можно разделить на три участка, на первом, и третьем, из которых, ОКР практически неизменны, в то время как на втором, при концентрации MgO от 10 до 30 %, видно резкое возрастание в соответствии с диаграммой состояния ZrO<sub>2</sub>-MgO.

Микроискажения кубической решетки растут, с увеличением температуры спекания. Однако если после спекания при температуре 1400 °С величина микроискажений практически не изменяется, то после спекания при температурах 1500 °С и 1650°С они растут для малых концентраций MgO, а при достижении концентрации MgO 5% они резко уменьшаются, до значений ниже, чем при более низких температурах спекания. Это свидетельствует о том, что искажения решетки с ростом температуры спекания релаксируют и решетка становится бездефектной.

### *Литература*

1. Litvinova L., Shupletsova V., Leitsin V., Vasylye R., Zubov D., Buyakov A., Kulkov S. Porosity and biocompatibility study of ZrO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based ceramic implants // AIP Conference Proceedings 2014.
2. Кульков С.Н., Буякова С.П. Фазовый состав и особенности формирования структуры в нанокристаллическом ZrO<sub>2</sub> // Российские нанотехнологии. 2007. № 1–2. С. 119–132.
3. Буякова С.П. Свойства, структура, фазовый состав и закономерности формирования пористых наносистем на основе ZrO<sub>2</sub>: дис. д-ра техн. наук. Томск, 2008. 280 с.
4. Buyakova S.P., Kalatur E.S., Buyakov A.S., Kulkov S.S. S.N. Structure and properties of ZrO<sub>2</sub>–MgO powders // Journal OF Silicate Based and Composite Materials. 2014/8. P. 8–12

**ОПТИМИЗАЦИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
МАТЕРИАЛА И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГОЛОВНОЙ  
ЧАСТИ УДАРНИКА ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПРЕГРАДОЙ  
OPTIMIZATION OF PHYSIC-MECHANICAL PROPERTIES OF  
MATERIAL AND GEOMETRICAL PARAMETERS OF HEAD PART  
OF THE DRUMMER FOR HIGH-SPEED INTERACTION WITH A  
METAL BARRIER**

**О.В. Довгаль, В.С. Фадеев, Ю.Л. Чигрин**

**O.V. Dovgal, V.S. Fadeev, Y.L. Chigrin**

ООО «ТехКомплект»

LLC "Tekhcomplex"

techkomplekt.kms@gmail.com

Главными задачами, решаемыми при создании эффективного высокоскоростного ударника, являются: пробитие преграды, сохранение достаточной запреградной скорости при минимальном разрушении ударника. Решение поставленных задач требует создания материала для изготовления ударника, одновременно обладающего совокупностью свойств, часто взаимоисключающих: высокой твердостью и прочностью при сохранении высокой ударной вязкостью разрушения, повышенной плотностью материала при технологии изготовления, соответствующей изделиям массового производства. Такие требования обусловлены условиями взаимодействия высокоскоростного ударника с металлическими преградами: в начальный момент внедрения ударника материал, находясь в холодном состоянии, подвергается высоким ударным нагрузкам, должен обладать высоким сопротивлением хрупкому разрушению, высокой ударной вязкостью, а в дальнейшем, по мере проникновения ударника в преграду и разогреве материала ударника до высоких температур, должен обладать высоким сопротивлением пластической деформации.

К числу геометрических параметров ударника, определяющих эффективность пробития при высокоскоростном взаимодействии ударника и преграды относятся: длина, диаметр и конфигурация головной части. С целью реализации различных, по энергозатратам, механизмов разрушения преграды при пробитии, в работе исследовались ударники с различной геометрией головной части: в виде конуса с заострением, усеченного конуса с различными диаметрами меньшего конуса, а также в виде конуса, сочетающего коническую и оживальную части.

Оптимизация конструкции ударника проводилась по параметру пробития стальной преграды при сохранении ударником целостности хвостовой и головной части, при наличии достаточной запреградной

скорости ударника или крупных фрагментов, обладающих поражающей способностью.

За основу материала был принят твердый сплав на основе карбида вольфрама и кобальта. Оптимизация свойств сплава проводилась по микроструктуре: количеству зёрен основной фракции карбида вольфрама с размером 1–2 мкм, максимально допустимому наличию количества отдельных крупных зерен карбида вольфрама с размером зерен более 4-кратного превышения среднего размера зерна, содержанию кобальта [1].

Сплав, содержащий по количеству не менее 60% зёрен основной фракции карбида вольфрама с размером 1–2 мкм, максимально противостоит ударным нагрузкам, имеющий минимальное количество отдельных крупных зерен карбида вольфрама сохраняет стабильные свойства материала. Высокая пластичность сплава в сочетании высоким сопротивлением хрупкому разрушению и высокой ударной вязкостью получены при содержании кобальта в сплаве от 6 до 9 % масс.

В результате проведенных исследований предложен ударник, выполненный из твердого сплава с высокими значениями физико-механических свойств, имеющий форму тела вращения в виде соединенных между собой головной части в виде конуса и хвостовой части в виде цилиндра; головная часть выполнена остроконечной, имеющей скругление острия конуса до 0,33 мм. Головная часть или вся поверхность ударника должны иметь шероховатость не хуже Ra 1,6.

Экспериментально установлено, что в месте контакта ударника с металлической преградой появляются области с сильно локализованной пластической деформацией, называемые плоскостями адиабатического сдвига (ПАС). Образование ПАС в процессе деформирования металла приводит к локализации нагрева преграды в месте контакта и ее катастрофическому разрушению плавлением [2]. Такой механизм механизма пробития позволяет ударнику избежать хрупкого разрушения, сохранить свою форму и высокое запреградное поражающее действие.

### *Литература*

1. Попов Л.Е., Кобытев В.С., Ковалевская Т.А. Пластическая деформация сплавов. М.: Металлургия, 1984. 182 с.
2. Зельдович Я.Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 686 с.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ  
ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО НЕМУ  
АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ  
DETERMINATION OF THE MINIMUM LOAD-BEARING CAPACITY  
OF THE ICE COVER ON IT WHEN DRIVING VEHICLES**

**В.Л. Земляк, Н.О. Баурин, В.А. Королев, А.П. Пекарь, А.А. Анциферов  
V.L. Zemlyak, N.O. Baurin, V.V. Korolev, A.P. Pekar', A.A. Antsiferov**

Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема, г. Биробиджан.  
Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan  
vellkom@list.ru

В обширных районах Сибири, Крайнего Севера и Дальнего Востока сообщение с населенными пунктами часто затруднено и в зимний период осуществляется с помощью автомобильных перевозок по ледяному покрову рек. Для этого сооружаются зимники и ледовые переправы срок эксплуатации, который обычно составляет 3–4 месяца, так как ледовая переправа вводится в строй после достижения льдом толщины порядка 1 метра.

Целью работы является экспериментальное исследование минимальной несущей способности ледовых переправ при движении по ним автотранспортных средств.

Известно, что движение нагрузки по льду приводит к генерированию системы прогрессивных изгибно-гравитационных волн (ИГВ), при определенной интенсивности которых может произойти частичное либо полное разрушения льда [1].

Экспериментальные исследования определения минимальной несущей способности ледяного покрова проводились в лаборатории “Ледотехники” ПГУ им. Шолом-Алейхема в опытовом ледовом бассейне [2].

Масштаб моделирования  $\lambda_1=1-23$  выбирался с учетом минимальной толщины льда намораживаемой в чаше бассейна, которая составила 3 мм или 0.35 м после пересчета на натуру. Масса моделей варьировалась от 1.45 до 3.17 кг, а скорость перемещения от 1.2 до 2.2 м/с, что после пересчета на натуру равнялось от 17.5 до 38.5 т и от 20 до 38 км/ч соответственно. Эти диапазоны соответствуют массе и скорости перемещения груженого автомобиля КамАЗ различных марок.

Для оценки ледоразрушающей способности генерируемых нагрузкой изгибно-гравитационных волн введем критерий ледоразрушения  $\alpha$ , который показывает отношение прогиба ИГВ к ее длине, т.е. характеризует кривизну генерируемых волн. Ранее экспериментально установлено, что если  $\alpha$  превышает 0.04, то происходит полное разрушение льда [1].

Эксперименты показали, что ледяной покров толщиной не менее 0.35 м способен выдержать движущуюся нагрузку массой до 27.5 тонн. Дальнейшее увеличение массы нагрузки приводит к резкому увеличению ледоразрушающей способности ИГВ особенно при достижении резонансной скорости движения равной 8.15 м/с (30 км/ч)

Работа выполнена в рамках проекта №487 задания на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания вузу №2014/422.

### *Литература*

1. Козин В.М., Онищук А.В., Марьин Б.Н. Ледоразрушающая способность изгибно-гравитационных волн от движения объектов. Владивосток: Дальнаука. 2005. 191 с.
2. Земляк В.Л., Курбацкий Д.А., Баурин Н.О. Лаборатория “Ледотехники” // Вестн. Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2013. Т. 12. № 1. С. 75-84.

## **ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ПОДВОДНОГО СУДНА ПРИ ПОДЛЕДНОМ ДВИЖЕНИИ НА ПАРАМЕТРЫ ГЕНЕРИРУЕМЫХ ВОЛН INFLUENCE OF PECULIARITIES OF THE FORM OF A SUBMARINE VESSEL ON THE PARAMETERS OF GENERATED WAVES IN THE ICE MOTION**

**В.Л. Земляк, Н.О. Баурин, Г.В. Петросян, С.В. Николаев  
V.L. Zemlyak, N.O. Baurin, G.V. Petrosyan, S.V. Nikolaev**

Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема, г. Биробиджан.  
Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan  
vellkom@list.ru

При решении задачи движения подводного судна вблизи нижней поверхности ледяного покрова корпус субмарины, имеющий сложную геометрию, обычно заменяют на тело вращения, упрощенной формы при сохранении основных характеристик (относительного удлинения и водоизмещения) [1, 2]. В свою очередь, наличие выступающих частей, а также форма поперечного сечения корпуса может оказывать существенное влияние на параметры генерируемых изгибно-гравитационных волн от движения субмарины.

В работе выполнено экспериментальное исследование влияния формы обводов, формы поперечного сечения подводного судна и наличия выступающих частей на прогиб и длину генерируемых изгибно-гравитационных волн.

Эксперименты проводились в опытовом ледовом бассейне лаборатории “Ледотехники” Приамурского государственного университета имени Шолом-Алейхема (г. Биробиджан) [3]. Модель ледяного покрова



приготавливалась путем намораживания льда заданной толщины 3 мм естественным холодом. Для проведения экспериментов были изготовлены девять моделей субмарин в масштабе  $\lambda_l = 1-100$ . Три модели существующих судов (пр. 971, пр. 667БДРМ, пр. 949А), три модели каплевидной формы, носовая часть которых имела полные обводы эллипсовидной, а кормовая заостренной вытянутой формы, три модели в виде эллипсоидов вращения, имеющие одинаковое водоизмещение и отношение  $L/V$  (где  $L$  – длина модели,  $V$  – ширина). Для проведения опытов была спроектирована и изготовлена необходимая оснастка и сформирован измерительный комплекс для регистрации колебаний модельного льда. В процессе буксировки модели определялась скорость ее движения, и записывались профили взволнованной поверхности льда. Масштаб моделирования составил 1-100. В ходе экспериментов были установлены зависимости параметров изгибно-гравитационных волн от рассматриваемых характеристик моделей. Определена целесообразность использования упрощенных моделей вместо реальных судов сложной геометрии при выполнении теоретических расчетов.

Работа выполнена в рамках проекта №487 задания на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания вузу №2014/422.

#### *Литература*

1. Погорелова А.В., Козин В.М., Земляк В.Л. Движение тонкого тела в жидкости под плавающей пластиной // Прикладная механика и техническая физика. 2012. Т. 53. №1. С. 32–44.

2. Козин В.М., Чижиумов С.Д., Земляк В.Л. Исследования влияния ледовых условий на эффективность резонансного метода разрушения ледяного покрова, реализуемого подводными судами // Прикладная механика и техническая физика 2010. Т. 51. №3. С. 118–125.

3. Земляк В.Л., Курбацкий Д.А., Баурин Н.О. Лаборатория Ледотехники” // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2013. Т. 12. №1. С. 75–84.

### **ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДЕФОРМАЦИИ В ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ LOCALIZATION OF PLASTIC DEFORMATION IN THE TITANIUM ALLOYS**

**Н.А. Ионова, С.А. Баранникова, А.Г. Лунев, М.В. Надежкин**

**N.A. Ionova, S.A. Barannikova, A.G. Lunev, M.V. Nadezhkin**

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

Institute of strength physics and materials science RAS

ionova\_tsu@mail.ru, mvn@ispms.ru, bsa@ispms.ru, agl@ispms.ru

В настоящее время титановые сплавы рассматриваются как наиболее перспективные конструкционные материалы для медицины, авиа-

космической и химической техники вследствие их низкой плотности, хорошей биосовместимости и высокой коррозионной стойкости.

В то же время следует отметить, что экспериментальные исследования механических свойств на участке пластичности деформирования металлов и сплавов доказали существование макроскопической локализации деформации на всех стадиях пластического течения, начиная от предела текучести и вплоть до разрушения, причем каждая из стадий характеризуется вполне определенной картиной распределения очагов [1]. Однако экспериментальные исследования закономерностей локализации деформации пластического течения поликристаллических титановых сплавов при растяжении отсутствуют. В настоящей работе исследования проводились на технически чистом титане ВТ1-0 и сплаве ВТ6. Образцы для исследований были изготовлены в форме двухсторонней лопатки с размерами рабочей части 40x10x2 мм. Средний размер зерен, выявляемый методом оптической металлографии, составляет 8 мкм для образцов сплава ВТ6 и 12,5 мкм для ВТ 1-0.

Деформирование растяжением производилось при комнатной температуре на испытательной машине LFM-125 при постоянной скорости движения подвижного захвата  $V_{mash} = 3.33 \cdot 10^{-6}$  м/с. Одновременно с записью диаграмм растяжения для исследований макроскопической локализации пластического течения использовалась методика двухэкспозиционной спекл-фотографии [1], сочетающая в себе возможности наблюдения всей рабочей поверхности деформируемого образца (характерный размер поля зрения  $\sim 100 \times 100$  мм) с разрешающей способностью на уровне оптического микроскопа ( $\sim 1$  мкм). Результатом обработки спекл-изображений являлись продольная, сдвиговая и поворотная компоненты тензора деформации. А также метод цифровых спекл-изображений [2]. При помощи автоматизированного комплекса ALMEC-tv в режиме *in situ* регистрировались картины локализации деформации на рабочей поверхности исследуемых образцов. Для определения кинетики процесса эволюции картин макролокализации использовались зависимости положений локальных очагов в образце  $X$  от деформации или времени (для режима активного нагружения  $\varepsilon \sim t$ ).

В результате анализа распределений локальных деформаций было установлено существование стационарных очагов локализации деформации на параболической (Тейлора) стадии пластического течения. Установлено, что характер распределения локальных деформаций также зависит от стадии деформационного упрочнения, как и для ранее исследованных металлических материалов и сплавов. Пространственный период распределений локальных деформаций для исследованных материалов при этом составляет  $\lambda = 5-10$  мм. На стадии предразрушения количество зон локализованной деформации по мере нагружения образца изменяется. И на заключительной стадии формируется один

высокоамплитудный очаг, который затем развивается в шейку. Однако формирование места разрушения по длине образца можно предсказать за несколько процентов до образования шейки, если производить процедуру суммирования компонент локальных удлинений  $\varepsilon_{xx}$  в неподвижных зонах макроскопической деформации на параболической стадии.

Таким образом, использование метода двухэкспозиционной спекл-фотографии для исследования процесса локализации пластического течения в сплавах титана ВТ1-0 и ВТ6 позволило достаточно полно описать эволюцию картин локализации деформации на разных стадиях всего процесса деформирования. Анализ полученных результатов дает возможность установить важные закономерности характера макроскопической локализации пластической деформации.

### *Литература*

1. Зуев Л.Б. Физика макролокализации пластического течения / Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А. Новосибирск: Наука, 2008. 327 с.
2. Zuev L.B., Gorbatenko V.V., Pavlichev K.V. Elaboration of speckle photography techniques for plastic flow analyses // Measur. Sci. Technol. 2010. Vol. 21, n 5. P. 054014–054019.

## **ИЗУЧЕНИЕ ПОРИСТОСТИ, УСАДКИ И ИСПЫТАНИЕ КОМПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЫ $Al_2O_3$ - $MgO$ НА ТЕРМОУДАР STUDY POROSITY, SHRINKAGE AND TESTING COMPOSITE $Al_2O_3$ - $MgO$ SYSTEM ON THERMAL SHOCK**

<sup>1</sup>Ю.Л. Кретов, <sup>2</sup>С.П. Буякова

<sup>1</sup>Yu. L. Kretov, <sup>2</sup>S.P. Buykova

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

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

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University

<sup>2</sup>Institute of strength physics and materials science RAS

kretov2005@yandex.ru, sbuyakova@ispms.tsc.ru

Основные направления научных исследований в области керамики предусматривают расширение и углубление исследований новых, в первую очередь высокоплотных, мелкокристаллических и прочных керамических материалов, а также материалов со специфическими свойствами. Большой интерес для современной высокотемпературной керамики представляют материалы на основе синтезированных смесей высокоогнеупорных оксидов в двойных и тройных системах, кривые ликвидуса которых лежат в области весьма высоких температур [1].

В работе представлены оригинальные данные, полученные при разработке технической керамики на основе  $Al_2O_3$  с добавлением  $MgO$ . Были изготовлены образцы в форме цилиндров:  $h=20$ мм,  $d=13$ мм. Образцы были получены после механической активации оксида алюминия. Полученные прессовки спекались в широком интервале температур: 1450,

1500, 1550, 1600 и 1650°C, давление при прессовании составляло 13 кН. После спекания измерялись масса и размеры каждого образца, на основании полученных измерений рассчитывали пористость и усадку каждого из полученных образцов.

С увеличением содержания оксида магния в экспериментальных образцах, наблюдалось увеличение усадки, так на образцах, полученных из чистого MgO, усадка составила примерно 30%. Также была исследована зависимость пористости образцов от содержания оксида магния, при его содержании в 20% и при  $T_{сп}=1550^{\circ}\text{C}$ , была обнаружена максимальная пористость, которая составила 50%. При достаточно большом содержании оксида магния, пористость образцов близка к 10%. Исходя из полученных данных, можно утверждать о том, что при малой концентрации оксида магния в композиционной системе ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mg}$ ), наблюдается увеличение пористости полученных образцов.

Для изучения термических свойств керамики на основе  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  проводилась закалка с 200°C до 1000°C с интервалом в 100°C. Образцы были нагреты до заданных температур и быстро охлаждены погружением в холодную воду. После детального изучения структуры поверхностного слоя образцов, было установлено, что после температуры закалки 800°C, на образцах с содержанием MgO равным 30% и менее, появились трещины, а на образцах с содержанием MgO от 100 до 50% включительно, образования трещин так и не произошло. После трехкратной закалки при температуре 1000°C разрушились 9 из 10 образцов, целым остался только один образец, содержащий 50% –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 50% – MgO, данный образец выдержал 36 заливок на 1000°C и не разрушился.

Данную устойчивость образцов можно объяснить тем, что они являются пористыми, в результате чего происходит диссипация напряжений, образовавшихся во время термического удара.

При содержании оксида магния от нуля до 20%, происходит резкое увеличение пористости образцов, ее максимальное значение достигает 40% при содержании данного оксида 20%. При увеличении концентрации MgO до 90%, происходит равномерное уменьшение пористости полученных образцов. На приведенном графике видно, что при большом содержании оксида магния, пористость образцов близка к 8%, то есть полученные образцы получаются очень плотными.

Данное направление является перспективным и значимым для современной науки и техники, так как использование данного керамического материала в термонагруженных элементах конструкций существенно увеличивает срок их эксплуатации.

### *Литература*

1. Buyakova S.P., Promakhov V.V. and Kulkov S.N. Thermal tests and their effect on micro- and macrostructure of nanocrystalline  $\text{ZrO}_2$ , Powder Metall. Met. Ceram., 2012, vol. 51, no. 5–6. P. 267–272.

**ПОРИСТАЯ КЕРАМИКА, ПОЛУЧЕННАЯ ИЗ ОКСИДА  
И ГИДРОКСИДА АЛЮМИНИЯ  
POROUS CERAMIC OBTAINED FROM ALUMINUM  
OXIDE AND GIDRODIKSID**

**Р. Левков, И.А. Жуков, С.П. Буякова, С.Н. Кульков**

**R. Levkov, I.A. Gukov, S.P. Buykova, S.N. Kulkov**

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

Institute of strength physics and materials science RAS

Национальный исследовательский Томский государственный университет

National Research Tomsk State University

sbuyakova@ispms.tsc.ru

Среди многообразия современных материалов керамика занимает особое место благодаря ее физическим и химическим свойствам. Высокая коррозионная стойкость, термостойкость, стойкость к радиационным воздействиям, биологическая совместимость обеспечивают керамике приоритетное положение по сравнению с металлами и полимерами при изготовлении таких изделий как биоимпланты, носители катализаторов, фильтры [1–5]. Наибольшей способностью сохранять структуру и свойства в условиях воздействия агрессивных сред без деградации свойств, коррозионной и химической стойкостью, высокими значениями прочности отвечают материалы из оксида алюминия. Керамика на основе оксида алюминия с заданной пористостью, размером и формой пор должным образом соответствуют требованиям, предъявляемым к носителям катализаторов, фильтрам и биоимплантам. На сегодняшний день известно множество технологических подходов, обеспечивающих необходимый объем порового пространства в керамике. Наиболее распространенный и предпочтительный, с точки зрения регулирования пористости является метод, основанный на использовании органических порообразующих добавок. Такой метод имеет ряд преимуществ, в первую очередь, это доступность и простота управления пористостью. Однако существует недостаток – это присутствие в полученном пористом материале продуктов горения порообразователя – углерода и его соединений. Это является недопустимым для материалов медицинского назначения и некоторых носителей катализаторов. Избежать присутствия посторонних примесей позволяет метод, основанный на использовании гидроксидов. Например, структурная перестройка гидроксида алюминия в широком интервале температур неизбежно приводит к появлению пористости [6, 7]. Хотя метод, основанный на использовании гидроксидов известен давно, в литературе встречается малое количество работ посвященных пористым керамикам полученным таким способом. Все вышеизложенное определило цель работы: изучение влияния структуры и свойств порошков

гидроксидов и оксидов алюминия на структуру и свойства получаемых корундовых керамик.

Для получения пористой керамики использовались порошки гидроксидов алюминия структурной модификации гиббсит, гидратированный оксид алюминия, полученный разложением алюминатного раствора и порошки оксидов алюминия, один из которых был получен плазмохимическим методом, другой порошок оксида алюминия представлял собой технический глинозем марки Г00. Изменение объема порового пространства в керамике обеспечивалось варьированием количества гидроксида алюминия в смеси с порошками оксида алюминия. Объемная доля порообразователей составляла от 1 до 50 %. Порошки смешивались в барабанной мельнице в течение 24 часов. Полученные смеси засыпались в стальную пресс-форму и прессовались при давлении до 200 МПа. Спекание прессовок осуществлялось на воздухе при температурах 1300–1500 °С.

Установлено, что после спекания образцов при температуре 1300 °С в структуре керамики наблюдались зерна оксида алюминия формы близкой к сферической и неправильной формы. В образцах, спеченных при температуре 1400 и 1500 °С зерна оксида алюминия имели преимущественно сферическую форму. Для всех образцов, независимо от температуры спекания, характерно присутствие межчастичной пористости. Выявлено, что при увеличении температуры спекания уменьшается общая доля межчастичных пор, одновременно с этим уменьшается и пористость полученных материалов. Общая пористость образцов керамик спеченных при 1300 °С составляла 60 %, а для образцов, спеченных при температуре 1500 °С, пористость не превышала 20 %. В керамиках, полученных при температуре 1400 °С, пористость составляла около 45 %.

Исследования механических свойств полученных образцов керамик показали, что при увеличении температуры спекания происходит значительное увеличение прочности на сжатие с 6 МПа при 1300 °С до 800 МПа при 1500 °С соответственно.

#### *Литература*

1. Третьяков Ю.Д. Керамика в прошлом, настоящем и будущем // Соросовский образовательный журнал. №6. 1998. С. 53–59.
2. Матренин С.В., Слосман А.И. Техническая керамика: учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2004. 75 с.
3. Шевченко В.Я., Баринов С.М. Техническая керамика. М.: Наука, 1993. 112 с.
4. Лукин Е.С., Макаров Н.А., Козлов А.И. и др. Современная оксидная керамика и области ее применения // Конструкционные материалы. 2007. С. 4–13.
5. Лукин Е.С. Современная высокоплотная оксидная керамика с регулируемой микроструктурой. Ч. IV: Технологические методы получения высокодисперсных порошков для многокомпонентной керамики // Огнеупоры и техническая керамика. 1986. № 9. С. 2–10.

6. Козлова А.В., Жуков И.А., Буякова С.П. и др. Структура и свойства оксид-гидроксидных материалов  $ZrO_2-Al_2O_3$  // Изв. вузов. Физика. 2010. № 12/2. С. 172–176.
7. Буякова С.П., Жуков И.А., Козлова А.В. и др. Структура и свойства пористой керамики  $ZrO_2-Al_2O_3$  // Изв. вузов. Физика. 2011. Т. 54. № 9/2. С. 120–124
8. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1970. 376 с.

## ВОДОРОДНОЕ ОХРУПЧИВАНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ HYDROGEN EMBRITTLEMENT OF ALUMINUM ALLOYS

Ю.В. Ли<sup>2</sup>, А.В. Бочкарёва<sup>1</sup>, С.А. Баранникова<sup>1,2</sup>

A.V. Bochkaryova<sup>1</sup>, Yu.V Li., S.A. Barannikova

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

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет

<sup>1</sup>Institute of strength physics and materials science RAS

<sup>2</sup>National Research Tomsk State University

<sup>1</sup>avb@ispms.tsc.ru; <sup>2</sup>jul2207@mail.ru; <sup>3</sup>bsa@ispms.tsc.ru

Повышение надежности и увеличение сроков эксплуатации изделий из металлов и сплавов находится в прямой зависимости от содержания вредных примесей. Одной из них является водород, который попадает в металл не только на всех этапах технологической цепи изготовления, но и в процессе дальнейшей эксплуатации изделий, значительно снижая их технологические и служебные свойства. Несмотря на многолетнюю историю изучения влияния водорода единая точка зрения о механизмах его влияния на разрушение металлов не сформировалась. Это связано с влиянием целого комплекса взаимосвязанных факторов – структуры, фазового состава, типа кристаллической решетки, температуры испытаний и т.д. В данной работе исследовано деформационное поведение и разрушение предварительно насыщенных водородом образцов термически упрочняемого алюминиевого сплава Д1: 3,5% Cu, 0,5% Mn, 0,2% Mg, (Si, Fe, Zn, Ti) < 0.35%, остальное Al.

После штампования из горячекатаного листа толщиной 2 мм плоские образцы в форме двойной лопатки (поперечное сечение рабочей части 6×2 мм) были подвергнуты отжигу при  $T=340^{\circ}C$  в течение 1 часа с последующим охлаждением в печи для снятия остаточных напряжений после штампования. Размер зерна в таком сплаве составляет ~30 мкм, а интерметаллидные частицы имеют субмикронный размер и находятся на стадии предвыделения. Механические испытания по схеме одноосного растяжения проводились при комнатной температуре со скоростью  $6,67 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  на испытательной машине «Walter+Bai». Для проведения исследований влияния процесса водородного охрупчивания на механические характеристики сплава Д1, изготовленные образцы предварительно помещали в трехэлектродную электрохимическую ячейку в 1N раствор серной кислоты с добавлением тиомочевины в концентрации

20 мг/л в качестве катализатора процесса в течение 82, 100 и 120 часов. На поверхности образца поддерживался постоянный потенциал  $U_{\text{const}} = -430$  мВ [1]. Микрофрактографические исследования проводили на приборе LEO EVO 50 (Zeiss, Германия) в ЦКП «НАНОТЕХ» ИФПМ СО РАН.

В результате проведенных исследований установлено, что процесс электролитического наводороживания влияет на механические характеристики сплава Д1: предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , предел прочности  $\sigma_B$  и относительное удлинение до разрыва  $\delta$ . Для образцов, подвергнутых насыщению водородом в течение 120 часов, указанные выше механические характеристики уменьшились на 30, 20 и 55% соответственно.

Микрофрактографические исследования показали, что после наводороживания в течение 100 и 120 часов образцов Д1 в электрохимической ячейке, поверхность по периметру рабочей части становится неровной вблизи линии отрыва, в отличие от образцов в исходном состоянии. Вблизи линии отрыва возникают области, где формируется система параллельных друг другу и рабочей поверхности разрозненных пластин, состоящих из сплава Д1 (основной матрицы сплава) и глобулярных включений. Элементный анализ данных включений показал повышенное содержание Си, что может быть обусловлено наличием в сплаве Д1 интерметаллидных упрочняющих частиц  $\text{CuAl}_2$  и  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ . В случае одноосного растяжения такие области, состоящие из пластин, играют роль концентраторов напряжения, что вызывает формирование микротрещин, которые впоследствии образуют магистральную трещину, что в значительной степени меняет характер разрушения с хрупкого на вязкий. В исходном состоянии в центральной области рабочей части ямки разрушения имеют вытянутую форму в направлении среза, тогда как в насыщенных водородом образцах, ямки отрыва имеют правильную, преимущественно округлую форму, что подтверждает вязкий характер разрушения с раскрытием трещины.

Анализ экспериментальных данных показывает, что водород, образующийся в результате электрохимических реакций, участвует в процессе коррозионного растрескивания алюминиевого сплава Д1. При коррозионном растрескивании водородное охрупчивание имеет место наряду с разрушением по электрохимическому механизму, например, путем периодического разрушения пассивной пленки за счет локальной пластической деформации у границ зерен и преимущественного локального растворения в этих местах.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Государственной академии наук в 2013-2020 гг.



## *Литература*

1. Yagodzinsky Y., Todoshchenko O., Papula S., Hänninen H. Hydrogen Solubility and Diffusion in Austenitic Stainless Steels Studied with Thermal Desorption Spectroscopy // Steel Research International. 2011. Vol. 82. P. 20–25.

2. Lunarska E., Chernyaeva O. Effect of precipitates on hydrogen transport and hydrogen embrittlement of aluminum alloys // Materials Science. 2004. Vol. 40, №3. P. 399–407.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В УГЛЕПЛАСТИКАХ INVESTIGATION OF DAMAGES ACCUMULATION IN CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS**

**В.А. Микушина**

**V.A. Mikushina**

Национальный исследовательский Томский государственный университет

National Research Tomsk State University

mikushina\_93@mail.ru

В настоящее время композиционные материалы широко применяются во многих областях современного машиностроения и промышленности. Композиты характеризуются широким набором свойств. При использовании композитов в качестве конструкционных материалов наиболее важными являются такие их свойства, как прочность и жесткость. В связи с этим одной из актуальных проблем, композиционного материала является проблема прогнозирования прочности КМ [1]. Одним из перспективных направлений для решения этой задачи является развитие методов численного моделирования в материаловедении, в частности методов основанных на теории перколяции [2, 3]. В работе представлена возможность применения перколяционного подхода к оценке макроскопической прочности композита.

Целью работы является исследование конфигурации кластеров повреждений, образующихся в представительном объеме композита в процессе его нагружения. На основании анализа такой информации делается оценка условий макроскопического разрушения композита.

Рассмотрен однонаправленный волокнистый композит, в условиях статического одноосного нагружения поперек волокон. Вследствие такого способа нагружения, в материале реализуется плоско-деформированное состояние, что позволяет решать задачу анализа НДС и оценки прочности КМ в двумерной постановке.

Задача решалась с использованием метода конечных элементов для ряда значений объемных содержаний армирующих элементов. Результатом всей обработки являлась информация о конфигурации поля кластеров повреждений для каждого шага по нагрузке. На основании анализа данной

информации оценивались условия макроскопического разрушения композита, в качестве которых принималось образование соединительного кластера повреждений.

Результаты показывают, что процесс накопления повреждений в композитах с низким объемным содержанием включений начинается при больших значениях деформаций, развивается быстрее и заканчивается при меньших значениях деформаций, по сравнению с плотно наполненными композитами. Также можно отметить, что предельный объем кластера повреждений, варьируется от 30% (при  $C=7\%$ ) до 55% (при  $C=30\%$ ). Показано также, что в интервале объемных содержаний включений от 7 до 20% наблюдается рост предельной деформации исследуемых углепластиков, а при более больших объемных содержаниях волокон наблюдается стабилизация предельных значений локальной деформации.

#### *Литература*

1. *Победря Б.Е.* Механика композиционных материалов. М.: Изд-во МГУ, 1984. 336 с.
2. *Иудин И.Д., Косовцева Т.Р.* Применение теории перколяции для моделирования различных процессов в системе MATLAB // Науч. вестн. МГГУ. 2010. №2. С. 41–44
3. *Иванской В.А.* Подходы теории перколяции и свободная энергия кластеров дислокаций // Журнал технической физики. 2008. Т. 78. Вып. 4. С. 65–75.

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРКОЛЯЦИОННОГО КРИТЕРИЯ ПРОЧНОСТИ В ЗАДАЧАХ МЕХАНИКИ КОМПОЗИТОВ EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE PERCOLATION STRENGTH CRITERION IN PROBLEMS OF MECHANICS OF COMPOSITES**

**Ю.А. Рикун**

**Yu. A. Rikun**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University

Композиционные материалы (композиты) представляют собой материалы, которые создаются человеком искусственно, с учетом требований, предъявляемых к конечному результату [1]. Композиты применяются при изготовлении особо ответственных и дорогостоящих изделий, а именно, в авиационной и ракетно-космической технике, машиностроении и т.д. [2].

Одним из важнейших свойств композиционного материала является прочность. В настоящее время активно развивается подход к оценке прочности, основанный на методах кластерного анализа, включая решения задачи о перколяции [3]. При этом для исследования процесса накопления повреждений широко используются разнообразные методы компьютерного моделирования.

Другим подходом для аналитического описания влияния большого количества микрповреждений на напряженно-деформированное состояние является введение параметра повреждаемости, который не связан непосредственно с физической картиной действующих процессов [4].

Целью данной работы является сравнение двух критериев оценки прочности и выбор наиболее эффективного. Для достижения поставленной цели решались конкретные задачи:

1) Определение параметров напряженно-деформированного состояния модельных объемов композиционного материала;

2) Оценка прочности модельных объемов композитов с использованием перколяционного и параметрического критериев.

В данной работе задача решалась на мезоуровне. Моделировались специально сконструированные модели объемов композита, которые имитируют типичные случаи взаимного расположения волокон в малых объемах материала.

Задача решалась для случая статического нагружения и упругого поведения компонентов. Полагалось, что исследуемые объемы находятся в плоско-деформированном состоянии.

Для расчетов параметров напряженно-деформированного состояния был выбран метод конечных элементов. Для оценки прочности использовались два критерия. «Параметрический» – по величине удельного поврежденного объема компоненты (в качестве предельного принято значение 75 %). Перколяционный» – по наличию соединительного кластера.

Результаты показывают, что локальная прочность материала зависит как от взаимного расположения армирующих элементов, так и от их взаимного расположения по отношению к направлению нагружения. Можно полагать, что локальная прочность в каждом конкретном случае определяется конфигурацией полей растягивающих и сжимающих напряжений, которая обусловлена взаимным расположением концентраторов напряжений в рассматриваемой области. Перколяционный критерий характеризуется наибольшей чувствительностью к локальной неоднородности структуры армирования, поэтому является наиболее эффективным при оценке прочности.

### *Литература*

1. Сидоренко Ю.Н. *Материаловедение: конструкционные и функциональные волокнистые композиционные материалы* : учеб. пособ. Томск: [Б. И.], 2007. 139 с.

2. Овчинский А.С. *Процессы разрушения композиционных материалов: имитация микро и макро механизмов на ЭВМ*. М.: Наука, 1988. 278 с.

3. Алексеев Д.В., Казунина А.Г. *Кинетика кластеров элементарных повреждений в нагруженных материалах: моделирование вероятностным клеточным автоматом // ФТПРПИ. 2006. №1. С. 49–60.*

4. Грабовский А.П., Бондарец А. *Деформационные модели кинетики повреждаемости конструкционных материалов при упругопластическом деформировании // Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого. 2013. №1. С. 26–34.*

# ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ THE EFFECT OF ELECTRIC POTENTIAL ON MATERIAL MICROHARDNESS

О.С. Стаскевич<sup>1</sup>, Д.В. Орлова<sup>2</sup>, В.И. Данилов<sup>2</sup>  
O.S. Staskevich, D.V. Orlova, V.I. Danilov

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

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

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University

<sup>2</sup>Institute of strength physics and materials science RAS

Solessya92@inbox.ru

На данный момент установлено, что внешние энергетические воздействия на твердые тела способны изменять пластические и прочностные характеристики [1–3]. Токовое воздействие высокой частоты на металлы и сплавы хорошо изучено. Но, в настоящее время известно, что механические свойства металлов изменяются не только при пропускании электрического тока, но и при воздействии значительно более слабых электростатических воздействий. Так, рядом авторов было обнаружено изменение микротвердости при воздействии электрического потенциала, объясняемое образованием двойного электрического слоя на поверхности исследуемого металла и соответственным изменением плотности поверхностной энергии [4–6]. В настоящей работе проанализировано воздействие электрического потенциала на микротвердость поликристаллических циркония, алюминия, кобальта и монокристаллического цинка.

Измерения проводились на микротвердомере ПМТ-3М. Для изменения поверхностного электрического потенциала образцы подключали к одному полюсу стабилизированного источника постоянного напряжения. Для создания электрического контакта образец приклеивался проводящим клеем «Контактол» к медной подложке, которая в свою очередь была соединена с источником медным экранированным проводом. Во время измерений микротвердости образец изолировался от микротвердомера и Земли. Емкость образующего конденсатора «Земля – образец» составляла ~ 50пФ. Подача потенциала производилась пошагово от нуля до заданного значения с измерением микротвердости при каждом его промежуточном значении. От момента приложения поля до начала индентирования производилась выдержка в течение 30 мин, чтобы учесть возможное запаздывание эффекта.

Установлено, что эффект воздействия электрического потенциала на микротвердость не зависит от знака, а определяется только модулем этой величины. Существенные изменения наблюдаются в интервале  $0 \dots \pm 0,1$  В, а при дальнейшем увеличении абсолютной величины потенциала микротвердость практически не меняется. Причем, при действии

электрического потенциала микротвердость циркония возрастает, а алюминия, кобальта и монокристаллического цинка, напротив, снижается. Минимальные изменения микротвердости на 8 % зафиксированы в цинке, а максимальные на 25 % – в кобальте.

Предположено, что интенсивность и знак изменений микротвердости определяются величиной и знаком константы Холла, то есть, типом проводимости металла. У алюминия, кобальта и цинка константа Холла отрицательная (электронный тип проводимости), а у циркония – положительная (дырочный тип). По абсолютной величине постоянная Холла максимальна у кобальта, в котором и наблюдается наибольший эффект.

#### *Литература*

1. Кишкин С.Т. Эффекты магнитного и электрического воздействия на ползучесть металлов и сплавов // Доклады АН СССР. 1973. №2. С. 325–327.
2. Венстрем Е.К., Ребиндер П.А. Электрокапиллярный эффект облегчения деформаций растяжения металлов // Журн. физ. химии. 1952. Т. 26, № 12. С. 1847–1852.
3. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Филипьев Р.А., Котова Н.В. О вариациях механических характеристик металлов при действии электрического потенциала // Металлы. 2010. №4. С. 39–45.
4. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Коновалов С.В., Филипьев Р.А., Громов В.Е. О влиянии контактной разности потенциалов и электрического потенциала на микротвердость металлов // ФТТ. 2009. Т. 51. Вып. 6. С. 1077–1080.
5. Данилов В.И., Зуев Л.Б., Коновалов С.В., Филипьев Р.А., Семухин Б.С. О влиянии электрического потенциала на сопротивление микроиндентированию поверхности металлов // Поверхность. 2010. № 2. С. 85–89.
6. Орлова Д.В., Зуев Л.Б., Данилов В.И. Характер изменения микротвердости плоскости (0001) монокристаллов цинка под действием электростатического поля и возможная причина этого эффекта // ФТТ. 2013. Т. 55, вып. 2. С. 313–317.

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН ПРОНИЦАЕМЫМИ ПРЕГРАДАМИ NUMERICAL MODELING OF SHOCK WAVES DUMPING BY PERMEABLE BARRIERS**

**Е.Г. Глазова, А.В. Кочетков, И.А. Турыгина**  
**E.G. Glazova, A.V. Kochetkov, I.A. Turygina**  
Научно-исследовательский институт механики  
Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского  
Research Institute of mechanics in Lobachevsky State University  
of Nizhni Novgorod  
hodykinainna@gmail.com

Проницаемые преграды являются эффективным средством защиты от воздействия ударных волн [1, 2]. Эффективность подобных преград повышается при использовании многослойных каскадов. При этом параметры проходящих и отраженных ударных волн сильно зависят от расстояния между отдельными слоями – проницаемыми экранами [1]. Способы расчета подобных систем хорошо развиты для отдельных и далеко стоящих друг от друга экранов. В то же время практически отсутствуют зависимости для близко расположенных или примыкающих

слоев. Сложность происходящих газодинамических процессов требует привлечения экспериментальных или численных методов для расчета подобных задач.

В данной работе методами численного моделирования исследуются процессы взаимодействия ударных волн с газопроницаемыми экранами в случаях удаленного расположения слоев и их непосредственного примыкания друг к другу. Для оценки проходящих и отраженных ударных волн для далеко разнесенных преград наряду с численными методами используется точное решение задачи о распаде разрыва на скачке коэффициента проницаемости [3]. Численно исследуются процессы прохождения ударных волн через близко примыкающие слои, фактически представляющие собой единый пакет преград. При распространении волн через подобные преграды уменьшается их амплитуда и происходит трансформация волновых профилей [2]. Задача состоит в исследовании параметров течения газа в газопроницаемой преграде, перед ней и за преградой. На основе сравнения численных решений задач с проницаемой преградой и без нее оценивается влияние преград различной структуры на газодинамические течения. Расчеты проведены как с помощью вычислительного комплекса STAR-CCM+, так и с помощью оригинальных программных средств, разработанных в НИИМ ННГУ. При численном моделировании в качестве проницаемых преград берутся слои металлических плетеных сеток.

В вычислительном комплексе STAR-CCM+ процесс моделирования имеет несколько этапов, последовательное выполнение которых гарантирует дальнейшую корректную работу решателя: подготовка геометрии, генерация расчетных сеток, выбор физических моделей, а также задание начальных и граничных условий. Построение геометрической модели в программном комплексе осуществляется с помощью встроенного модуля 3D-CAD. Так как смоделировать все проволочки в пакете не представляется возможным, выделяется элементарный канал квадратного сечения, боковые грани которого являются плоскостями симметрии. Область определения задачи имеет достаточно сложную геометрию, которая требует подробного описания расчетной сеткой. Так же, большой размер самой области по сравнению с размером проволочек увеличивает число ячеек в расчетной сетке. В виду сложности задачи, ее нелинейности и нестационарности, не каждая расчетная сетка может быть пригодна для вычислений. Попытки использования сетки с более крупными ячейками приводили к авостным ситуациям, недопустимому росту невязок численного решения, отсутствию сходимости. Соответствующие параметры и размеры расчетной сетки были подобраны опытным путем.

При расчетах используются нестационарный неявный метод (Implicit Unsteady), неявно сопряженный (Coupled Implicit), модель турбулентности

*k-ε*. На поверхностях проволок задаются температурные условия: адиабатический метод (без учета теплопередачи). Выполненные ранее исследования показали, что теплообмен играет незначительную роль ввиду малой концентрации металла.

Численный эксперимент подтверждает, что с увеличением количества слоев сетки усиливается отраженная волна и ослабляется проходящая. Таким образом, преграда, представляющая собой пакет металлической плетеной сетки, выполняет свои функции – снижает нагрузку: как по амплитуде, так и по величине импульса проходящей ударной волны. Для далеко разнесенных слоев полученные результаты численных исследований хорошо соответствуют известным экспериментальным и теоретическим данным [1].

Работа выполнена при частичном финансировании РФФИ (гранты № 13-08-00219, № 14-08-00197).

### *Литература*

1. Гельфанд Б.Е., Фролов С.М. Приближенный расчет ослабления ударных волн проницаемыми преградами // ПМТФ, 1990. Н 4, с. 42-46.
2. Глазова Е.Г., Кочетков А.В., Турыгина И.А. Численное моделирование пространственного взаимодействия ударной волны с проницаемой преградой // Вестн. Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. Н. Новгород: Изд-во ННГУ. 2014. Вып. 1(1). С. 180–185.
3. Газодинамика процессов истечения / Дулов В.Г., Лукьянов Г.А. Новосибирск: Наука. 1984. 234 с.

## **ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕГКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ INFLUENCE OF SEVERE PLASTIC DEFORMATION ON THE PHYSIC-MECHANICAL PROPERTIES OF LIGHT STRUCTURAL ALLOYS**

<sup>1</sup>Б.В. Хандаев, <sup>1</sup>Ю.В. Ли, <sup>2</sup>А.С. Нарикович  
<sup>1</sup>B.V. Handaev, <sup>1</sup>Li Yu.V., <sup>2</sup>Narikovich A.S.

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

<sup>2</sup>Балтийский федеральный университет им. И. Канта

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University

<sup>2</sup>Immanuel Kant Baltic Federal University

Bkhandaev@gmail.com

Положительное влияние интенсивных пластических деформаций (ИПД) на конструкционные металлы и сплавы отмечено многими современными исследователями [1–3]. Оно заключается в измельчении внутренней структуры материалов до ультрамелкозернистого (УМЗ) и наноразмерного

состояний, и, как следствие, изменения их физико-механических свойств, что заключается в эффекте упрочнения. Эффект упрочнения после ИПД отражается в повышении микротвердости, пределов текучести и временного сопротивления, изменения степени деформации до начала разрушения в образце, повышения долговечности и усталостной прочности [4]. Реализация ИПД в металлах и сплавах осуществляется разными методами [2, 4, 5]. Наиболее распространенным из них является метод равноканального углового прессования (РКУП), который позволяет изменять структуру в объемных образцах.

В работе представлены результаты исследования влияния ИПД на физико-механические свойства легких конструкционных сплавов, к которым относятся сплавы на основе магния Ма2-1 и алюминия АМг6. Эти сплавы применяются в авиационной, автомобильной и космической промышленности. Изменение их физико-механических свойств является направлением к оптимизации элементов конструкций, повышению эффективности применения в различных условиях эксплуатации.

После обработки методами ИПД по схеме РКУП образцов проводили комплекс физико-механических исследований, который включал в себя: элементный анализ; рентгеновская томография; микроструктурный анализ; рентгеноструктурный анализ; определение физико-механических свойств сплавов при осевом растяжении плоских образцов в диапазоне скоростей деформации от  $10^{-3}$  до  $10^3$ .

Химический элементный и рентгеноструктурный анализ показали, что, не смотря на высокую температуру прессования и большие степени пластических деформаций, в процессе РКУП в исследуемых сплавах не происходит побочных химических реакций и фазовых преобразований. Определено появление внутренних упругих напряжений, что может внести вклад в общее напряженно-деформированное состояние при последующих этапах исследований. С использованием современных методов рентгеновской томографии проводилась оценка дефектности внутренней структуры, определения пористости, наличия микротрещин, пустот в объеме обработанных материалов. Соблюдение технологии реализации интенсивной пластической деформации, описанной в [6], позволило получить свободную от макро- и микродефектов структуру сплавов с измененными средними размерами зерна.

В результатах работы показано, что многопроходное РКУ-прессование легких сплавов Ма2-1 и АМг6 позволяет после четырех проходов формировать в объеме образцов равномерную ультрамелкозернистую структуру. Экспериментально установлено, что после воздействия ИПД на исследуемые сплавы, увеличивается предел текучести, кратковременной прочности. Максимальные значения предельной деформации при растяжении для магниевого сплава увеличиваются, а для алюминиевого уменьшаются. Микротвердость для обоих сплавов после ИПД растет.



Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках проекта № 14-01-31144 мол\_а.

### *Литература*

1. Meyers M.A., Mishra A., Benson D.J. Mechanical properties of nanocrystalline materials // Progress in materials Sciences. 2006. Vol. 51. P. 427–556.
2. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы. М.: Академкнига, 2007. 397 с.
3. Meyer L.W., Hockauf M., Kruger L., Schneider I. Compressive behaviour of ultrafine-grained AA6063T6 over a wide range of strains and strain rates // International journal of materials research. 2007. Vol. 98, № 3. P. 191–199.
4. Скрипняк В.А., Скрипняк Е.Г., Козулин А.А., Скрипняк В.В. Влияние структурированного поверхностного слоя на циклическую долговечность легких сплавов // Изв. высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55, № 9–3. С. 109–113.
5. Хомская И. В., Зельдович В. И., Шорохов Е. В. и др. Структура титана, подвергнутого высокоскоростному прессованию при различных температурах // Деформация и разрушение материалов. 2010. № 4. С. 15–19.
6. Козулин А.А., Скрипняк В.А., Красношейкин В.А., Скрипняк В.В., Каравацкий А.К. Исследование физико-механических свойств ультрамелкозернистых магниевых сплавов после интенсивной пластической деформации // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57. № 9. С. 98–104.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПСЕВДОСПЛАВОВ Al – ZrW<sub>2</sub>O<sub>8</sub> THE STUDY ON STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF Al – ZrW<sub>2</sub>O<sub>8</sub> PSEUDO ALLOYS**

**В.С. Шадрин, Е.С. Дедова, С.Н. Кульков  
V.S. Shadrin, E.S. Dedova, S.N. Kulkov**

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

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

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University

<sup>2</sup>Institute of strength physics and materials science RAS

vshadrin91@gmail.com, lsdedova@yandex.ru, kulkov@ms.tsc.ru

Вольфрамат циркония (ZrW<sub>2</sub>O<sub>8</sub>) – это материал с аномальными тепловыми свойствами. Он обладает значительным отрицательным коэффициентом теплового расширения (КТР),  $\alpha \approx -9 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$ , в широком температурном интервале от  $-273$  до  $770 \text{ }^\circ\text{C}$ . Традиционно вольфрамат циркония применяют для изготовления композиционных материалов с контролируемым тепловым расширением для применения в тех областях, где постоянство размеров играет решающую роль. В таких исследованиях ZrW<sub>2</sub>O<sub>8</sub> рассматривается исключительно как компенсатор КТР и его влиянию на механические свойства изготовленного материала уделяется мало внимания.

Дисперсное упрочнение металлических материалов позволяет качественно повысить их механические свойства. Однако, введение частиц, обладающих отрицательным КТР, в металлическую матрицу позволяет усилить упрочняющий эффект за счет формирования внутренних сжимающих напряжений, вызванных различием КТР исходных компонентов. Проведенные расчеты показывают, что внутренние напряжения, возникающие за счет несовпадения КТР компонентов, могут достигать 2,1 ГПа [1].

*Целью* настоящей работы было исследование влияния  $ZrW_2O_8$  на структуру, фазовый состав и механические свойства алюминия.

Для изготовления псевдосплавов порошок алюминия (т.ч.) смешивали с порошком  $ZrW_2O_8$ , полученным отжигом прекурсора  $ZrW_2O_7(OH_{1,5},Cl_{0,5}) \cdot 2H_2O$  с выдержкой в течение 1 часа при температуре 570 °С [2], в различных весовых отношениях: 0; 0,1; 0,5; 1; 5 и 10 мас. %  $ZrW_2O_8$ . Методом холодного изостатического прессования были изготовлены образцы цилиндрической формы  $\sim \phi 20\text{мм} \times 4\text{мм}$ , которые в дальнейшем спекались в течение 1 часа при 600 °С.

Результаты растровой электронной микроскопии псевдосплавов Al –  $ZrW_2O_8$  показали, что с увеличением содержания вводимой добавки  $ZrW_2O_8$  на поверхности образцов наблюдались белые частицы, при этом их средний размер менялся от 0,5 мкм для композита Al – 0,1 вес. %  $ZrW_2O_8$  до 1 мкм в Al – 10 вес. %  $ZrW_2O_8$ . Распределение частиц по размерам носило унимодальный характер, преимущественное количество частиц находилось в интервале от 0,5 до 1 мкм. Элементный анализ показал, что отношение атомов циркония (Zr) и вольфрама (W) удовлетворяет стехиометрии вольфрамата циркония (Zr:W = 1:2). С ростом весовой доли  $ZrW_2O_8$  пористость алюминиевых материалов увеличивалась.

На рентгенограммах фиксировались только пики, соответствующие кубической фазе алюминия и кубической модификации вольфрамата циркония. Полученные значения параметров решетки отличались от литературных данных [3], что может быть обусловлено наличием внутренних сжимающих напряжений в материале. В модели линейно-напряженного состояния можно оценить их величину: напряжения сжатия равные 260 МПа.

Испытания на сжатие образцов осуществлялись на испытательной установке «INSTRON – 1185» со скоростью нагружения 0,2 мм/с. Измерение твердости по Виккерсу (HV) проводилось на микротвердомере ПМТ – 3 с нагрузкой на индентор 50 г. Для образцов из чистого алюминия предел прочности на сжатие составил  $125 \pm 10$  МПа, значение микротвердости  $205 \pm 10$  МПа. Введение 0,5 мас. % вольфрамата циркония привело к росту механических свойств: предел прочности составил 173 МПа, значение микротвердости 284 МПа. Дальнейшее увеличение содержания вольфрамата циркония способствовало резкому уменьшению величины предела прочности и микротвердости. Снижение механических свойств может быть

связано с возрастанием пористости, обусловленным увеличением содержания  $ZrW_2O_8$  в металлической матрице. Таким образом экспериментально установлено, что введение 0,5 мас. %  $ZrW_2O_8$  в качестве упрочняющей приводит к возрастанию механических характеристик в среднем на 25%.

### *Литература*

1. *Shadrin V.S., Dedova E.S., Kulkov S.N.* Structure and mechanical properties of Al –  $ZrW_2O_8$  composites. In L.A. Gomze (Editor) 3<sup>rd</sup> International Conference on Competitive Materials and Technology Processes, Miskolc-Lillafüred, Hungary, p 174.

2. *Дедова Е.С., Шадрин В.С., Губанов А.И., Кульков С.Н.* Получение и особенности структуры вольфрамата циркония с аномальными тепловыми свойствами // Перспективные материалы. 2014, №5, С. 22–26.

3. *Negative Thermal Expansion from 0.3 to 1050 Kelvin in  $ZrW_2O_8$*  / T.A. Mary [et al.] // Science. 1996. Vol. 272. P. 90–92.

Секция 4  
**БАЛЛИСТИКА И НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА**

---

---

Session 4  
**BALLISTICS AND CELESTRAL MECHANICS**

**МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ  
ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ЖИДКОСТИ  
ЭЖЕКЦИОННЫМИ ФОРСУНКАМИ  
TECHNIQUE FOR EXPERIMENTAL STUDY OF LIQUID  
DISPERSION BY EJECTION ATOMIZERS**

**А.Л. Астахов, В.А. Архипов  
A.L. Astakhov, V.A. Arkhipov**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University

В эжекционных форсунках, относящихся к пневматическому типу распыливающих устройств, подача и диспергирование жидкости осуществляется за счет создаваемого перепада давлений на срезе сопла форсунки между распыливаемой жидкостью и вдуваемым газом. Одним из преимуществ практического использования эжекционных форсунок является возможность совершенствования существующей технологии за счет модификации элементов распыливающего узла форсуночного блока.

В настоящей работе представлены результаты отработки методики для форсуночного в условиях холодных продувок. При экспериментальных исследованиях ставилась задача по выявлению закономерности влияния различных факторов (форма сопла для подачи газа, наличие рассекателя, способы подвода газа) на дисперсность капель факела распыла. Принципиальная возможность применения закономерностей диспергирования модельных жидкостей, установленных в условиях холодных продувок, к распыливанию металлических расплавов является основанием для проведения экспериментальных исследований на модельном пневмогидравлическом стенде с последующим переносом результатов на реальный процесс.

Подаваемая через форсунку жидкость при взаимодействии с потоком газа образует факел распыла, который зондируется лазерным излучением. Пневмогидравлический стенд обеспечивает проведение испытаний модельных образцов форсунок в диапазоне рабочих давлений (0.1–1.0) МПа при изменении расхода жидкости до 10.8 кг/ч и воздуха до 6.3 м/ч.

Для определения дисперсности капель в факеле распыла исследуемых форсунок разработана лазерная установка, основанная на измерении

интенсивности излучения, рассеянного на аэрозольных частицах в области малых углов. Значение угла рассеяния рассчитывалось по показаниям измерительной шкалы и геометрическим характеристикам оптической системы.

Для оценки влияния конструктивных особенностей инжекционной форсунки на дисперсности капель (в основу положен метод предварительной оценки эффективности различных способов распыливания) проведены испытания модельных форсунок.

В проведенных экспериментах в качестве рабочей жидкости использовалась вода, а в качестве газа – сжатый воздух. Для исследованных модельных форсунок получены дифференциальные функции счетного распределения капель по размерам. Рассчитанные индикатрисы рассеяния хорошо согласуются с измеренными, что свидетельствует об адекватности использованной методики обработки результатов измерений.

## **ОЦЕНИВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ СТОЛКНОВЕНИЯ АСТЕРОИДОВ С ПЛАНЕТАМИ ESTIMATION OF PROBABILITY OF ASTEROIDS IMPACTS WITH PLANETS**

**Е.А. Баранников  
E.A.Barannikov**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University  
yegor.barannikov@gmail.com

В настоящей работе рассматривается проблема оценивания вероятности столкновений астероидов с планетами, в частности с Землей. Так как наблюдения, используемые для определения параметров орбит астероидов, отягощены неизбежными ошибками измерений, мы можем найти лишь приближенные значения этих параметров, называемых номинальными и указать некоторую область их возможных значений параметров (доверительную область), каждая точка которой согласуется с имеющимися наблюдениями. Отображение такой области во времени представляет собой пучок траекторий, по которым движутся в пространстве точки доверительной области. Поэтому вероятность столкновения исследуемого астероида с Землей обычно оценивается как отношение числа точек, которые в процессе эволюции сталкиваются с Землей, к общему числу точек определяющих доверительную область [3]. Нами были рассмотрены два варианта построения доверительных областей. В первом варианте множество точек плотно заполняет эти области, во втором – доверительные области задаются их граничными поверхностями [1, 2].

Полученные результаты показывают, что для модельных астероидов, несмотря на изначально запланированную стопроцентную вероятность

столкновения, численное значение вероятности этого столкновения существенным образом зависит от размеров доверительной области. Размеры области в свою очередь определяются длиной мерного интервала и количеством наблюдений. Планируемая стопроцентная вероятность столкновения достигается только в случае, когда наблюдения покрывают дугу не менее одного оборота астероида. Можно отметить также, что использование различных выборок случайных чисел при построении доверительной области приводит к некоторому разбросу в оценке вероятности столкновения. Этот разброс тем меньше, чем больше точек содержит доверительная область. Получаемая вероятность так же существенным образом зависит от конфигурации области. При задании доверительной области ее граничной поверхностью, оценки вероятности столкновения оказываются несколько заниженными. Таким образом, в виду большого разброса расчетных оценок вероятности, для нас важен лишь сам факт отличия этих оценок от нулевого значения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 12-02-00220-а.

### *Литература*

1. Баранников Е.А., Сюсина О.М., Черницов А.М., Тамаров В.А. Методы определения граничных точек доверительных областей в задаче исследования движения астероидов // Изв. вузов. Физика. Приложение: Небесная механика и прикладная астрономия. 2013. №10/2. С. 119–125.
2. Сюсина О.М., Черницов А.М., Тамаров В.А. Построение доверительных областей в задаче вероятностного исследования движения малых тел солнечной системы // Астрономический вестник. 2012. №3. С. 210–216.
3. Черницов А.М., Тамаров В.А., Сюсина О.М. Об оценивании вероятности столкновения астероидов с планетами.// Изв. вузов. Физика. Приложение. Небесная механика и прикладная астрономия. 2013. №10/2. С. 126–131.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРИБАЛЛИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ГПВРД ПРИ ЕГО ДВИЖЕНИИ НА БОЛЬШИХ ВЫСОТАХ С УЧЕТОМ НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА ВОЗДУХА SIMULATION OF SCRAMJET INTERNAL BALLISTICS AT HIGH ALTITUDES TAKING INTO ACCOUNT ONCOMING AIRFLOW**

**И.М. Васенин, А.Ю. Крайнов, Д.А Крайнов**

**I.M.Vasenin, A.Yu.Krainov, D.A.Krainov**

Национальный исследовательский Томский государственный университет

National Research Tomsk State University

akrainov@ftf.tsu.ru

Для движения в высоких слоях атмосферы с большими скоростями, при числах Маха набегающего потока 6–10 наиболее оптимальным является

110

использование гиперзвуковых прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ГПВРД) [1]. Однако их разработка сталкивается с большими техническими трудностями, связанными с большими тепловыми и динамическими нагрузками на корпус ГПВРД, неустойчивыми режимами работы двигателя, сложностями в организации подачи топлива для достижения высокой полноты сгорания в сверхзвуковом потоке воздуха. Тяга ГПВРД создается сгоранием топлива в сверхзвуковом потоке в его камере сгорания. После взаимодействия сверхзвукового набегающего потока с выступающей вперед носовой частью ГПВРД в потоке воздуха возникает косой скачок уплотнения. В канале ГПВРД формируется серия косых скачков уплотнения. В зоне горения температура и давление повышаются, поток расширяется через сопло, создавая тягу.

Для моделирования газодинамических процессов в канале модельного ГПВРД и набегающем потоке используются уравнения газовой динамики. Предполагается, что в объем канала  $V$  подается заданное количество газообразного горючего. Массовая скорость подачи горючего однородна по этому объему. Предполагается, что перемешивание горючего с воздухом и его сгорание происходит за время много меньшее, чем время протекания потока воздуха в канале ГПВРД. Система уравнений решалась численно методом С.К. Годунова на сетке, преобразованной к форме контура ГПВРД. Численное решение системы уравнений проводилось до установления стационарного течения в тракте ГПВРД и окружающем пространстве.

При горении топлива поток воздуха и продуктов сгорания имеет повышенную температуру и давление на выходе в расширяющейся части канала ГПВРД, что обеспечивает положительную результирующую силу, под действием которой ГПВРД будет ускоряться. Было получено, что с увеличением скорости набегающего потока (скорости движения ГПВРД) величина проекции полной аэродинамической силы на ось движения уменьшается. При заданном расходе ГПВРД ускорится и будет двигаться равномерно при скорости  $\sim 3200$  м/с.

На основе разработанной физико-математической модели газодинамических процессов при движении ГПВРД в атмосфере проведены расчеты газодинамических параметров течения для области, включающей в себя набегающий сверхзвуковой поток, область внутри канала ГПВРД и вне его при движении со скоростями, соответствующими числам Маха набегающего потока 6.7–10. Получены зависимости проекции полной аэродинамической силы на направление движения ГПВРД от скорости его движения и массовой скорости подачи топлива. Показано, что с увеличением расхода горючего проекция полной аэродинамической силы на направление движения ГПВРД растет до некоторого предела, и затем резко падает вплоть до отрицательных значений. Падение величины проекции полной аэродинамической силы происходит при превышении

расхода горючего предельного значения. После этого происходит резкое изменением режима течения в канале ГПВРД и его обтекания сверхзвуковым потоком воздуха.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания №2014/223 (код проекта 1943).

### *Литература*

1. Александров В.Н., Быцкевич В.М., Верховоломов В.К. и др. Интегральные прямоточные воздушно-реактивные двигатели на твердых топливах: Основы теории и расчета. М.: ИКЦ «Академкнига». 2006. 343 с.

## **МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ЗЕМЛИ ОТ ОПАСНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ METHODS OF PROTECTING THE EARTH FROM DANGEROUS SPACE OBJECTS**

**А.В. Гуськов, В.А. Ломан, К.Е. Милевский  
А.V. Guskov, V.A. Loman, K.E. Milevsky**

Новосибирский государственный технический университет  
Novosibirsk State Technical University  
Loman\_95@mail.ru

Земля постоянно подвергается бомбардировкам малых космических объектов, которые сгорают в атмосфере. Но уже объекты от 10 метров, могут вызывать локальные разрушения и повреждения. Объекты же от 100 м, уже представляют угрозу городам. Объекты от 1 км, могут привести к глобальным природным катастрофам, которые будут сопровождаться большими разрушениями и гибелью людей. Для оценки опасности столкновения используется Туринская шкала[1].

Актуальность этой проблемы, подтвердило падение Челябинского метеорита. Явление зафиксированное на видео записях с разных точек наблюдения, включая космические аппараты. Анализ регистраций, показал, что размер астероида составлял 17 м, масса от 7 до 12 тыс. т. Объект взорвался на высоте 22 км над землёй. Энергия взрыва составила от 300 до 500 т в тротиловом эквиваленте [2]. Если бы объект был бы в раз в 10 больше, последствия падения метеорита были бы катастрофические.

Для решения этой проблемы нужно пройти 3 стадии: стадию обнаружения объекта, стадию анализа действий и выбор способа воздействия на объект и стадии воздействия.

Способов обнаружения потенциально опасных космических объектов множество. Это наземные телескопы, в космосе это оптически, инфракрасные, рентгеновские и радиотелескопы. Правда, Большинство телескопов и устройств настроено не на поиск потенциально опасных



объектов, а на изучение космоса, планет, звёзд и т.д. [3]. А это означает, что даже крупный космический объект может быть не замечен долгое время, а после обнаружения может оказаться, что времени на эффективное использование проектов уже и нет.

Стадия анализа действий зависит от информации, собранной на первой стадии, и уже на основе решения принятого после анализа, выбирается способ воздействия на потенциально опасный объект.

На данный момент есть множество теоретических способов по предотвращению столкновения с потенциально опасными космическими объектами. Но все они сводятся к двум вариантам: малое воздействие, но длительный период времени и задолго до столкновения с Землёй и сильное воздействие, когда объект находится в относительной близости от Земли.

На данный момент, возможен к реализации только способ уничтожения космического объекта ядерным взрывом [4]. Недостаток данного способа заключается в том, что после уничтожения или раскола объекта, образуются множество мелких фрагментов объекта, которые могут быть притянуты гравитацией Земли и оставаться на её орбите долгое время. Что приведёт к увеличению рисков при космических полётах или даже заставит отказаться от них на какое-то время, если опасность столкновения будет слишком велика.

Авторы разработали метод разрушения космического мусора, который позволит разрушать небольшие фрагменты космического мусора [5]. Авторы разработали метод воздействия на крупные космические объекты, который свести с траектории столкновения без разрушения опасного объекта или сведения его разрушения к минимуму, при заблаговременном обнаружении угрозы [6]. Данный метод позволит свести опасный объект с траектории столкновения с Землей, не уничтожая его, и даже при необходимости управлять направлением движения объекта.

Рассмотрев недостатки и проблемы существующих проектов, можно сделать вывод: необходимо развитие систем раннего обнаружения потенциально опасных объектов, что позволит на ранних стадиях определять уровень угрозы и способы её нейтрализации. Так же необходимо развитие методов предотвращения столкновения, чтобы обеспечить безопасность Земли.

### *Литература*

1. Morrison D. Impacts and the Public: Communicating the Nature of the Impact Hazard / Chapman, C. R., Steel, D., Binzel R. P. // Cambridge University Press. 2004.
2. Свободная пресса [электронный ресурс] / статья: Удар из космоса / авт. Гомзикова С. Словецкий В., Ищенко С., Иванов А. 17 02 2013 г. URL: [http](#)(дата обращения: 18.10.2014 г.).
3. Багров А. Создание системы космической защиты от астероидов и метеоритов // Space Colonization Journal. Space Robotics Corporation, 09 08 2013 г. Т. 5.

4. Ильин А. Ребята! Не земля ль за нами // Новости космонавтики. 2013. №5.С. 48–50.
5. Пат. 145068 Российская Федерация, МПК В64G 99/00 Устройство для разрушения фрагментов космического мусора / Гуськов А.В., Милевский К.Е., Иноземцева К.О., Слесарева Е.Ю.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирского государственного технического университета». опубл. 01.04.2014, Бюл. № 25.
6. Заявка 2014125239 Российская Федерация от 28.08.2014 на выдачу патента на предлагаемое изобретение. Способ разрушения фрагментов космического мусора; заявитель Гуськов. А.В. Милевский К.Е., Ломан В.А.

**ВЫЧИСЛЕНИЕ СБЛИЖЕНИЙ АСТЕРОИДОВ С ЗЕМЛЕЙ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ЭФЕМЕРИД БОЛЬШИХ  
ПЛАНЕТ И ЛУНЫ**  
**COMPUTING OF ASTEROIDS' ENCOUNTERS TO THE EARTH WITH  
DIFFERENT EPHEMERIDES OF MAJOR PLANETS AND THE MOON**

**В.В. Кинзерский, А.П. Батурич  
V.V. Kinzersky, A.P. Baturin**

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

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики  
Томского государственного университета

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University

<sup>2</sup>Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University

Проведено исследование влияния выбора эфемерид больших планет и Луны, используемых при учете возмущений, на результаты вычисления обстоятельств сближений астероидов с Землей. Исследование выполнено на примере вычисления сближений с Землей двух астероидов: Апофис и 101955. Первый астероид выбран как пример объекта с трудно прогнозируемым движением, поскольку имеет очень тесное сближение с Землей. Второй астероид является типичным представителем наиболее широкого класса околоземных объектов с хорошо прогнозируемым движением, не имеющих слишком тесных сближений с планетами. Для этих двух объектов было выполнено вычисление сближений с Землей до 2200 года с использованием при учете возмущений эфемерид DE405, DE432 и EPM2011. В качестве модели движения была использована возмущенная задача двух тел с учетом возмущений от 8 больших планет, Плутона и Луны, координаты которых при численном интегрировании уравнений движения извлекались из указанных выше эфемерид. Для численного интегрирования применялся метод Эверхарта 27 порядка с переменным шагом, а все вычисления выполнялись с четверной машинной точностью.

Сравнение обстоятельств сближений, вычисленных с использованием различных эфемерид, показало, что для объектов типа астероида Апофис выбор используемых эфемерид существенно влияет на результаты

вычисленных сближений, в то время как для объектов типа астероида 101955 замена одних эфемерид другими влияет на результаты незначительно. Кроме того, показано, что использование более современных эфемерид, таких как DE432 и EPM2011, дает более близкие друг к другу результаты, чем использование более старых эфемерид типа DE405. Следовательно, при расчете сближений астероидов с планетами предпочтительнее использовать наиболее современные эфемериды.

### *Литература*

1. Батурин А.П. Влияние способов построения эфемерид больших планет и Луны на точность прогнозирования движения астероидов // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57. №9. С. 72–79.
2. Pitjeva E.V. Updated IAA RAS planetary ephemerides EPM2011 and their use in scientific research // Solar System Research. 2013. Vol. 47, Issue 5, P. 386–402.
3. Авдюшев В.А. Интегратор Гаусса-Эверхарта // Вычислительные технологии. 2010. Т. 15, №4. С. 31–46.

## **ДОЛГОВРЕМЕННАЯ ОРБИТАЛЬНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ТОРОВ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА В ЗОНЕ ГЕО LONG-TERM ORBITAL EVOLUTION OF THE SPACE DEBRIS TORUS IN THE GEO AREA**

**Д.С. Красавин, А.Г. Александрова  
D.S. Krasavin, A.G. Aleksandrova**

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

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики  
Томского государственного университета

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University

<sup>2</sup>Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University  
iosfixed@gmail.com, aleksann@sibmail.com

В настоящее время околоземное пространство является технически сильно загруженным. Особенно это касается геостационарной зоны (или зона ГЕО). Под зоной ГЕО будем подразумевать область пространства вокруг экваториальной орбиты со средним радиусом  $a=42164$ км, шириной 150 км вдоль радиуса орбиты и протяженностью плюс-минус  $15^\circ$  по широте [1]. Именно эта область околоземного пространства представляет наибольший интерес с точки зрения исследования динамической эволюции космического мусора, поскольку в ней нет эффективных механизмов самоочистки, в данной области наибольшая плотность распределения объектов [2], и кроме того в этой области околоземного пространства тенденция к возникновению хаоса в движении объектов проявляется особенно заметно. По данным 16-го издания каталога European Space Agency (ESA) «Classification of Geosynchronous Objects» в настоящее время

каталогизировано 1317 известных объектов, которые либо находятся в геостационарной зоне либо их орбиты проходят через зону ГЕО.

В геостационарной зоне существуют области с различными типами движения околоземных объектов. Это объекты с периодическими орбитами, либрационными орбитами и неустойчивыми или хаотическими орбитами [3].

В данной работе рассматривается долговременная орбитальная эволюция торов частиц космического мусора, образовавшихся в результате распада космического аппарата (КА) в зоне ГЕО в зависимости от типа движения родительского тела.

Для моделирования фрагментов распада использовалось программное обеспечение для моделирования изотропного взрыва КА, разработанное сотрудниками отдела «Астрометрии и небесной механики» НИИ ПММ ТГУ [4]. Движение частиц космического мусора прогнозировалось с помощью «Численной модели движения систем ИСЗ» [5], реализованной на кластере «Скиф Cyberia» ТГУ.

Кроме исследования общей динамики торов фрагментов КА, проводилась оценка процентного соотношения типов движения фрагментов распада, образовавшихся в результате взрыва. Для оценки типа движения объекта использовался усредненный параметр  $Megno$ . Как известно, для квазипериодических орбит этот параметр стремится к 2, для устойчивых либрационных орбит близок к 0, а для хаотических принимает значения, большие 2 [6].

### *Литература*

1. Flury W. [et al.] Searching for small debris in the geostationary ring // ESA Bulletin. 2000. Vol. 104. P. 92–100.
2. Чувашов И.Н. Выявление пространственной плотности околоземных объектов, при которой возможно возникновение каскадного эффекта / Чувашов И.Н., Александрова А.Г. // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 10/2. С. 181–186.
3. Александрова А.Г., Чувашов И.Н., Бордовицына Т.В. MEGNO-анализ орбитальной эволюции объектов зоны ГЕО // Изв. вузов. Физика. 2011. Т. 54. № 6/2. С. 39–46.
4. Бордовицына Т.В., Александрова А.Г. Численное моделирование процесса образования орбитальной эволюции и распределения фрагментов космического мусора в околоземном пространстве // Астрон. вестн. 2010. Т. 44. С. 259–272.
5. Бордовицына Т.В. [и др.] Численное моделирование движения систем ИСЗ в среде параллельных вычислений // Изв. вузов. Физика. 2009. Т. 52. № 12/2. С. 5–11.
6. Бордовицына Т.В., Александрова А.Г., Чувашов И.Н. Комплекс алгоритмов и программ для исследования хаотичности в динамике искусственных спутников Земли // Изв. вузов. Физика. 2010. Т. 53. № 8/2. С. 14–21

**ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО  
ГОРЮЧЕГО НА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ  
THE INFLUENCE OF THE CHEMICAL NATURE OF METAL FUEL  
ON THE THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF SOLID  
PROPELLANTS**

**В.В. Кузнецова, Л.А. Савельева**

**V.V.Kuznetsova, L.A. Savelieva**

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

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики

Томского государственного университета

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University

<sup>2</sup>Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University

kisa.tear43@inbox.ru

Металлическое горючее определяет энергетические характеристики топлив (единичный импульс, температуру в камере сгорания и на срезе сопла) и влияет на состав газообразных продуктов сгорания и содержание конденсированных веществ в последних.

В настоящее время основным металлическим горючим перхлоратных ТРТ является алюминий. Введение в топливо 15 масс. % алюминия обеспечивает единичный импульс на уровне 268 с и температуру в камере сгорания порядка 3050 К. Однако в продуктах сгорания таких топлив содержится до 28 масс. % конденсированных веществ в виде оксида алюминия и до 21 масс. % паров хлористого водорода, что в реальных условиях приводит к снижению единичного импульса и противоречит требованиям экологической чистоты продуктов сгорания ТРТ.

В работе рассмотрено влияние 4 металлов и 8 смесей на их основе на термодинамические характеристики ТРТ. Рассматривали перхлоратные топливные композиции, содержащие 15 масс. % металлического горючего при коэффициенте избытка окислителя топлива 0,5.

Энергетические и термодинамические характеристики топливных композиций и состава газообразных продуктов сгорания определяли в результате термодинамического расчета. В работе при проведении термодинамических расчетов использовался многоцелевой программный комплекс «Астра-4», разработанный в МГТУ имени Н.Э. Баумана. Расчет проводили при давлении в камере 4МПа и на срезе сопла 1 МПа.

При разработке композиций для термодинамических расчетов учитывали содержание органического горючего, объемная доля которого в ТРТ не должна быть ниже определенной величины, обеспечивающей возможность изготовления зарядов с требуемыми физико-математическими свойствами, что определялось коэффициентом избытка окислителя порядка 0,5.

Компонентами ТРТ являются:

- 1) органическое горюче-связующее – бутадиеновый каучук СКДМ-80;
- 2) окислитель – перхлорат аммония ( $\text{NH}_4\text{ClO}_4$ );
- 3) металлическое горючее – индивидуальные металлы и механические смеси на их основе.

В качестве технологической добавки использовали отвердитель, который вводится в состав ТРТ в количестве 0,1–0,2 % от веса топливной массы и при проведении термодинамических расчетов не учитывается.

Расчет термодинамических характеристик ТРТ основывается на составлении эквивалентной формулы топливной системы и определении энтальпии образования.

Анализ полученных данных показал, что наиболее перспективным металлическим горючим является смесь металлов Al/Mg/V, взятых в соотношении 3/5/7. Единичный импульс ТРТ, содержащих такое металлическое горючее, порядка 264 с, что сопоставимо с единичным импульсом систем, содержащих алюминий, однако в продуктах сгорания полученной системы содержится в 1,9 раза меньше хлористого водорода (11,7 вместо 21,5 %) и в 1,4 раза меньше к-фазы.

Проведение термодинамических расчетов позволяет оценить эффективность использования металлических горючих без проведения обширного эксперимента, что существенно удешевляет разработку новых составов ТРТ.

#### *Литература*

1. Паушкин Я.М. Жидкие и твердые химические ракетные топлива. М.: Наука, 1978. 192 с.
2. Сарнер С. Химия ракетных топлив. М.: Мир, 1969. 488 с.
3. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В., Логачев В.С., Коротков А.И. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука, 1972. 294 с.
4. Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П. Теория ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1980. 536 с.

## **АСТРОМЕТРИЧЕСКАЯ ПОДДЕРЖКА ПОЗИЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ EROS ASTROMETRIC SUPPORT POSITIONAL OBSERVATIONS IN THE SOFTWARE PACKAGE EROS**

**М.О. Логинова, П.В. Скрипниченко, Т.Ю. Галушина**

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

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики

Томского государственного университета

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University

<sup>2</sup>Ural Federal University

<sup>3</sup>Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University

volna@sibmail.ru, pin-gvin-ka@yandex.ru

Процедура подготовки к проведению позиционных наблюдений – сложная задача, требующая многофункционального программного

обеспечения. На настоящее время процесс выбора объектов для исследования, вычисления эфемерид и составления программы наблюдений является достаточно трудоемким, так как каждый этап требует значительного количества времени.

С 2013 г. сотрудниками кафедры астрономии и геодезии УрФУ и НИИ ПММ ТГУ ведется разработка программного комплекса EROS (Ephemeris Researches and Observation Services), призванного упростить и автоматизировать все этапы подготовки к позиционным наблюдениям. Модульная структура – основа программного обеспечения (ПО), позволит пользователю как решать отдельные задачи, так и выполнять весь комплекс работ в целом.

Программный комплекс будет способен решать следующие задачи: вычисление продолжительности наблюдательной ночи по дате наблюдений; вычисление условий видимости конкретного объекта (задача поиска); выдача списка объектов, пригодных для наблюдений на заданную наблюдательную ночь; расчет эфемерид, в том числе обзорных эфемерид (для объектов с плохо определенной орбитой); составление программы наблюдений на основе пользовательских настроек (с учетом калибровочных снимков); синхронизация базы данных наблюдений с базой MPC, улучшение элементов орбит; автоматическое обновление собственного каталога элементов орбиты астероидов и пр.

На настоящее время ПО EROS содержит следующие модули:

- GUARD – вычисление продолжительности ночи, пошаговый принцип вычисления высоты, 4 варианта выбора расчетов: восход/заход, гражданские, навигационные или астрономические сумерки, учет рефракции и углового размера Солнца;

- HUNTER – поиск объекта, настраиваемые пользователем ограничения (поиск производится внутри вычисленной ночи или ночей, высота и абсолютная звездная астероидная величина), два режима работы (до тех пор, пока не найден или внутри интервала);

- SCOUT – формирует список объектов, пригодных для наблюдений на заданную ночь, настраиваемые ограничения (вычисление производится внутри вычисленной ночи или ночей, высота и абсолютная звездная астероидная величина);

- NUMERATOR – вычисление эфемерид, настраиваемые ограничения (вычисление производится внутри вычисленной ночи или ночей, высота и абсолютная звездная астероидная величина), варьируемая силовая функция.

В будущем планируется создание модулей:

- NUMERATOR++ – вычисление обзорных эфемерид;
- LIBRARIAN – обновление каталога элементов орбиты астероидов, основанный на существующем каталоге Боуэлла и связанный с базой MPC;
- APPRAISER – оценка размеров вероятностной области;

– GERHARD – составление программы наблюдений по пользовательским настройкам (ручной режим и автоматический с приоритетным выбором объектов).

Программный комплекс, после создания всех модулей будет осуществлять формирование программы наблюдений и способен работать в двух режимах: ручной и автоматический. Ручной режим предполагает полный контроль пользователя над ходом работы, что включает в себя необязательность доводить вычисления до формирования программы наблюдений. Пользователь сам решает, что надо вычислять сейчас и какие объекты, а какие действия следует упустить из-за ненужности для решения конкретной задачи. Автоматический режим – все действия комплекс выполняет сам с учетом сформированного пользователем списка настроек приоритета наблюдения малых тел Солнечной системы, т.е. другими словами начальные данные это список объектов и приоритетов, а на выходе готовая программа наблюдений.

## **ИЗМЕНЕНИЕ ОРБИТЫ СПУТНИКА ПОД ДЕЙСТВИЕМ МАЛОЙ ТРАНСВЕРСАЛЬНОЙ СИЛЫ CHANGING THE ORBIT UNDER THE ACTION OF THE SMALL TRANSVERSE FORCE**

**А.И. Маслова**

**A.I.Maslova**

Институт технической механики НАН Украины и ГКА Украины

Institute of Technical Mechanics NASU and SSAU

Maslova\_anjyta@mail.ru

Как известно, верхние ступени ракет, отработавшие космические аппараты, побочные продукты их функционирования и запусков – так называемый, космический мусор, на данный момент представляет собой реальную угрозу для новых космических объектов. Проект LEOSWEEP (improving Low Earth Orbit Security with Enhanced Electric Propulsion), победивший в рамках проводимого Европейской комиссией конкурса FP7-SPACE-2013, направлен на создание условий для активного удаления крупномасштабного космического мусора в ближайшем будущем. В проекте предполагается увод мусора осуществлять при помощи специального космического аппарата («пастуха»), который направляет на объект космического мусора поток ионов, передающий силовой импульс.

В рамках выполнения проекта возникла задача оценки изменения почти круговых орбит под действием малой силы, направленной по трансверсали к орбите. А именно: потребовалось оценить скорость снижения космического объекта и изменение эксцентриситета для изначально почти



круговых орбит. В докладе предложена методика, которая, как представляется, позволяет наиболее просто получить требуемые оценки.

Методика опирается на новые формы уравнений возмущенного кеплерового движения. Поскольку при действии на тело только трансверсальной силы ориентация орбиты не меняется, то движение объекта можно рассматривать в плоскости первоначальной орбиты. Примем в качестве опорной орбиты круговую Кеплерову орбиту. Тогда движение объекта по возмущенной орбите можно описать в виде

$$R = p(1 + b_1), \quad \dot{p} = -\sqrt{\frac{\mu}{p^3}} \bar{p}, \quad p = p_0(1 + \gamma),$$

где  $R$  - расстояние от центра Земли до центра масс объекта;  $p$  - фокальный параметр орбиты;  $p_0$  - начальное значение фокального параметра;  $b_1, b_2, \gamma$  - малые величины;  $\mu$  - гравитационная постоянная, точка означает производную по времени.

При действии на центр масс малого постоянного ускорения  $F_T$ , направленного по трансверсали к орбите, уравнения возмущенного движения имеют вид

$$\dot{u} = \frac{\sqrt{\mu n}}{K^2} \dot{u}, \quad \dot{u} = \frac{\sqrt{\mu}}{K^2}, \quad \dot{u} = \frac{\sqrt{\mu}}{K^2} \left( 1 - \frac{F_T}{\mu} \right), \quad \dot{u} = \frac{\sqrt{\mu}}{K^2} \left( 1 - \frac{F_T}{\mu} \right) - \sqrt{\frac{\mu}{p^3}} \frac{b_1}{(1 + b_1)^3},$$

где  $u$  - аргумент широты.

В случае, когда  $F_T = const \ll 1$  вводятся новые переменные, описывающие амплитуду ( $A$ ) и фазу ( $\Omega$ ) колебаний  $b_1, b_2$ .

$$b_1 = A \sin \Omega, \quad b_2 = A \cos \Omega.$$

Осреднение полученных уравнений по быстрой переменной  $\Omega$  позволяет построить простую систему сравнения, которая с точностью порядка  $\varepsilon = \max\{A^2, F_T/(\mu/p^2)\}$  описывает изменение медленных переменных на интервале времени порядка  $2\pi/\varepsilon$ .

Изменение фокального параметра  $p$  и амплитуды  $A$  оцениваются формулами

$$p = \frac{p_0}{\left(1 - \sqrt{\frac{p_0}{\mu}} F_T t\right)^2}, \quad A = A_0 \left(\frac{p_0}{p}\right)^{3/4},$$

где  $t$  - время.

Тогда, при действии на тело малого возмущающего трансверсального ускорения, направленного в противоположную сторону его движения ( $F_T < 0$ ), фокальный параметр будет медленно уменьшаться относительно своего начального значения; амплитуда (эксцентриситет) растет, но этот рост весьма незначителен. Например, при снижении орбиты с 1000 км до 500 км амплитуда (или эксцентриситет мгновенной орбиты) увеличится менее чем на 5.4 %. Поэтому, можно говорить, что малое трансверсальное ускорение не меняет характера почти круговой орбиты центра масс.

## СОПОСТАВЛЕНИЕ ДВУХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ХАОТИЧНОСТИ В ДИНАМИКЕ ОКОЛОЗЕМНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ COMPARISON OF TWO METHODS OF ESTIMATION CHAOTIC IN THE DYNAMICS OF NEAR-EARTH SPACE OBJECTS

**Р.Р. Менибаев, И.В. Томилова, П.В. Куликова**

**R.R. Menibaev, I.V. Tomilova, P.V. Kulikova**

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

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики

Томского государственного университета

<sup>3</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University

<sup>2</sup>Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University

<sup>3</sup>Tomsk State University of Architecture and Building

marat-dnv@mail.ru, irisha\_tom@mail.ru, polinka@asd.iao.ru

Известно [1], что источником возникновения хаотичности в движении космических, в том числе, околоземных объектов является совместное действие резонансов различных типов, причем хаотичность возникает при вхождении объекта в резонанс. Для выявления хаотичности используются различные индикаторы. Одним из наиболее эффективных является усредненный параметр MEGNO (Mean Exponential Growth of Nearby Orbit) [2, 3], который представляет собой взвешенную по времени интегральную форму ляпуновского характеристического числа. Параметр MEGNO дает представление о расхождении в фазовом пространстве первоначально близких орбит. В работе [4] предпринята попытка использовать для выявления хаотичности интегральную автокорреляционную функцию, которая позволяет рассмотреть наличие или отсутствие регулярности в каждом из элементов орбиты.

Известно, что для постоянных временных рядов интегральная автокорреляционная функция  $I$  асимптотически стремится к 1. Для равномерного временного ряда, представляющего периодическую функцию типа синус, функция  $I$  равна 0.5. Для других периодических и квазипериодических временных рядов  $I$  стремится к нулю.

В работах [5–7] представлены результаты обширного численно-аналитического эксперимента, целью которого было изучение распространенности вековых резонансов в околоземном орбитальном пространстве. Для проведения данного эксперимента были выбраны 200 моделей в следующих диапазонах параметров:

$$e = \{0.01, 0.1 - 0.8 \text{ с шагом } 0.1\};$$

$$i = \{10^\circ - 90^\circ \text{ с шагом } 5^\circ\};$$

$$a = \{8000 \text{ км} - 55000 \text{ км с шагом } 1 \text{ км}\}.$$

Для полученных моделей движения околоземных объектов были определены особенности их орбитальной эволюции, включая MEGNO-анализ. Эти особенности были сопоставлены с наличием в движении объектов тех или иных вековых резонансов.

В настоящей работе на примере тех же 200 моделей движения мы попытались оценить возможности использования интегральной автокорреляционной функции для исследования особенностей динамики околоземных объектов. Нас интересовало, прежде всего, можно ли с помощью этого математического аппарата надежно выявлять наличие хаотичности в движении объектов, поэтому оценки, полученные с помощью интегральных автокорреляционных функций, были сопоставлены с результатами MEGNO-анализа.

Используя равномерно распределенные на интервале 100 лет данные об эволюции орбитальных параметров объектов, были получены значения интегральной автокорреляционной функции по трем позиционным орбитальным параметрам: большой полуоси –  $I_a$ , эксцентриситету –  $I_e$  и наклонению –  $I_i$ . Общий анализ полученных результатов показывает, что в большинстве случаев оценки регулярности движения по параметру MEGNO и с помощью автокорреляционных функций совпадают, а в сложных случаях оценки дополняют друг друга, расширяя информацию о характере изменения основных параметров орбиты.

### *Литература*

1. Мюррей К., Дермотт С. Динамика Солнечной системы. М.: Физматлит, 2009, 588 с.
2. Cincotta P.M., Girdano C.M., Simo C. Phase space structure of multi-dimensional systems by means of the mean exponential growth factor of nearby orbits // *Physica D*. 2003. Vol. 182. P. 151–178.
3. Valk S. [et al]. Global dynamics of high area-to-mass ratios GEO space debris by means of the MEGNO indicator // *Adv. Space Res.* 2009. Vol. 43. P. 1509–1526.
4. Kuznetsov E., Zakharova P. Dynamical evolution of space debris on high-elliptical orbits near high-order resonance zones // 40th COSPAR Scientific Assembly. Abstract PEDAS. 1-22-14
5. Томилова И.В., Чувашов И.Н., Бордовицына Т.В. Вековых резонансы как источник хаотичности в движении околоземных космических объектов по почти круговым орбитам // *Изв. вузов. Физика*. 2013. Т. 56, № 10/2. С. 159–165.

6. *Бордовицына Т.В., Томилова И.В.* Вековые резонансы в динамической эволюции околоземных космических объектов на вытянутых // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57. № 4. С. 84–91.

7. *Бордовицына Т.В., Томилова И.В.* Вековые резонансы в динамической эволюции околоземных космических объектов на приполярных орбитах // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57. № 6. С. 102–109.

## **ЦИФРОВОЙ ФОРМИРОВАТЕЛЬ ЗАДЕРЖКИ ИМПУЛЬСА ДЛЯ СИНХРОНИЗАЦИИ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ DIGITAL SHAPER PULSE DELAY FOR SYNCHRONIZATION FAST PROCESSES**

**А.Ю. Саммель, В.В. Буркин, А.Н. Ищенко, Л.В. Корольков, К.С. Рогаев,  
В.В. Фарапонов, А.С. Дьячковский, Е.Ю. Степанов, А.В. Чупашев  
А.Y. Sammel, V.V. Burkin, A.N. Ishchenko, L.V. Korolkov, K.S. Rogaev,  
V.V. Farapov, A.S. Diachkovski, E.Y. Stepanov, A.V. Chupashev**

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики  
Томского государственного университета

Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University  
anton\_sammel@mail.ru

Применение высокоскоростной фото-видео аппаратуры в исследовании быстропротекающих процессов метания макротел и взаимодействия их с различными объектами существенно обогащает объем полезной экспериментальной информации.

Ключевым вопросом в повышении эффективности использования высокоскоростной съемки является надежная синхронизация срабатывания фото-видео камер и осветительных средств. Эта задача значительно усложняется при необходимости регистрации объекта в разных оптических сечениях траектории его движения.

Для обеспечения необходимых требований по синхронизации срабатывания импульсных осветителей и фото-видео аппаратуры, разработан и испытан 4-канальный формирователь задержки импульса (ФЗИ-4).

Пусковым сигналом служит аналоговый сигнал с индукционного датчика скорости (ДС), установленного непосредственно на канал ускорителя. При прохождении метаемым телом сечения датчика, на его выходе вырабатывается сигнал, амплитудой в диапазоне 0.5-10В. Сигнал с ДС поступает на ФЗИ-4. В устройстве предусмотрена регулировка порога срабатывания формирователя импульса в диапазоне 0.2–5В. Далее, логический импульс с формирователя идет на цифровой формирователь задержки. В зависимости от установленных пользователем настроек, формирователь задержки выдерживает необходимую паузу, индивидуальную для каждого из каналов, и формирует цифровые сигналы на аналоговые выходные каскады каждого из каналов, выходы которых подключены к фото-видео аппаратуре и импульсным осветителям.

Задержка регулируется в диапазоне  $1-65 \cdot 10^6$  мкс. с шагом 1 мкс. С учетом постоянной задержки устройства, равной 500 нс, длительность минимальной задержки не менее 1.5 мкс. Выходной каскад каждого канала обеспечивает ток до 100 мА, амплитудой 5В.

На передней панели корпуса прибора выведен разъем входа формирователя импульса и 4 разъема выхода. Там же расположена ручка регулировки порога срабатывания формирователя и кнопка ручного пуска формирователя. На верхней части корпуса установлен символьный жидкокристаллический дисплей для отображения значения задержки каждого из каналов в микросекундах. Так же, на дисплей выводится порог срабатывания формирователя импульса. С помощью трех пользовательских кнопок, расположенных справа от дисплея, оператор может менять значения задержек для каждого из каналов.

Применение данного устройства, значительно упростило процесс подготовки и проведения фото-, видеорегистрации в баллистических экспериментах.

#### *Литература*

1. Ищенко А.Н., Афанасьева С.А., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Зыков Е.Н., Хабибулин М.В. // Расчетно-экспериментальный метод исследования высокоскоростного взаимодействия тел с подводными преградами: учеб. пособие. 2013. Томск: Изд-во НТЛ.

2. Дьячковский А.С., Чупашев А.В. // Использование высокоскоростной камеры Cordin 530 для визуализации баллистических экспериментов: сб. материалов 2-й Всероссийской молодежной научной конференции «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики», посвященной 50-летию физико-технического факультета Томского государственного университета. Томск: ТГУ, 2012. 233 с.

## **ВЛИЯНИЕ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ОШИБОК НА ДИНАМИКУ ДВИЖЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ АСТЕРОИДОВ THE INFLUENCE OF SYSTEMATIC ERRORS ON THE MOTION DYNAMICS OF POTENTIALLY HAZARDOUS ASTEROIDS**

**Г.Е. Самбаров, О.М. Сюсина**

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

Национальный исследовательский Томский государственный университет.

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики

Томского государственного университета

National research Tomsk State University

Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University

detovelli@vtomske.ru, kleo77@sibmail.com

В настоящее время анализ динамики потенциально опасных астероидов(ПОА) является наиболее важной задачей небесной механики. Для приближенной оценки этой угрозы используется вероятностный метод

определения орбит небесных тел. Важной частью данного исследования является создание модели движения, наиболее точным образом описывающей траекторию движения изучаемого объекта. В зависимости от типа орбиты и существование вероятностного столкновения с конкретными планетами Солнечной системы, силовая функция может содержать различный набор обязательных компонентов, значимость каждого из которых предварительно необходимо оценить. От степени достоверности и полноты модели во многом зависит более правдоподобная картина попадания изучаемого объекта в расчетную область возможных движений астероида и для точного исследования эволюции объекта. В работах [1, 2] нами был предложен способ оценивания точности модели движения астероида, основанный на вычислении показателя смещения доверительной области. В этом способе ошибки модели сил тесно связываются с размерами доверительных областей и смещениями НК-оценок, определяемых для альтернативных моделей движения астероидов. Сравнительный анализ моделей возмущающих сил осуществляется на основе показателя, имеющий геометрически ясный и простой вид. Если значение данного показателя меньше некоторого порогового значения, то полагаем, что смещение НК-оценок можно считать малыми по сравнению с размерами доверительных областей и исключение воздействующих факторов имеет незначительное влияние. Для оценивания смещения доверительных областей были использованы численные модели движения и реальные наблюдения объектов. Сама модель движения включала в себя гравитационные возмущения от больших планет, Луны, Плутона, сжатия Земли и релятивистские эффекты от Солнца.

На примере ряда астероидов приводятся оценки влияния ошибок модели движения на точность построения доверительных областей с дополнительным отображением исследования на эволюционную составляющую. В данной работе, мы осуществляем отображение области во времени и проводим анализ движения астероидов, выше описанным способом, применяя его к исследованию движения объектов, относящихся к категории ПОА. В ходе такого исследования была определена точность модели движения объектов на более длительных интервалах.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 12-02-00220-а.

### *Литература*

1. Сюсина О. М., Самбаров Г. Е., Черницов А. М., Тамаров В.А. Исследование влияния ошибок модели движения астероидов на точность построения начальной доверительной области // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 10/2. С. 50–59.
2. Сюсина О.М., Черницов А.М., Тамаров В.А., Самбаров Г.Е. Способ оценки влияния модели сил на систематическую ошибку определения областей возможных движений астероидов // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 6/3. С. 235–237.

**ИНФОРМАЦИОННО ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС  
НИИ ПММ ТГУ  
RSI OF APPLIED MATHEMATICS AND MECHANICS (TSU)**

**А.Ю. Саммель, В.В. Буркин, А.Н. Ищенко, Л.В. Корольков, К.С. Робаев,  
А.С. Дьячковский, Е.Ю. Степанов, А.В. Чупашев  
A.Y.Sammel, V.V. Burkin, A.N. Ishchenko, L.V. Korolkov, K.S. Rogaev,  
A.S. Diachkovski, E.Y.Stepanov, A.V. Chupashev.**

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики  
Томского государственного университета  
Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University  
anton\_sammel@mail.ru

Некоторые научной деятельности нашего института связаны с исследованиями закономерностей импульсных газодинамических процессов и электромеханического преобразования энергии в энергетических установках [1, 2]. Все работы реализуются на баллистическом испытательном стенде, который включает в себя манометрические, сопловые, электротермохимические камеры высокого давления, оригинальные пороховые, электродинамические, электротермические, электротермохимические установки. В процессе экспериментов был создан уникальный измерительный комплекс, позволяющий регистрировать и оценивать практически весь спектр процессов, связанных как с внутренней, так и с внешней баллистикой.

Объединение исследуемых технологий метания в единый измерительно-регистрирующий комплекс (ИРК) позволяет не только анализировать каждую технологию самостоятельно, но и оперативно сопоставлять результаты исследований, полученных с применением различных схем метания, прогнозировать возможные пути их совершенствования. ИРК включает набор необходимых датчиков, парк приборов, системы дистанционного измерения и передачи информации об электрофизических и баллистических характеристиках на пульт управления комплексом [3, 4].

Возможности ИРК постоянно расширяются, совершенствуются методы и средства извлечения полезной информации из эксперимента с заданной точностью и достоверностью. Задачи 2014 г. по метрологическому обеспечению и сопровождению проводимой экспериментальной работы в основном были решены. Мы получили возможность измерять скорость метаемого элемента в канале ускорителя радаром ДДС 6000 (Тверь). Значительную долю информации о внешнетраекторных процессах (поведение метаемых элементов на траектории, процессы разделения ведущих частей, процессы воздействия метаемых ударников на преграды) мы получаем, используя различные системы скоростной фото и видео регистрации. В ходе внутрибаллистических исследований, большое значение имеет начальная температура заряда ВВ. Термостатирование зарядов ВВ осуществляется в климатической камере ТХ-60, управление и

контроль которой ведется дистанционно. Для оценки электромагнитных полей, генерируемых в процессе работы системы электропитания, используется антенна Пб-43.

Освоение и совершенствование новых способов и методов получения полезной информации позволило разработать оригинальный расчетно-экспериментальный метод [5]. В процессе разработки еще ряд методик исследования быстропротекающих процессов. С целью повышения точности измеряемых параметров разрабатывается методика тарировки индукционных датчиков скорости. В стадии освоения крешерный и тензометрический методы измерения пиковых давлений.

Текущее расширение возможностей ИРК позволяет выполнять на баллистическом стенде НИИ ПММ ТГУ дополнительные исследования по влиянию температуры на баллистические показатели выстрела, наблюдать состояние и поведение метаемых элементов на траектории в классических и нетрадиционных схемах высокоскоростного метания.

### *Литература*

1. Бураков В.А., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Зыков Е.Н., Ищенко А.Н., Касимов В.З., Саморокова Н.М., Плешаков Д.В. // Опыт применения пластоизоляционных топлив в режиме присоединенного заряда. Сб. докладов конференции. Томск: Изд-во ТГУ, 2011. 139 с.

2. Бураков В.А., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Зыков Е.Н., Ищенко А.Н., Касимов В.З., Саморокова Н.М. // Изучение особенности горения замедлителя в манометрических и баллистических экспериментах. Сб. докладов конференции. Томск: Изд-во ТГУ, 2011. 140 с.

3. Буркин В.В., Дьячковский А.С., Егоров А.Л., Зыков Е.Н., Ищенко А.Н., Фарапонов В.В. // Использование ИРК баллистического стенда НИИ ПММ ТГУ для исследования различных технологий высокоскоростного метания. Сб. докладов конференции. Томск: Изд-во ТГУ, 2011. 144 с.

4. Буркин В.В., Ищенко А.Н., Касимов В.З., Егоров А.Л., Фарапонов В.В., Зыков Е.Н., Дьячковский А.С., Степанов Е.Ю. // Измерительно-регистрирующий комплекс баллистического стенда НИИ ПММ ТГУ. Сб. докладов конференции. Томск: Изд-во ТГУ, 2011. 146 с.

5. Ищенко А.Н., Афанасьева С. А., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Зыков Е.Н., Хабибуллин М.В. // Расчетно-экспериментальный метод исследования высокоскоростного взаимодействия тел с подводными преградами: учеб. пособие Томск: Изд-во НТЛ. 2013.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВВОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ПОРОХОВОЙ ЗАРЯД SIMULATION INPUT ELECTRICAL ENERGY INTO THE POWDER CHARGE**

**А.Н. Ищенко, А.С. Дьячковский, В.З. Касимов,  
Н.М. Саморокова, А.Д. Сидоров, Е.Ю. Степанов**

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики

Томского государственного университета

Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University

alex\_sid92@mail.ru

Явление выстрела представляет совокупность сложных физико-химических и механических процессов, протекающих достаточно быстро.



Для артиллерийского орудия это: зажигание, воспламенение и горение метательного заряда [1]. Как правило, воспламенение порохового заряда производится с помощью электро-капсюльной втулки (ЭКВ). Существует другой метод воспламенения- с помощью введения электрической энергии, что дает возможность повысить КПД выстрела [2]. Ввод электрической энергии при помощи инжектора плазмы [3] сопровождается взрывом тонкой медной проволоочки. Воспламенение топлива с помощью электроввода имеет преимущество над ЭКВ, потому что данный метод дает возможность управлять баллистическими характеристиками выстрела, что представляет собой практическую ценность.

В ряде математических моделей высокоскоростного метания не предусмотрен прямой ввод энергии. Один из вариантов моделирования ввода электрической энергии – увеличение энергетике пороха. В рамках данной работы ввод энергии моделировался иначе – с помощью введения условного быстрогорящего топлива (УБТ). В отличие от первого способа, предложенный метод дает возможность задать время и характер ввода энергии.

Рассмотрим на примере одного опыта. В эксперименте измеряются напряжение  $U$  и ток  $I$  на разрядном промежутке. Энергия, введенная к моменту времени  $t$ :

$$q(t) = \int_0^t U(t)I(t)dt, \quad (1), \quad \text{суммарная энергия:} \quad Q = \int_0^{t_3} U(t)I(t)dt \quad (2),$$

где  $t_3$  – время электроввода.

Аналогично порохам [1] для УБТ введены следующие параметры: масса топлива равна массе проволоочки  $\omega = m_{\text{пр}}$ , а также геометрические размеры соответствуют размерам проволоочки. А именно: толщина горящего свода  $e_1 = r_{\text{пр}}$ , начальная поверхность горения  $S_1 = 2\pi(r_{\text{пр}}^2 + r_{\text{пр}}h_{\text{пр}})$ , начальный объем  $\Lambda_1 = \pi r_{\text{пр}}^2 h_{\text{пр}}$ . Скорость горения определяет время электроввода  $t_3: U = e_1/t_3$  (3). Сила определяет величину введенной энергии  $f = \frac{k \cdot Q \cdot (\gamma - 1)}{\omega}$  (4), где  $k$  – КПД электроввода,  $\gamma$  – показатель адиабаты. Полагаем коэффциент  $\alpha = 0$ , так как доля этого топлива очень мала по сравнению с основным зарядом, поверхность горения  $\sigma$  ( $\psi$ ) определяет характер ввода энергии, где  $\psi$  - доля сгоревшего УБТ равная доле введенной энергии:

$$\psi = \frac{\omega_{\text{сг}}}{\omega} = \frac{q}{Q} \quad (5)$$

Поверхность горения задается следующим образом. Скоростью газообразования или объемной скоростью горения называют величину  $\frac{d\psi}{dt}$ , представляющую собою относительную часть массы пороха, сгоревшего в единицу времени [1]:

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{S_1}{\Lambda_1} u \sigma, \quad (6)$$

Скорость горения УБТ не зависит от давления, поэтому  $u$  заменим на  $u_1$ , выразим  $\sigma$ :  $\sigma = \frac{d\psi}{dt} \frac{\Lambda_1}{S_1} \frac{1}{u_1}$ , с учетом (1) и (3):

$$\sigma = \frac{dq}{dt} \frac{t_{\text{Э}}}{Q} \frac{\Lambda_1}{S_1 e_1} = UI \frac{t_{\text{Э}}}{Q} \frac{\Lambda_1}{S_1 e_1} \quad (7)$$

По формуле (7) была рассчитана  $\sigma(\psi)$  для данного эксперимента. Если имеется серия экспериментов, целесообразно найти усредненную относительную поверхность горения.

Для рассматриваемого опыта был проведен расчет, в котором ввод энергии в замкнутом объеме  $W = 2.02 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$  моделировался сгоранием УБТ, для которого  $\omega = 1 \text{ г}$ ,  $f = 3.8 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$ ,  $t_{\text{Э}} = 1.6 \text{ мс}$ . На полученной кривой

видно, что УБТ сгорает за время электроввода и дает максимальное давление,  $P_{\text{Э}}$  (9), соответствующее введенной в этом опыте энергии. Основной пороховой заряд при этом отсутствует. Максимальное давление при горении пороха в замкнутом объеме [1]:

$$P_{\text{max}} = \frac{f}{\frac{W}{\omega} - \alpha}, \quad (8)$$

или в данном случае

$$P_{\text{Э}} = \frac{k \cdot Q \cdot (\gamma - 1)}{W} = 34.8 \text{ МПа} \quad (9)$$

где  $W$  – объем камеры сгорания.

Таким образом, в данной работе был предложен один из возможных вариантов учета ввода электрической энергии в пороховой заряд. Этот метод имеет преимущество над методом учета ввода энергии с помощью повышения энергетика заряда, так как дает возможность учитывать время и характер ввода электроэнергии. Недостатком является то, что таким образом введена полностью вся энергия. Реально, часть энергии идет на воспламенение пороха и его нагревание – увеличение его энергетика. Возможное решение этой проблемы – достижение определенного сочетания увеличения энергетика пороха и введения УБТ.

### Литература

1. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет / М.Е. Серебряков. М.: Оборонгиз, 1962. 703 с.
2. Plasma ignition and combustion / A. Koleczko [and oth.] // 19<sup>th</sup> International Symposium of Ballistics. 2001. P. 195–202.
3. Пат. 129034 Российская Федерация, МПК В23К 10/00. Инжектор плазмы для иницирования заряда взрывчатого вещества / В.В. Буркин, А.Н. Ищенко, В.А.Бураков, Л.В. Корольков, М.С. Барышев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский Томский государственный университет. Опубл. 26.10.2012, Бюл. № 17.

# **ВЕКОВЫЕ РЕЗОНАНСЫ В ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ОБЪЕКТОВ ЗОНЫ СУПЕР-ГЕО SECULAR RESONANCES IN DYNAMICAL EVOLUTION OF OBJECTS IN SUPER-GEO REGION**

**И.В. Томилова, А.Г. Александрова  
I.V. Tomilova, A.G. Aleksandrova**

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики  
Томского государственного университета  
Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University  
irisha\_tom@mail.ru, aleksann@sibmail.com

В данной работе рассматривается влияние вековых резонансов на долговременную орбитальную эволюцию объектов расширенной зоны супер-ГЕО. Под объектами зоны супер-ГЕО обычно подразумевают такие объекты, перигеи орбит которых находятся выше геостационарной зоны на 235 км выше [1].

В работах [2–4] было показано, что вековые резонансы явление весьма распространенное в околоземном орбитальном пространстве. Они оказывают заметное влияние на долговременную орбитальную эволюцию околоземных объектов. При наложении этих резонансов на орбитальные (тессеральные) резонансы, а также при совместном действии нескольких вековых резонансов возможно возникновение хаотичности в движении объектов.

В данном исследовании используется методика, предложенная в [2] и дополненная анализом связанных с вековыми резонансами критических аргументов. Анализ эволюции критического аргумента позволяет определить, является ли действие данного векового резонанса устойчивым.

Методика исследований состоит из трех частей: аналитического способа выявления вековых резонансов [2], численного моделирования долговременной орбитальной эволюции с помощью программного комплекса «Численная модель движения систем ИСЗ» [7] и MEGNO-анализа орбитальной эволюции объектов [8].

Под расширенной зоной супер-ГЕО в настоящем исследовании понимается область орбитального пространства в диапазоне больших полуосей от 45000 до 60000 км и в диапазоне наклонов от 0 до 90°. Именно этой области околоземного пространства и посвящены наши исследования. Шаг по большой полуоси был выбран равным 200 м, а по наклону – 1°. Эксцентриситет был выбран равным 0,001. Для каждой модельной орбиты, полученной таким образом, были сделаны оценки величин всех 29 резонансных соотношений [6]. Среди этих резонансных соотношений были выделены все, переходящие через нулевое значение. Кроме того была исследована эволюция всех критических аргументов, соответствующих данным вековым резонансам.

Результаты показывают, что в интервале наклонений от 0 до 50° совместное влияние устойчивых нодально-апсидальных вековых резонансов не приводит к нарушению регулярности движения. Начиная с наклонений, равных 55°, на движение объектов начинает действовать резонанс Лидова–Козаи, что приводит к резкому возрастанию эксцентриситетов орбит.

Критический аргумент резонанса Лидова–Козаи имеет устойчивую либрационную эволюцию во всем диапазоне рассматриваемых больших полуосей, и в диапазоне наклонений от 55 до 90°. Это говорит о том, что в этой области орбитального пространства имеет место устойчивое равновесие в действии на вековое движение перицентров орбит объектов трех возмущающих факторов: сжатия Земли и притяжения Луны и Солнца. Хаотичность вызывается наложением на устойчивый вековой резонанс одного или нескольких резонансов, для которых критический аргумент меняет либрационный характер изменения на циркуляционный и обратно.

### *Литература*

1. Flury W. [et al]. Searching for small debris in the geostationary ring // ESA Bulletin. 2000. Vol. 104. P. 92–100.

2. Бордовицына Т.В., Томилова И.В., Чувашов И.Н. Вековые резонансы как источник возникновения динамической хаотичности в долговременной орбитальной эволюции неуправляемых объектов спутниковых радионавигационных систем // Астрон. вест. 2012. Т. 46. № 5. С. 356–368.

3. Томилова И.В., Чувашов И.Н., Бордовицына Т.В. Вековых резонансы как источник хаотичности в движении околоземных космических объектов по почти круговым орбитам // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 10/2. С. 159–165.

4. Бордовицына Т.В., Томилова И.В., Чувашов И.Н. Вековые резонансы как источник возникновения динамической хаотичности в долговременной орбитальной эволюции неуправляемых объектов спутниковых радионавигационных систем // Астрон. вест. 2014. Т. 48. № 4. С. 280–289.

5. Бордовицына Т.В. [и др.] Численное моделирование движения систем ИСЗ в среде параллельных вычислений // Изв. вузов. Физика. 2009. Т. 52. № 12/2. С. 5–11.

6. Бордовицына Т.В., Александрова А.Г., Чувашов И.Н. Комплекс алгоритмов и программ для исследования хаотичности в динамике искусственных спутников Земли // Изв. вузов. Физика. 2010. Т. 53. № 8/2. С. 14–21.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ БАЗИСНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ МЕТЕОРОВ НА ЗЕМЛЕ MODELLING OF DOUBLE-STATION METEOR OBSERVATIONS ON THE EARTH**

**Н.С. Худяшев**

**N.S. Khudyashev**

Национальный исследовательский Томский государственный университет

National Research Tomsk State University

khudyashev@icloud.com

Базисные наблюдения метеоров с целью определения их орбит ведутся с двух или более станций, направленных на заранее вычисленную точку

радианта. Используются только те метеоры, которые попали в поле зрения двух или трёх станций, т.е. в некоторую область пространства, образованную пересечением конусов наблюдения. Отсюда может возникнуть ситуация, когда одни метеоры имеют меньшую вероятность попасть в эту область, чем другие. В этом и заключается геометрический фактор селекции.

Цель исследования: выяснить, является ли наблюдаемая выборка метеоров представительной. Вполне возможно, что на статистические характеристики выборки оказывает влияние наблюдательная селекция, в частности, геометрический фактор.

Геометрическая селективность фотографических наблюдений метеоров изучалась в 1970–1980-е гг. Публикаций на эту тему имеется немного (например, [1]). Главным образом они были посвящены вычислению весовых коэффициентов замечаемости. Однако нигде не рассматривался вопрос репрезентативности наблюдаемой выборки метеоров, тем более для видео наблюдений.

В работе рассматривается задача о встрече метеороида с Землей: моделирование входа метеороида в атмосферу, траектории метеора и видимости его с определённых станций на Земле [6]. В данном исследовании использована упрощенная модель взаимодействия: полагаем Землю эллипсоидом, не учитываем влияние притяжения Земли на траекторию метеороида, не учитываем влияние на метеороид негравитационных сил.

Модель метеороидного потока Геминид дана научным руководителем (Рябовой Г.О.) в виде пучка орбит (30000 орбит), каждая из которых задана пятью элементами [7]. Моделирование базисных наблюдений с Земли можно описать следующим образом [2,3–5]. Вначале находим пересечение орбит метеороида и Земли. Далее получаем радиант и скорость движения метеороида, в точке его вхождения в атмосферу. Затем отбираем метеоры, попавшие в область пересечения конусов наблюдений станций, и находим их видимую траекторию (след).

На основе этих результатов планируется сравнение двух выборок метеороидов: попавших в область наблюдения станций и не попавших в нее, с целью установить, нет ли значимых статистических различий между ними.

### *Литература*

1. Андреев В.В., Белькович О.И., Тохтасьев В.С. Эффект селекции при фотографических наблюдениях метеоров // *Астрономический вестник*. 1983. Т. 17. № 4. С. 244–248.
2. *Астрономический календарь*. Постоянная часть / В.А. Бронштэн, М.М. Дагаев, Э.В. Кононович, П.Г. Куликовский; отв. ред. В.К. Абалакин. 7-е изд., перераб. М.: Наука, 1981. 704 с.

3. Морозов В.П. Курс сфероидической геодезии. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1979. 295 с.
4. Справочник по математике для научных работников и инженеров определения, теоремы, формулы / Г. Корн, Т. Корн; под общ. ред. И.Г. Арамановича. 2-е изд. М.: Наука, 1970. 720 с.
5. Эскобал П. Методы определения орбит / пер с англ.; под ред. В.Г. Демина. М.: Мир, 1970. 472 с.
6. Koschny D., Bettonvil F., Licandro J. et al. A double-station meteor camera set-up in the Canary Islands – CILBO // Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems. 2013. № 2. P. 339–348.
7. Ryabova G.O. Mathematical modelling of the Geminid meteoroid stream // Mon. Not. R. Astr. Soc. 2007. Vol. 375. P. 1371–1380.

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ СБОРА ДАННЫХ ЭЛЕКТРОБАЛЛИСТИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА AUTOMATION OF DATA COLLECTION ELECTRIC BALLISTIC EXPERIMENTS**

**А.Ю. Саммель, В.В. Буркин, А.Н. Ищенко, Л.В. Корольков, К.С. Рогаев,  
Е.Ю. Степанов, А.В. Чупашев  
A.Y. Sammel, V.V. Burkin, A.N. Ishchenko, L.V. Korolkov, K.S. Rogaev,  
E.Y. Stepanov, A.V. Chupashev.**

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики  
Томского государственного университета  
Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University  
anton\_sammel@mail.ru

Проведение баллистических экспериментов связано с большим количеством измеряемых электрофизических и баллистических параметров. В комплексном эксперименте требуются измерения: скорости метаемого элемента на срезе и в канале ускорителя, давления продуктов сгорания в фиксированных сечениях установки, зависимости силы тока и падения напряжения на различных участках электрической цепи, электромагнитных помех генерируемых при использовании электро-разрядных устройств. В регистрации этих параметров задействовано до 8 осциллографов. Наиболее важные данные регистрируются с помощью осциллографов марки Tektronix DPO2014.

Стандартным приложением для работы с этим осциллографом, предоставляемым компанией Tektronix, является OpenChoice Desktop. Это приложение не распространяет свои возможности на работу одновременно с несколькими осциллографами, что существенно увеличивает время работы оператора, требует ручного ввода имен сохраняемых файлов и директории сохранения.

Для расширения возможностей сервисного пакета приложения разработано дополнение в виде приложения AutoTek-2014, автоматизи-

рующие его работу по сбору результатов эксперимента с нескольких осциллографов. Приложение написано в среде Delphi с использованием многопоточного режима.

Приложение AutoTek-2014 обеспечивает:

- 1) сохранение осциллограмм в формате .txt, .dat;
- 2) сохранение настроек приложения;
- 3) одновременную загрузку осциллограмм с нескольких осциллографов;
- 4) сохраняет отображаемую на дисплее осциллографа информацию;
- 5) просмотр загруженных осциллограмм.

На панели приложения имеется возможность задания директории сохранения, количество использующихся осциллографов, выбор сохраняемых каналов, подписи для каждого канала и задание имени сохраняемого файла для каждого осциллографа.

Тестирование приложения проводилось на информационно-регистрирующем комплексе НИИ ПММ ТГУ.

В результате использования разработанного приложения время на сбор экспериментальных данных уменьшается в несколько раз, по сравнению со стандартным приложением. Получаемые экспериментальные данные сохраняются в удобном для пользователя формате. Разработанное дополнительное приложение допускает развитие автоматизации обработки экспериментальных данных, в том числе на расширение числа методов обработки сигналов.

#### *Литература*

1. Буркин В.В., Ищенко А.Н., Касимов В.З. и др. Измерительно-регистрирующий комплекс баллистического стенда НИИ ПММ ТГУ // *Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики*. Томск. 2011. С. 146–147.
2. *Архангельский А.Я.* Программирование в Delphi 7. М.: Бином, 2003. 1152 с.

## **РЕДУКЦИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ВЫСОТ К ПОВЕРХНОСТИ ОТНОСИМОСТИ КВАЗИГЕОИДА ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ГНСС THE TRANSFORMATION OF GEODETIC HEIGHTS TO THE REFERENCE SURFACE OF QUASI-GEOID FOR PRECISE LEVELING BY GNSS OBSERVATION**

**К.В. Шаповалова  
K.V. Shapovalova**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University  
saaw@ngs.ru

На сегодняшний день основным и самым надежным методом высокоточного определения высот (превышений) в физическом ее

понимании является геометрическое нивелирование. Данный метод предполагает прямые измерения величин, так как превышения определяются относительно плоскости, нормалью к которой является отвесная линия.

С активным внедрением технологий спутниковых координатных определений, альтернативой геометрическому нивелированию является определение высот по данным наблюдений ГНСС. Главным недостатком этого метода является косвенное определение величин, а также получение значений превышений отнесенных к референц-эллипсоиду. В РФ в качестве отсчетной поверхности принята поверхность квазигеоида и высоты относят к балтийской системе нормальных высот. В планетарном масштабе связь данных систем реализована в виде моделей квазигеоида, определенных как набор превышений высот геоида над эллипсоидом по регулярной сетке. Поверхность квазигеоида рассчитана на сегодняшний день с точностью порядка 1 м, что явно недостаточно для целей высокоточного нивелирования. Вместе с тем, установлено, что для расчета высот глобального квазигеоида с более высокой точностью требуется знание аномалий силы тяжести с погрешностью менее 0,02 мГал. Современное гравиметрическое оборудование дает погрешность при измерениях силы тяжести порядка 0.01–0.03 мГал. В связи с этим остается актуальной задача построения более точных локальных моделей квазигеоида.

### *Литература*

1. Деменьтьев Е.В. Развитие теории и разработка технологии определения аномалий силы тяжести в полной топографической редукции: автореф. дис... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2012. С. 5–7.



Секция 5  
**ВОПРОСЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МАТЕМАТИКИ**

---

---

Session 5  
**ASPECTS OF THEORETICAL MATHEMATICS**

**О СТИРАНИИ ОСОБЕННОСТЕЙ ОТОБРАЖЕНИЙ  
С S-УСРЕДНЕННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ  
ON REMOVAL OF SINGULARITIES OF THE MAPPINGS WITH  
S-AVERAGED CHARACTERISTIC**

К.А. Алипова

K.A. Alipova

Томский Национальный исследовательский университет

National Research Tomsk State University

ksusha\_ast@mail.ru

Пусть  $f:U \rightarrow \bar{R}^n$  – отображение с  $s$ -усредненной характеристикой [1],  $y \in R^n$ . Рассмотрим спрямляемую кривую  $\gamma_*(t):[0,1] \rightarrow R^n$ , для которой  $\lim_{t \rightarrow 1} \gamma_*(t) = y$ . Пусть существует такая спрямляемая кривая  $\gamma$  в  $U$ , что  $f \circ \gamma$  и  $\lim_{t \rightarrow 1} \gamma(t) = x$ , где  $x \in \partial U$ . Тогда кривая  $\gamma_*$  называется асимптотической для точки  $x$ ,  $\gamma$  — ее асимптотическим поднятием,  $y$  – асимптотическим значением  $f$  в точке  $x$  [2]. Обозначим через  $\Gamma_*(A, I_0)$  семейство кривых  $\gamma_*(t)$  в  $f(U \setminus I)$ , которые допускают асимптотические поднятия  $\gamma(t)$  такие, что  $\gamma(0) \in A$ , а  $\lim_{t \rightarrow 1} \gamma(t) = x \in I_0 \subset I$ ,  $I$  – особое множество.

**Теорема.** Пусть  $f:U \setminus I \rightarrow R^n$  – отображение с  $s$ -усредненной характеристикой,  $U \setminus I$  – связно,  $\Gamma_*(I_0)$  — семейство асимптотических кривых для точек  $x \in I_0$  и  $\text{cap} A > 0$ . Тогда  $M_{\frac{ns}{s+1}}(\Gamma_*(I_0)) = 0$  в том и только в

том случае, когда  $M_{\frac{ns}{s+1}} \Gamma_*(A, I_0) = 0, s \geq \frac{1}{n-1}$ .

Для квазиморфных отображений см. [2]. В работе [3] приведены примеры отображений с  $s$ -усредненной характеристикой, приведем еще один.

**Пример.** В пространстве  $R^3$  рассмотрим тор  $D$ , точки  $x = (x_1, x_2, x_3)$  которого удовлетворяют условиям  $|x_1| < 1, |x_2| < 1, |x_3| < 1,$

$x_1 = (R + r \cos \theta) \cos \phi$ ,  $x_2 = (R + r \cos \theta) \sin \phi$ ,  $x_3 = r \sin \theta$ , здесь  
 $0 \leq \phi < 2\pi$ ,  $0 \leq \theta < 2\pi$ ,  $0 < r < R$ ,  $R < 1$ .

В области  $D$  зададим отображение  $f: D \rightarrow D'$ ,  $(r, \phi, \theta) \rightarrow (r, \phi, r^p \theta)$ , где  $p$  – произвольное отрицательное число. Отображение  $f$  непрерывно и ограничено в  $D$ , локально гомеоморфно в  $x \in D$ . Все точки множества  $D^1 = \{x \mid (x_1 - R)^2 + x_3^2 = 0\}$  отображение  $f$  переводит в себя. Каждая окружность с центром на  $D^1$ , лежащая в двумерной плоскости, ортогональной  $D^1$ , при отображении  $f$  переходит в себя. Отсюда легко видеть, что отображение  $f$  открыто. В точках множества  $D \setminus D^1$  отображение  $f$  непрерывно дифференцируемо и  $J(x, f) = r^p > 0$ .

Поскольку двумерная мера Лебега множества  $D^1$  равна нулю и сужение  $f$  на любую прямую, не пересекающую  $D^1$ , непрерывно дифференцируемо, то  $f$  есть ACL отображение. Рассмотрим произвольный компакт  $F \subset D$ , содержащий внутри себя некоторые точки из  $D^1$ . Пусть  $m \in \mathbb{N}$ . Можно указать такое число  $r > 0$ , что для некоторой точки  $y = (y_1, y_2, y_3)$  из  $D'$ , удовлетворяющей условию  $(y_1 - R)^2 + y_3^2 = r^2$ , имеется не менее  $m$  прообразов в  $F$ . Для этого необходимо выбрать  $r$  так, чтобы шар радиуса  $r$  с центром на  $D^1$  лежал в  $F$  и целая часть числа  $\lceil r^p \rceil$  была бы не менее  $m$ . Значит ограниченность на компактах кратности и степени отображения  $f$  не имеет места.

Легко показать, что для произвольных чисел  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 0$  существует число, для которого одновременно конечны интегралы вида

$$\int_D k_I^\alpha(x, f) |J(x, f)| dx < \infty, \int_D k_O^\beta(x, f) dx < \infty.$$

### *Литература*

1. *Малютина А.Н. Елизарова М.А.* Отображения с  $s$ -усредненной характеристикой. Определение и свойства LAP LAMBERT Academic Publishing. <http://d-Publishing>, 2013. 121 с nb.info/ 1029918708.
2. *Полецкий Е.А.* О стирании особенностей квазимероморфных отображений // Мат. сб. 1973. Т. 92(134), № 2(10). С. 242–256.
3. *Alipova K., Elizarova M., Malyutina A.* Examples of mappings with  $s$ -aver-aged characteristic // Комплексный анализ и его приложения. Петрозаводск. 2014. С. 12–17.

# ИССЛЕДОВАНИЕ МОМЕНТА РАЗЛАДКИ ДЛЯ МОДЕЛИ AR(1) STUDY CHANGE-POINT MODEL AR (1)

Ю.В. Дьяченко

Yu.V. D'yachenko

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University

Одной из наиболее важных задач математической статистики является определение момента изменения свойств наблюдаемого процесса. Для решения этой проблемы используются различные модификации метода наименьших квадратов, метода максимального правдоподобия, численные методы, робастные методы оценивания. В данной работе рассматривается метод обнаружения разладки с помощью критерия отношения правдоподобия. Большой интерес к задачам о разладке вызван, в первую очередь, важностью разработки эффективных методов её обнаружения в ряде практических задач. Анализ точек перехода, как и изучение регрессионных моделей, широко применяются в промышленном контроле качества, финансовом рынке и медицинской диагностике.

Чтобы найти момент разладки была получена критическая область для проверки гипотезы

$$H_0: X_t = \varphi * X_{t-1} + \omega_t, t = 1, 2, 3 \dots$$

против альтернативной гипотезы

$$H_1: \exists k, \text{ т. ч. } X_t = \begin{cases} \varphi_0 * X_{t-1} + \omega_t, & t \leq k \\ \varphi_1 * X_{t-1} + \omega_t, & k < t \leq n \end{cases}, \varphi_0 \neq \varphi_1.$$

Дэвис, Хуан и Яо представили следующую теорему [2] для модели AR(p), частным случаем которой является модель AR(1):

Пусть процесс  $X = \{X_t, t \geq 0\}$  определен равенством:

$$X_t = \begin{cases} \varphi_0 + \varphi_1 X_{t-1} + \dots + \varphi_p X_{t-p} + \epsilon_t, & -\infty < t \leq \tau \\ \alpha_0 + \alpha_1 X_{t-1} + \dots + \alpha_p X_{t-p} + \epsilon_t, & t \leq \tau + 1 \end{cases}$$

Пусть при гипотезе  $H_0$  (нет момента разладки, т.е.  $\varphi_0 = \alpha_0, \varphi_1 = \alpha_1, \varphi_p = \alpha_p$ ), ошибка  $\epsilon_t$  удовлетворяет условиям:  $M(\epsilon_t) = 0$ ,  $\sup_t M|\epsilon_t|^{4+\delta} < \infty$  для некоторого  $0 < \delta \leq 1$ , и ковариационная функция этого процесса  $p(n) \ll n^{-(1+\epsilon)(1+\frac{\delta}{2})}$ , для некоторого  $\epsilon > 0$ .

Тогда при гипотезе  $H_0$ :

$$P \left[ \frac{\sigma^2 \Lambda_n - b_n(p+1)}{a_n(p+1)} \leq x \right] \rightarrow \exp(-2e^{-x/2}),$$

при этом  $\Lambda_n = \max_{p < k < n} \Lambda_n(k)$  – статистика отношения правдоподобия,

$$b_n(d) = (2 \ln \ln n + (d/2) \ln \ln \ln n - \ln \Gamma(d/2))^2 / (2 \ln \ln n) \text{ и}$$

$a_n(d) = \sqrt{b_n(d) / (2 \ln \ln n)}$  – константы нормализации и  $\Gamma(\cdot)$  – гамма функция.

В работе проведено численное моделирование в среде программирования R. Приводятся соответствующие результаты.

### *Литература*

1. Fang Yuan. Tests for Change-Point of the AR(1) Model. May, 2013. 40 с.
2. Davis R., Huang D., Yao Y. Testing for a Change in the Parameter Values and R. Davis, D. Huang, and Y. Yao. Testing for a Change in the Parameter Values and Order of an Autoregressive Model. The Annals of Statistics, 1995.

## УСЕЧЕННОЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОЙ АВТОРЕГРЕССИИ TRUNCATED SEQUENTIAL ESTIMATION OF THE PARAMETERS IN A CONTINUOUS AUTOREGRESSION

**Т.В. Емельянова, Ю.И. Иванюк**

**T.V. Emel'yanova, J.V. Ivanyuk**

Национальный исследовательский Томский государственный университет

National Research Tomsk State University

yuliya.ivanyuk.90@mail.ru

В работе рассмотрена модель авторегрессии с непрерывным временем, описываемая стохастическим дифференциальным уравнением:

$$dx_t^{p-1} = \left( \theta_1 x_t^{p-1} + \dots + \theta_p x_t \right) dt + \sigma dW_t, \quad (1)$$

где  $x_t = (x_t^{p-1}, \dots, x_t)'$ ,  $t \in [0, T]$  – наблюдаемый  $p$ -мерный процесс,  $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_p)$ ,  $i = 1, \dots, p$  – вектор неизвестных параметров, таких, что все корни характеристического полинома  $x \in A : \{(x - \varepsilon, x + \varepsilon) : \varepsilon > 0\}$  имеют отрицательные вещественные части,  $W_t$  – стандартный процесс броуновского движения.

Зачастую, значения параметров уравнения (1) являются неизвестными, поэтому одной из основных задач является их идентификация. Для решения этой задачи разработаны различные эффективные методы:

максимального правдоподобия, наименьших квадратов, стохастической аппроксимации и тд. Согласно методу наименьших квадратов, оценка  $\hat{\theta}_T$  имеет вид

$$\hat{\theta}_T = M_T^{-1} \int_0^T X_s d\langle X_t \rangle_p, \quad (2)$$

где  $M_T = \int_0^T X_s X_s' ds$  – выборочная информационная матрица Фишера,  $\langle a \rangle_i$  обозначает  $i$ -ю координату вектора столбца  $a = (a_1, a_2, \dots, a_p)'$ ;

Оценки  $\hat{\theta}_T$ , полученные по методу наименьших квадратов, являются сильно состоятельными и асимптотически нормальными, но на практике, из-за ограниченной длительности промежутка наблюдений, эти свойства могут нарушаться. Для решения задач в неасимптотической постановке требуются методы, позволяющие контролировать точность оценок при малых и умеренных объемах данных. Для контроля среднеквадратической точности в [1] вводится следующая процедура.

Пусть  $H > 0$ . Определим длительность наблюдений процесса и оценку неизвестных параметров по формулам

$$\tau = \tau(H) = \inf \left\{ t > 0 : \|M_t^{-2}\|^{1/2} \leq \frac{1}{H} \right\}, \quad t \in [0, T] \quad (3)$$

$$\theta^*(H) = M_{\tau(H)}^{-1} \cdot \int_0^{\tau(H)} X_s d\langle X_t \rangle_p. \quad (4)$$

Момент остановки наблюдений в последовательном плане (3)-(4) является случайной величиной, зависящей от выбора порога  $H$ , которая может принимать достаточно большие значения. В прикладных задачах длительность реализации процесса, используемая для идентификации неизвестных параметров, часто ограничена некоторой величиной  $T$ . Цель данной работы предложить усеченный последовательный план, так же позволяющий контролировать среднеквадратическую точность оценивания. Пусть  $\tau(H)$  введен формулой (3). Зададим усеченную процедуру следующим образом:

$$N(H) = \min(\tau(H), T) \quad (5)$$

$$\theta^*(H) = M_{N(H)}^{-1} \cdot \int_0^{N(H)} X_s d\langle X_t \rangle_p \chi_{(N(T) \leq T)} \quad (6)$$

Исследованы свойства усеченной последовательной процедуры, касающиеся ее средней длительности и среднеквадратической точности.

Проведено численное моделирование по методу Монте-Карло, демонстрирующее хорошую согласованность теоретических и желаемых результатов.

### *Литература*

1. Емельянова Т.В., Конев В.В. О последовательном оценивании параметров непрерывной авторегрессии // Вестник Томского государственного университета. 2013. №5(25). С. 12–25.

2. Konev V.V., Pergamenschicov S.M. Truncated sequential estimation of the parameters in a random regression // Sequential analysis, 9 (1), 19–41 (1990).

## **ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ DECISION-MAKING ON THE BASIS OF THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS**

**А.О. Иващенко**

**A.O. Ivashenko**

Национальный исследовательский Томский государственный университет

National Research Tomsk State University

Anuta\_i@bk.ru

При выборе решений главную роль играет анализ их последствий. Для большинства решений последствия нельзя точно рассчитать и оценить. В методах выбора из малого числа многокритериальных альтернатив широко используется идея построения решающего правила.

В работе рассматривается метод анализа иерархий (МАИ), разработанный американским математиком Т. Саати в 70-х гг. XX в. Метод базируется на парных сравнениях альтернатив и критериев [1–3]. Сегодня МАИ имеет широкое распространение в специализированных журналах и имеет множество реальных приложений.

В работе рассматривается задача оптимизации выбора банка для наиболее выгодного вложения. Выборка среди депозитов проводилась по возможности вложения 100 000 рублей сроком 1–2 года. Цель нашего исследования – выявление наиболее выгодного депозита. Выборка депозитов проводилась из таких банков как Сбербанк, Газпромбанк, Уралсиб и ВТБ-24. Альтернативами в исследовании являются депозиты – «Управляй Online» (Сбербанк), «Оптимальный» (Газпромбанк), «Бизнес-класс» (Уралсиб) и «Комфортный-Телебанк» (ВТБ-24). Критериями – процентная ставка, надежность, удобство и срок работы банка.

Строится иерархическая структура задачи. Формируются матрицы парных сравнений  $[S_{p\ mm}^k]$  для каждого  $k$ -го уровня множества объектов. Для матриц вводится специальный числовой показатель «индекс

согласованности» [2], характеризующий степень доверия к полученным результатам.

Так как матрица  $A$  положительна, то по теореме Фробениуса–Перрона существует максимальное положительное собственное значение и вектор-приоритет. Собственное значение рассматривается как возмущение собственного значения невозмущенной матрицы. Поэтому вектор-приоритет матрицы  $A$  используется в качестве искомого набора весов.

В ходе исследования убедились, что матрицы парных сравнений имеют небольшое отклонение от совместной матрицы. Ответом является альтернатива, имеющая наибольшее значение обобщенного приоритета. Наиболее выгодным является депозит «Управляй online» Сбербанка.

В ходе исследования также были выявлены достоинства и недостатки метода.

Одним из достоинств МАИ является то, что в рамках метода анализа иерархий нет общих правил для формирования структуры модели принятия решения. Это является отражением реальной ситуации принятия решения, поскольку всегда для одной и той же проблемы имеется целый спектр мнений. Метод позволяет учесть это обстоятельство с помощью построения дополнительной модели для согласования различных мнений, посредством определения их приоритетов. Таким образом, метод позволяет учитывать «человеческий фактор» при подготовке принятия решения. Схема применения метода совершенно не зависит от сферы деятельности, в которой принимается решение. Поэтому метод является универсальным, его применение позволяет организовать систему поддержки принятия решений [4].

В рамках МАИ нет средств для проверки достоверности данных. Это важный недостаток, ограничивающий отчасти возможности применения метода. Однако метод применяется главным образом в тех случаях, когда в принципе не может быть объективных данных, а ведущими мотивами для принятия решения являются предпочтения людей. При этом процедура парных сравнений для сбора данных практически не имеет достойных альтернатив [4].

Инвестировать с максимальной прибылью – желание многих людей. В данной работе применение метода анализа иерархий применяется для решения проблемы выбора наиболее выгодного капиталовложения. МАИ эффективно справляется с этой задачей. Внушительная история успешного применения указанного метода в частных и государственных организациях разных стран показала его высокую практическую эффективность.

### *Литература*

1. Saaty T.L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of mathematical psychology*, 15(3): 234–281.
2. Saaty T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, Inc., New York.

3. Saaty T.L. (1994). Fundamentals of decision making and priority theory with the analytic hierarchy process (Vol. 6). Rws Publications, Pittsburgh.

4. ЗАО «Нейросплав». Технологии принятия решений: метода анализа иерархий. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://citforum.ru/consulting/BI/resolution> свободный.

**ПРИМЕР СВЯЗНОЙ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ГРУППЫ,  
КОТОРАЯ НЕ ГОМЕОМОРФНА  $\Omega$ -ТОНКОЙ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ  
ГРУППЕ  
THE EXAMPLE CONNECTED TOPOLOGICAL GROUP, THAT IS  
NOT HOMEOMORPHIC TO  $\Omega$ -THIN TOPOLOGICAL GROUPS**

**Д.И. Каргин**

**D.I. Kargin**

Национальный исследовательский Томский государственный университет

National Research Tomsk State University

foreshop@mail.ru

В данной работе доказаны два следующих утверждения:

1) Всякая  $\omega$ -тонкая топологическая группа, обладающая счетной фундаментальной системой окрестностей нейтрального элемента, сепарабельна.

2) Всякая метрическая связная топологическая группа, гомеоморфная  $\omega$ -тонкой топологической группе, сепарабельна.

Также доказано, что множество всех заданных на всей вещественной прямой вещественнозначных ограниченных функций, с поточечными операциями и  $\sup$ -нормой, является метрической связной топологической группой, которая не сепарабельна.

*Литература*

1. Arhangel'skij, Tkachuk. Topological groups and related structures.

**ПОИСК ЧИСЕЛ, ЯВЛЯЮЩИХСЯ ОДНОВРЕМЕННО  
ПСЕВДОПРОСТЫМИ ФЕРМА ПО ОСНОВАНИЮ 2  
И ПСЕВДОПРОСТЫМИ ФИБОНАЧЧИ  
SEARCH OF NUMBERS THAT ARE SIMULTANEOUSLY FERMAT'S  
PSEUDOPRIMES ON BASE 2 AND FIBONACCI'S PSEUDOPRIMES**

**Р.И. Тиней, В.М. Зюзков**

**R.I. Tiney, V.M. Zuzikov**

Национальный исследовательский Томский государственный университет

National Research Tomsk State University

vmz@math.tsu.ru, yuudai.fair@gmail.com

Для простых чисел  $n$  справедлива малая теорема Ферма: для любого  $a$  имеем

$$a^n \equiv a \pmod{n}. \quad (1)$$



Составные числа  $n$ , для которых выполнено (1) называются псевдопростыми числами Ферма по основанию  $a$ . Известно, что псевдопростых чисел по любому основанию бесконечно много, поэтому соотношение (1) не может служить тестом на простоту.

Последовательность 1, 1, 2, 3, 5, 8, ... (каждый следующий член есть сумма двух предыдущих) чисел Фибоначчи  $f_n$  (нумерация начинается с 1) обладает следующим свойством [1, с. 166].

Теорема. Если  $n$  – простое число вида  $n \equiv \pm 2 \pmod{5}$ , то

$$f_{n-1} \equiv 0 \pmod{n}. \quad (2)$$

Составные числа  $n \equiv \pm 2 \pmod{5}$ , для которых выполнено (2) называются псевдопростыми числами Фибоначчи. Отношение (2) также не может служить тестом на простоту, так как псевдопростых чисел возможно бесконечно много.

Но не исключено, что одновременное выполнение (1) и (2) является тестом на простоту для чисел  $n \equiv \pm 2 \pmod{5}$ . Эта проблема открыта, и для ее решения даже обещан денежный приз [1. С. 194]. Данная работа посвящена поиску составных чисел, которые одновременно удовлетворяют соотношению (1) по основанию 2 и соотношению (2).

Для проверки (1) и (2) использовались быстрые алгоритмы сложности  $O(\ln n)$ . Для вычисления чисел Фибоначчи использовалось матричное тождество

$$\begin{pmatrix} f_{k+1} & f_k \\ f_k & f_{k-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}^k.$$

При возведении в степень приведение по модулю  $n$  осуществлялось при каждом умножении. Поэтому при промежуточных вычислениях числа не превосходили  $n^2$ .

Написана программа на языке Wolfram и проверка выполнялась в системе Mathematica [2] с помощью параллельного программирования. Параллельное программирование на языке Wolfram не требует специального распараллеливания, если программа написана в функциональном стиле. Параллельные вычисления проводились на Вычислительном кластере СКИФ Cyberia (Томский государственный университет).

Для вычислений использовался один узел кластера из 12 ядер. Было потрачено в общей сложности 13702,55577 секунды или 3.8 часов компьютерного времени.

Результат работы: среди чисел меньших 3000000000 не существует; чисел, являющихся одновременно псевдопростыми Ферма по основанию 2 и псевдопростыми Фибоначчи.

## Литература

1. Крэндэлл Р., Померанс К. Простые числа: Криптографические и вычислительные аспекты. М.: УРСС: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. 664 с.
2. Wolfram Mathematica [Электронный ресурс]. URL: [http:// www. wolfram.com/mathematica](http://www.wolfram.com/mathematica)

## ПРОСТРАНСТВА НЕПРЕРЫВНЫХ ФУНКЦИЙ НА «ДЛИННЫХ ПРЯМЫХ ЗОРГЕНФРЕЯ» THE SPACES OF CONTINUOUS FUNCTIONS ON THE LONG SORGENFREY LINES

Н.Н. Трофименко

N. Trofimenko

Национальный исследовательский Томский государственный университет

National Research Tomsk State University

Trofimenko@sibmail.com

В данной работе рассматриваются пространства непрерывных функций  $C_p(S_\alpha)$  с топологией поточечной сходимости, заданные на «длинных прямых Зоргенфрея»  $S_\alpha$ , где  $\alpha$  – произвольный ординал. Прямая Зоргенфрея  $S$  – это множество вещественных чисел  $P$ , наделенное топологией, в которой базу окрестностей точки  $x \in S$  образуют семейство вида [1]

$$B_x = \{(r, x] : r < x, r \in \mathbb{Q}\}.$$

Определим «длинные прямые Зоргенфрея» и топологию на них. Фактически это определение основано на конструкции, предложенной В.В. Федорчуком [2]. Пусть  $X = [1, \alpha]$  отрезок ординалов,  $X'$  – множество предельных точек множества  $X$  и

$$Y_\gamma = \begin{cases} (0, 1], & \gamma \in X \setminus X'; \\ \{\gamma\}, & \gamma \in X'. \end{cases}$$

Тогда «длинные прямые Зоргенфрея» определяются как

$$S_\alpha = \coprod_{\substack{\gamma \in X, \\ \gamma < \alpha}} Y_\gamma,$$

с топологией определенной следующим образом.

Для точки  $p \in Y_\gamma$  базу окрестностей образуют множества вида

$$O_p = V_p \cup \left( \bigcup_{\gamma \in X \setminus X'} U_\gamma \cap \left( \bigcap_{\gamma \in X'} \{p\} \right) \right),$$

где  $V_p$  – окрестность точки  $p$  в пространстве  $Y_\gamma$ ,  $U_\gamma$  – окрестность точки  $\gamma$  в  $X$  и  $f_\gamma: X \setminus \{\gamma\} \rightarrow Y_\gamma$  – непрерывные отображения, определенные по формулам:  $f_\gamma(p) = 1$  для всех  $p \in X \setminus \{\gamma\}$ ,  $\gamma \in X \setminus X'$  и  $f_\gamma(p) = \gamma$  для всех  $p \in X \setminus \{\gamma\}$ ,  $\gamma \in X'$ .

В ходе исследований получены следующие результаты.

**Теорема 1.** Пусть  $\alpha$  и  $\beta$  счетные ординалы. Тогда пространства  $C_p(S_\alpha)$  и  $C_p(S_\beta)$  являются линейно гомеоморфными.

**Теорема 2.** Если  $\alpha$  – счетный ординал, а  $\beta$  – несчетный ординал, то пространства  $C_p(S_\alpha)$  и  $C_p(S_\beta)$  не являются линейно гомеоморфными.

Для несчетных ординалов  $\alpha$  линейная классификация пространств  $C_p(S_\alpha)$  совпадает с линейной классификацией пространств  $C_p([1, \alpha])$  ([3]–[5]). Справедлива следующая теорема.

**Теорема 3.** Пусть  $\omega_1 \leq \alpha < \beta$ . Пространства  $C_p(S_\alpha)$  и  $C_p(S_\beta)$  линейно гомеоморфны тогда и только тогда, когда пространства  $C_p([1, \alpha])$  и  $C_p([1, \beta])$  линейно гомеоморфны.

### *Литература*

1. *Энгелькинг Р.* Общая топология. М.: Мир, 1986, 752 с.
2. *Федорчук В.В.* О бикомпактах с несовпадающими размерностями // Доклады АН СССР. 1968. Т. 182. № 2. С. 229–308.
3. *Semadeni Z.* Banach spaces non-isomorphic to their Cartesian squares // Bull. Acad. Pol. Sci. Ser. Math., Astron. et Phys. 1960. Vol. 8. P. 81–84.
4. *Гулько С.П., Оськин А.В.* Изоморфная классификация пространств непрерывных функций на вполне упорядоченных бикомпактах // Функц. анализ и прил. 1975. Т. 9. № 1. С. 61–62.
5. *Кисляков С.В.* Изоморфная классификация пространств непрерывных функций на ординалах // Сиб. мат. журн. 1975. Т. 16. С. 293–300.

## **О ПОЛНОТЕ ПРОСТРАНСТВ НЕПРЕРЫВНЫХ ФУНКЦИЙ В ТОПОЛОГИИ ПОТОЧЕЧНОЙ СХОДИМОСТИ**

# ON THE COMPLETENESS OF SPACES OF CONTINUOUS FUNCTIONS IN THE TOPOLOGY OF POINTWISE CONVERGENCE

**К.А. Тыдыков**

**К.А. Tydykov**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University

Напомним, что равномерное пространство называется полным тогда и только тогда, когда в нем каждая направленность Коши сходится к некоторой точке.

В докладе будут рассмотрены некоторые условия полноты пространства всех непрерывных функций с топологией поточечной сходимости. Доказано, что это пространство полно тогда и только тогда, когда оно определено на множестве, имеющем дискретную топологию. Рассмотрено также ослабление понятия полноты – секвенциальная полнота. Равномерное пространство называется секвенциально полным тогда и только тогда, когда в нем каждая последовательность Коши сходится к некоторой точке.

Теорема. Пространство  $\Sigma(\Gamma) = \{x \in R^\Gamma; |\text{supp } x| \leq \aleph_0\}$  с топологией поточечной сходимости секвенциально полно.

## *Литература*

1. *Энгелькинг Р.* Общая топология. М.: Мир, 1986.
2. *Бурбаки Н.* Общая топология. Основные структуры. М., 1968.

# ОДНО ОБОБЩЕНИЕ ТЕОРЕМЫ ТИХОНОВА – ШАУДЕРА. A GENERALIZATION OF TYCHONOFF'S THEOREM-SCHAUDER

**А.А. Федоров**

**А.А. Fedorov**

Томский Национальный исследовательский университет  
National Research Tomsk State University

В данной работе рассматривается обобщение теоремы Тихонова–Шаудера на случай таких подмножеств в локально выпуклом пространстве, у которых счётные подмножества относительно компактны.

Теорема. Пусть  $X$  – подмножество локально выпуклого пространства  $E$ , такое, что замыкание любое счётного множества в нём компактно. Тогда любое непрерывное отображение имеет неподвижную точку, т.е. существует  $x$  такое, что  $f(x) = x$ .

## *Литература*

1. Данфорд Шварц. Линейные операторы. Общая теория. М.: Иностранной литературы, 1962.
2. Энгелькинг Р. Общая топология / пер. с англ. М.: Мир, 1986.

## О ГОМЕОМОРФИЗМАХ НЕКОТОРЫХ МОДИФИКАЦИЙ ПРЯМОЙ ЗОРГЕНФРЕЯ ON HOMEOMORPHISMS OF CERTAIN MODIFICATIONS SORGENFREY LINE

Е.С. Сухачева, Т.Е. Хмылева  
Е. Suhcheva, T. Khmyleva

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University

В работе используются следующие обозначения:  $\mathbb{N}$  – множество натуральных чисел;  $\mathbb{R}$  – множество вещественных чисел, наделенное стандартной евклидовой топологией; символом  $S$  обозначается прямая Зоргенфрея (или «стрелка»), представляющая собой множество вещественных чисел, топология в котором порождена базой  $\{(a, b]: a, b \in \mathbb{R}, a < b\}$ .

В топологии встречается много примеров пространств, база окрестностей которых определяется разными способами. Например, прямая Майкла, плоскость Немыцкого, двойная окружность Александра и т.д. [3]. В нашей работе рассматривается модификация прямой Зоргенфрея, в которой база окрестностей точки  $x \in S$  определяется следующим образом:

если  $x \in S \setminus A$ , то  $\{(a, x]: a \in \mathbb{R}\}$ ;

если  $x \in A$ , то  $\{[x, b): b \in \mathbb{R}\}$ .

Пространство, топология которого задается описанной выше базой окрестностей, обозначается символом  $S_A$ . В частности, если  $A = \emptyset$ , то  $S_A = S$ , а если  $A = S$ , то  $S_A$  это также прямая Зоргенфрея с топологией «правой стрелки». Возникает вопрос, для каких множеств  $A \subset \mathbb{R}$  пространство  $S_A$  гомеоморфно  $S$ . Подобные вопросы рассматривались в [4], где база окрестностей точки  $x \in \mathbb{R}$  задается следующим образом:

$x \in A: \{(x - \varepsilon, x + \varepsilon): \varepsilon > 0\}$ ;  
 $x \in \mathbb{R} \setminus A: \{(x - \varepsilon, x + \varepsilon): \varepsilon > 0\}$ .

В нашей работе доказываются следующие две теоремы.

**Теорема 1.** Пусть множество  $F$  замкнуто в  $\check{Y}$ . Тогда пространство  $S_F$  гомеоморфно  $S$ .

**Теорема 2.** Пусть счетное множество  $A \subset \square$  таково, что его замыкание  $\overline{A}$  относительно  $\square$  счетно. Тогда  $S_A$  гомеоморфно  $S$ .

В общем, для счетного множества  $A$ , замыкание которого несчетно, утверждение теоремы 2 неверно. Например, для множества рациональных точек оказалось, что такого гомеоморфизма нет.

### *Литература*

1. Александров П.С. Введение в теорию множеств и общую топологию. М.: Наука, 1977, 368 с.
2. Куратовский К., Мостовский А. Теория множеств. М.: Мир, 1970, 416 с.
3. Энгелькинг Р. Общая топология. М.: Мир, 1986, 752 с.
4. Chatyrko V.A., Hattori Y. A poset of topologies on the set of real numbers // Comment. Math. Univ. Carolin. 2013. Vol. 54, 2. P. 189–196.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОВАЛА НАД КАРСТОВОЙ ПОЛОСТЬЮ КАК КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ MODELING OF CAVERN FORMATION AS A CATASTROPHIC PROCESS IN THE NONLINEAR DYNAMIC SYSTEM.**

**И.В. Щербаков<sup>1</sup>, П.В. Макаров<sup>1,2</sup>, Р.А. Бакеев<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, 634021, Россия

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University

<sup>2</sup>Institute of strength physics and materials science RAS

Геоматериалы и массивы горных пород как иерархически организованные системы обладают всеми специфическими чертами поведения динамических систем. Процессы деформирования и разрушения развиваются по катастрофическому сценарию, которому предшествует квазистационарная стадия [1]. Одним из таких примеров является образование карста. Карст – это процесс, происходящий из-за растворения горных пород подземными и поверхностными водами, в результате которого образуются отрицательные формы рельефа на земной поверхности и различные полости, каналы и пещеры на глубине [2].

На примере задачи моделирования формирования провала над карстовой полостью продемонстрированы режимы эволюции в модельной нелинейной геосреде. Особенностью эволюции динамических нелинейных систем является их способность к изменению хода развития событий, с

плавного квазистационарного на режим с обострением, в ходе которого система претерпевает принципиальные изменения, обретая новую структуру и свойства.

Нагружаемый полем сил тяжести слой осадочных горных пород над карстовой полостью рассматривается как упруго-хрупкопластический материал. Используется модель нагружения Друкера-Прагера [3] с накоплением повреждений и деградацией прочностных характеристик.

Установлена форма структур разрушения дневной поверхности, оценены величины провалов и характерные времена развития катастрофического разрушения осадочного чехла.

### *Литература*

1. Макаров П.В., Смолин И.Ю., Евтушенко Е.П., Трубицын А.А. и др. Возможности применения эволюционного подхода при моделировании поведения геосреды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. №12. С. 259–276.

2. Гвоздецкий Н.А. Карст. М.: Мысль, 1981. 212 с.

3. Друккер Д., Прагер В. Механика грунтов и пластический анализ или предельное проектирование // Механика. Новое в зарубежной науке. Вып. 2: Определяющие законы механики грунтов. М.: Мир, 1975. С. 166–177.

Секция 6  
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ  
И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

---

---

Session 6  
MATHEMATICAL AND PHYSICAL MODELING OF  
TECHNICAL AND NATURAL SYSTEMS  
INELASTIC SCATTERING OF CN RADICAL WITH PARA-AND  
ORTHO-H<sub>2</sub>

Y.N. Kalugina<sup>1,2</sup> and Francois Lique<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LOMC - UMR 6294, CNRS-Université du Havre, 25 rue Philippe Lebon, BP 540, 76058,  
Le Havre, France

<sup>2</sup>Department of Chemistry, University of New Brunswick, Fredericton NB,  
E3B 5A3 Canada

The CN molecule is one of the most widely distributed in the interstellar medium (ISM). In diffuse molecular gas, CN plays a role as a tracer of high density gas. The CN thermal lines also probe dense regions in molecular clouds, circumstellar envelopes. The cyano radical is also of great interest in combustion chemistry and atmospheric physics.

Modeling of molecular emission spectra from ISM requires the knowledge of accurate rate coefficients for excitation by collisions with the most abundant species, like He and H<sub>2</sub>. The extensive study of CN collisions with He atom was already done in ref. [1]. Thus, the present work is focused on the collisions with hydrogen molecule.

At low temperatures, molecular collisions induce only the rotational energy transfer in CN and H<sub>2</sub> molecules due to a large activation energy (~1100 cm<sup>-1</sup>) for HCN molecule formation. Thus, rotational (de-)excitation can be studied neglecting reaction pathways [2]. We present state-to-state and total rotational energy transfer rate coefficients and state-to-state cross sections between the first 16 rotational levels of CN(X<sup>2</sup>Σ<sup>+</sup>), being in the ground vibrational state, in collisions with H<sub>2</sub>, the most abundant collisional partners in cold molecular clouds. The Close Coupling (CC) calculations were carried out for a potential energy surface (PES) calculated at highly correlated *ab initio* “coupled-cluster” method. The quality of the PES was checked by comparison with the experimental data. The zero-order corrected dissociation energies D<sub>0</sub> are 27.73 cm<sup>-1</sup> and 38.75 cm<sup>-1</sup> for the complex with para-, and ortho-H<sub>2</sub>, respectively. These theoretical results obtained using our new PES are in excellent agreement with experimental values: 27±1 cm<sup>-1</sup> and 38±1 cm<sup>-1</sup> [3]. Rate coefficients were also compared with experimental results of Brunet et al. [4]. A good agreement between theoretical and experimental results was found. The fine-



structure resolved cross sections were obtained by the recoupling of CC S-matrix. State-to-state cross sections were calculated for the first 25 fine levels of CN molecule in collisions with para-H<sub>2</sub> (j=0) and ortho-H<sub>2</sub> (j=1). Significant differences exist between para- and ortho-H<sub>2</sub> results. The propensity rules between fine-structure levels are also studied, and it is shown that the cross sections for  $\Delta j = \Delta N$  transitions are much larger than those for  $\Delta j \neq \Delta N$  transitions, as expected from theoretical considerations.

We expect that the obtained results will serve as a valuable tool for the interpretation of the CN emission lines observed with current and future telescopes and also in determination of physical conditions in interstellar clouds.

**Acknowledgments.** This research was supported by the CNRS national program “Physique et Chimie du Milieu Interstellaire”. We also thank the CPER Haute-Normandie/CNRT/Energie, Electronique, Matériaux.

### *References*

1. *F. Lique et al.*, *J. Chem. Phys.* 132, 024303 (2010).
2. *F. Lique and A. Faure*, *J. Chem. Phys.* 136, 031101 (2012).
3. *O’Donnel et al.*, *J. Chem. Phys.* 136, 234304 (2012).
4. *Brunet et al.*, *J. Chem. Phys.* 116, 3617 (2002).

## **ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОГРАФИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПЛАМЕНИ ON THE USE OF THERMOGRAPHY FOR RESEARCH FIELDS TEMPERATURE IN FLAMES**

**М.В. Агафонцев, Е.Л. Лобода, Е.А. Макарова, В.В. Рейно**

**M.V. Agafontsev, E. L. Loboda, E.A. Makarova, V.V. Reyno**

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

National Research Tomsk State University

reyno@iao.ru

Традиционные методы экспериментального исследования процессов горения предполагают применение большого количества термопар для определения полей температуры в пламени. Это вызывает ряд технических трудностей, которые практически невозможно решить при проведении крупных или натуральных экспериментов. Кроме того, применение контактных методов измерений вносит возмущения в исследуемую среду и искажает истинную картину течения в пламени. Современные методы ИК-диагностики с использованием тепловизоров позволяют отказаться от применения большого числа термопар и при этом получить хорошее пространственное разрешение с высокой детализацией по времени. Однако применение методов ИК-диагностики связано с рядом трудностей, которые обусловлены необходимостью определения оптических

характеристик пламени (коэффициенты излучения и пропускания), выборе спектрального интервала, влиянии слоя пламени на регистрацию экранированных им объектов.

Следует отметить, что применение методов ИК-диагностики в мире в основном приходится на исследование электротехнического и теплового оборудования и связано с определением температур твердых тел, а зачастую и вообще лишь с качественной оценкой наличия градиентов температуры. Кроме того, применение методов ИК-диагностики нашло место и при оценке поведения микроэлектронных устройств и в задачах неразрушающего контроля нагруженных конструкций в авиационной технике.

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований спектральных характеристик пламени, образующегося при горении горючих материалов, с применением методов ИК-диагностики. Приводится анализ спектра излучения пламени следующих горючих материалов: спирт, пропан-бутановая смесь, бензин, керосин, растительные горючие материалы (березовые, сосновые и кедровые дрова, опад хвои сосны, кедр и полевые горючие материалы). На основании анализа спектра излучения пламени делается вывод о выборе подходящих спектральных интервалов для измерения полей температуры в пламени и для регистрации высокотемпературных объектов, экранированных слоем пламени.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-01-00211.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПЛАМЕНИ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ИК-ДИАГНОСТИКИ  
В РАЗЛИЧНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНАХ  
STUDY OF TEMPERATURE FLUCTUATIONS IN THE FLAME USING  
THE METHOD OF IR DIAGNOSTICS IN DIFFERENT SPECTRAL  
RANGES**

**М.В. Агафонцев, Е.Л. Лобода, В.В. Рейно  
M. V. Agafontsev, E. L. Loboda, V.V. Reyno**

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
National Research Tomsk State University  
loboda@mail.tsu.ru, ru

При проведении экспериментальных исследований процессов горения и природных пожаров необходимо использовать большое количество термопар для регистрации полей температур. Это связано с определенными трудностями технического характера. Современные методы ИК-диагностики с использованием тепловизоров позволяют

отказаться от использования большого числа термопар. При этом применение методов ИК-диагностики позволяет получить значительно лучшее разрешение по пространству и времени. Однако, при использовании этих методов возникают трудности связанные с определением коэффициентов излучения и пропускания пламени, выборе спектрального диапазона исследования, влиянии слоя пламени на регистрацию температур экранированных им объектов.

Значительная часть исследований в области ИК-диагностики электротехнического и теплового оборудования связана с измерением температур твердых сред. Методы ИК-диагностики очень широко применяются для исследования поведения микроэлектронных устройств и в задачах неразрушающего контроля сотовых конструкций авиационной техники.

В области исследования процессов горения и, в частности, природных пожаров использование термографии не сильно распространено ввиду сложности исследуемого объекта и недостатка знаний его свойств, например, коэффициент излучения ( $\epsilon_\lambda$ ) и дороговизны специальных тепловизоров, пригодных для научных исследований.

Представляет интерес исследование оптических свойств пламени в тех спектральных интервалах, где присутствуют мощные линии излучения продуктов горения. Поэтому в этих спектральных интервалах возможно применять методы ИК-диагностики для определения полей температуры в пламени, а так же учитывать влияние других высокотемпературных объектов на результаты измерений.

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований спектральных характеристик пламени, образующегося при горении горючих материалов, с применением методов ИК-диагностики. Приводится анализ спектра изменения температуры в пламени для следующих горючих материалов: спирт, пропан-бутановая смесь, бензин, керосин, растительные горючие материалы (березовые, сосновые и кедровые дрова, опад хвои сосны, кедра и полевые горючие материалы). На основании анализа полученного спектра делается вывод о выборе подходящих спектральных интервалов для измерения полей температуры в пламени и для регистрации высокотемпературных объектов, экранированных слоем пламени. Так же были выявлены характерные пульсации температуры для разных видов исследуемых горючих материалов, связанные с пространственной структурой течения в пламени продуктов горения и степенью турбулентности высокотемпературной среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-01-00211.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОГРЕВА ОБРАЗЦА ТОРФА В ЗАВИСИМОСТЬ ОТ РАЗМЕРА INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS OF PEAT SAMPLE HEATING DEPENDING ON SIZE

С.М. Андреюк, А.И. Фильков  
S.M. Andreuk, A.I. Fil'kov

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University  
8sergei91@mail.ru

Математическое моделирование возникновения и распространения природных пожаров в настоящее время сдерживается отсутствием полноценных информационных баз данных о параметрах математических моделей (например, термокинетических постоянных), усложнение которых идет в направлении все более полного и детального учета структуры и многообразия физико-химических превращений. Стандартные средства исследования кинетических процессов позволяют изучать образцы, растёртые в порошок. При этом нарушается структура образца, особенно для таких неоднородных материалов как торф. Кроме того, известно [1], что масштабные эффекты оказывают влияние также и на характеристики горения.

Стандартные средства не позволяют исследовать образцы различного размера в естественном состоянии, т.к. ограничены размером тигеля, то в работе использовалась специальная установка [2]. Исследованию однородности температур и скорости нагрева образцов в данной установке посвящена данная работа.

Для исследования были взяты торфяная залежь верхового типа, собранная в районе Томской области. Экспериментальные исследования процесса пиролиза проводились в изотермических условиях в кислороде воздуха при температурах 200, 220 и 240 °С. Перед тем, как проводить эксперимент, все образцы предварительно высушивались при температуре 100 °С до абсолютно сухого состояния с целью удаления свободной воды. Масса образцов, используемых для исследования составляла  $1-3 \pm 0.02$  г (сухой образец). Образцы представляли собой кубики со сторонами 10, 15 и 20 мм.

На первом этапе исследовалась разница температур печи и образцов при заданной температуре печи, как при изоляции термопар так и без. Для этого в середину образца торфа внедрялась термопара. Вторая термопара располагалась на расстоянии 10 мм сбоку от образца.

Из анализа кривых следует, что для образца со стороной 10 мм максимальная разница между температурой образца и печи после 40 с не превышает 5 %. При этом, для образцов со стороной 20 мм, температуры выравниваются только через 5 мин.

На втором этапе исследовалось влияние выхода температуры образца на стационарный режим при различных температурах в печи. Анализ результатов показал, что минимальное время около 2 минут составляет для образцов со стороной 10 мм.

В результате проделанной работы были получены зависимости температуры образцов и печи от размера образцов и температуры нагрева.

### *Литература*

1. *Morvan D.* Physical Phenomena and Length Scales Governing the Behaviour of Wildfires: A Case for Physical Modelling // (2011) Fire Technology, 47 (2), p. 437–460.

2. *Фильков А.И., Кузнецов В.Т., Новиков Д.В., Шарыпов и др.* Кинетические исследования процесса пиролиза торфа // Горение твердого топлива: Доклады VIII Всерос. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 13–16 ноября 2012 г. Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2012. 115 докладов. С. 99.1–99.8. (электронная публикация ISBN 978-5-89017-032-3).

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕРАВНОВЕСНОЙ He-N<sub>2</sub> ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ** **MODELING OF NONEQUILIBRIUM He-N<sub>2</sub> GAS DISCHARGE PLASMA**

**С.С. Бардин**  
**S.S. Bardin**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University  
[Asves@mail.ru](mailto:Asves@mail.ru)

В настоящее время изучение газовых разрядов и моделирование неравновесной плазмы актуально для различных областей науки. Плазма используется для модификации приповерхностных слоев полупроводниковых материалов, для имплантации с целью изменения физических свойств поверхности металлов, для создания рабочих сред лазеров.

Целью данной работы является моделирование импульсной He-N<sub>2</sub> газоразрядной сильно неравновесной плазмы, в разряде пускового типа. Газоразрядный источник выполнен в виде цилиндрической камеры с катодом и сетчатым анодом. В модель заложено описание всех физических процессов, происходящих в разряде пучкового типа. Данная модель применяется для расчета функции распределения электронов (ФРЭ) и заселенностей электронных состояний тяжелых частиц. В результате моделирования определяются основные механизмы формирования ФРЭ и управления кинетическими процессами в плазме. Вид ФРЭ зависит от условий разряда и состава газовой смеси, следовательно, формирование функции распределения электронов по энергиям в межэлектродном зазоре и последующая ее релаксация в факеле будет значительно влиять на кинетику компонент плазмы.

Расчет ФРЭ для моделирования столкновительных процессов в плазме, с условиями, описанными выше, проводился методом Монте-Карло. Для расчета ФРЭ, ее пространственно-временной зависимости в He-N<sub>2</sub> плазме, были выбраны сечения столкновительных процессов, происходящих между электронами и тяжелыми частицами. Для применения метода Монте-Карло необходимо знать распределение электрического поля в ускоряющем зазоре. При решении данной задачи использовалось приближение однородного и линейно зависящего, от расстояния до катода, электрического поля в зависимости от времени. В отличие от разряда в чистом гелии, наличие молекулярного газа N<sub>2</sub> в плазме значительно изменяет величину и спектр энергетических потерь электронов за счет снижения пороговых значений энергии и увеличения числа столкновительных реакций с участием электронов и тяжелых частиц.

Типичный вид ФРЭЭ на выходе из ускоряющего зазора включает в себя три области: область медленных электронов, плато быстрых электронов и область пучковых электронов. Область быстрых электронов формируется вторичными электронами, «родившимися» в различных участках межэлектродного зазора. Аналогичной структурой обладают ФРЭЭ для всех срезов по времени. Полученная ФРЭЭ на выходе из межэлектродного зазора дает возможность анализировать плазмохимический состав факела и достигать заданных параметров его для различных применений. Более подробные результаты моделирования методом Монте-Карло описаны в [1, 2, 3].

Решение уравнений баланса для нахождения концентраций компонент плазмы проводится с использованием кинетического уравнения Больцмана.

$$\frac{\partial(nf)}{\partial t} = -v\nabla(nf) - \frac{Ze}{m} \left\{ E + \frac{1}{c} [v \times H] \right\} \nabla_v(nf) + \frac{\delta(nf)}{\delta t}. \quad (1)$$

где  $n$  – концентрация частиц,  $f$  – функция распределения,  $v$  – скорость частиц,  $Ze$  – заряд частицы,  $m$  – масса частицы,  $E$  и  $H$  – напряженности электрического и магнитного полей.

В столкновительной модели учитываются более 50 реакций с участием гелия и молекулярного азота. Для расчета компонентного состава плазмы, исходя из уравнений баланса, включены реакции взаимодействия электронов, ионов и молекул в различных сочетаниях, а так же излучательные процессы. При решении уравнений используется усреднение по ФРЭЭ, полученной методом Монте-Карло.

Таким образом, решение уравнения Больцмана с ФРЭЭ, полученной методом Монте-Карло, позволяет построить более точную кинетическую модель неравновесной плазмы.

#### *Литература*

1. Демкин В.П., Мельничук С.В., Борисов А.В. и др. // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 10. С. 106–111.

2. Демкин В.П., Мельничук С.В., Борисов А.В. и др. // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 4. С. 115–116.
3. Demkin V. P., Mel' nichuk S. V., Borisov A. V., Bardin S.S. // Physics of Plasmas. 2013. С. 123–501.

## **ТЕЧЕНИЕ СТЕПЕННОЙ ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ С ВНЕЗАПНЫМ СУЖЕНИЕМ**

### **THE POWER-LAW FLUID FLOW IN A PIPE WITH A SUDDEN CONTRACTION**

**Е.И. Борзенко, К.Е. Бояркина, Г.Р. Шрагер**  
**E.I. Borzenko, K.E. Boyarkina, G.R. Shrager**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University  
borzenko@ftf.tsu.ru

Исследованиям течений вязкой жидкости в каналах переменного сечения уделяется особое внимание в связи с многочисленными приложениями в технических устройствах различного назначения. В частности, каналы с внезапным сужением являются конструктивными элементами теплообменников, трубопроводов, реакторов и т.д. Для определения напорно-расходных характеристик в подобных системах требуются результаты экспериментальных и численных исследований течения в канале со скачком сечения, касающиеся зависимостей местного гидравлического сопротивления от определяющих параметров.

В данной работе рассматривается ламинарное течение неньютоновской жидкости в цилиндрической трубе с внезапным сужением.

Математическая постановка задачи формулируется в переменных вихрь-функция тока в цилиндрической системе координат. Жидкость подается в канал через входное сечение с постоянным расходом, распределение функции тока и вихря при этом соответствуют течению Паузейля. На твердой неподвижной стенке реализуются условия прилипания, на выходной границе используются мягкие граничные условия. На оси симметрии выполняются условия симметрии. Постановка задачи замыкается реологической моделью Оствальда – де Виля.

Численное решение задачи осуществляется методом установления [1] с последующим использованием конечно-разностного метода продольно-поперечной прогонки [2]. Для обеспечения устойчивости расчета течения проводится регуляризация реологического уравнения [3].

Полученная картина течения показывает, что в окрестности входной и выходной границ имеют место одномерные течения, которые характерны для установившегося движения жидкости в бесконечной трубе. Слева и справа от области сужения образуются зоны двумерного течения с циркуляционной зоной в окрестности угла. Вводятся следующие безразмерные геометрические характеристики потока: длина

циркуляционной зоны  $L$ , длины участков двумерного течения до и после уступа  $l_1$  и  $l_2$ . Исследуется поведение этих характеристик в зависимости от числа Рейнольдса  $Re$ , коэффициента сужения  $\beta$  – отношение радиусов широкой и узкой частей канала, и степени нелинейности жидкости  $n$ . С увеличением  $Re$  длина циркуляционной зоны и область двумерного течения перед уступом уменьшаются, а за уступом область двумерного течения увеличивается. Уменьшение  $n$  способствует увеличению зон двумерного течения и уменьшению циркуляционной зоны. С ростом  $\beta$  происходит увеличение  $L$  и  $l_1$ , при этом изменение  $l_2$  незначительно, поскольку при различных  $\beta$  характер течения в узкой части канала практически не меняется.

Для течения жидкости в канале с резким сужением значение коэффициента местного сопротивления определяется потерями энергии, связанными с перестройкой потока с последующим увеличением средней скорости в узкой части, а так же с энергией, необходимой для организации движения жидкости в циркуляционной зоне. Полученные графические зависимости показали, что с уменьшением  $n$  коэффициент сопротивления уменьшается. При увеличении  $\beta$  увеличивается и коэффициент местного сопротивления. С ростом  $Re$  значение коэффициента сопротивления падает, при этом характер зависимости практически линейный.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 2014/223 (код проекта 1943).

#### *Литература*

1. Годунов С.К. Разностные схемы / С.К. Годунов, В.С. Рябенский. М.: Физматгиз, 1977. 440 с.
2. Самарский А.А. Теория разностных схем. / А.А. Самарский, А.В. Захаров, И.М. Овчинникова. М.: Наука, 1977. 656 с.
3. Шрагер Г.Р. Моделирование гидродинамических процессов при переработке полимерных материалов / Г.Р. Шрагер, А.Н. Козлобородов, В.А. Якутенок. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1999. 219 с.

## **КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ТЕПЛОВЫХ ПОРАЖЕНИЙ INTEGRATED METHOD ON PREDICTING OF THERMAL INJURIES**

**А.Ф. Габидуллин, Р.Ш. Еналеев**

**A.F. Gabidullin, R.Sh. Enaleev**

Казанский национальный исследовательский технологический университет

Kazan National Research Technological university

gaf@jandex.ru, firepredict@yandex.ru

Одним из основных источников опасности на современных нефтехимических предприятиях является аварийный выброс пожаро-взрывоопасных веществ в атмосферу. Аварийные ситуации могут иметь катастрофические последствия для окружающей среды, обслуживающего



персонала и населения рядом расположенных жилых территорий. Прогнозирование последствий воздействия опасных факторов пожара может быть получена на основе компьютерного моделирования сложных физико-химических сопряженных процессов тепло- и массообмена в системе «тепловой источник – материал покровного слоя – пакет одежды – кожный покров биообъекта».

Разработка обоснованных методов прогнозирования тепловых поражений человека при проектировании пожароопасных объектов и в аварийных ситуациях является актуальной социально-экономической проблемой.

Проблема количественной оценки теплового поражения людей возникла после первых испытаний атомного оружия. Впервые экспериментальная зависимость плотности теплового потока от времени воздействия на открытые участки кожного покрова, вызывающего ожоги II степени с вероятностью 0,5, получена А. Stoll [1].

Для закрытых одеждой участков кожного покрова в зарубежных стандартах [2, 3] при воздействии открытого пламени и теплового излучения в качестве критерия поражения используется определенное значение приращение температуры имитатора кожи. В качестве имитатора применяется медный калориметр толщиной 1,6 мм. За критерий поражения принимается приращение температуры имитатора кожи на  $24 \pm 0,2$  °C с неизвестной вероятностью и степенью тяжести.

В отечественных разработках [4] предложена модель процесса теплопередачи в структурных слоях кожного покрова, в которой переменную интенсивность съема тепла кровотоком предлагается моделировать введением в уравнение Фурье эффективного коэффициента теплопроводности, зависящего от температуры, и идентифицировать его значение в вычислительном эксперименте. Модель позволяет рассчитывать нестационарное температурное поле во всех структурных слоях кожи. Как показали результаты вычислительного эксперимента, независимо от скорости нагрева ожог с заданной вероятностью возникает тогда, когда на глубине 0,36 мм от поверхности кожи принимает однозначное критическое значение.

В медицинской статистике для прогнозирования вероятностей поражения биообъектов от воздействия вредных веществ, ударной волны, термических агентов и других поражающих факторов применяются линейные функциональные зависимости между «дозой» и «эффектом», называемые пробит-функциями. В вероятностных моделях в качестве «дозы» обоснован логарифм индекса облучения, равный произведению постоянной плотности теплового потока в степени  $4/3$  на время экспозиции, а в качестве эффекта – степень и вероятность ожога.

При прогнозировании вероятностей тепловых поражений различных степеней тяжести предлагается комплексный подход. Идея подхода

основана на сопряжении результатов расчета температурного поля кожных покровов биообъекта по теоретической детерминированной модели, прогнозировании вероятностей возникновения ожогов с применением пробит-функций и экспериментальных данных по скорости нагрева медного имитатора кожи по зарубежным стандартам.

Практическая реализация предлагаемого подхода заключается в сохранении инструментария зарубежных стандартов с помощью разработки автоматизированного устройства со сменяемыми модулями для имитации воздействия открытого пламени, теплового излучения их комбинации. Научная новизна подхода состоит в возможности прогнозирования вероятностей термического ожога по измеренной температуре имитатора кожи и времени ее достижения.

Предлагаемый комплексный метод прогнозирования вероятностей тепловых поражений может увеличить достоверность данных при прогнозировании пожарной опасности пакета одежды в чрезвычайных ситуациях.

#### *Литература*

1. *Stoll A.M.* Relationship between pain and tissue damage due to thermal radiation / A.M. Stoll, L.C. Greene // *J. Appl. Physiol.* 1959. Vol. 14. P. 373.
2. ISO 6942:2003 «Textile fabrics – Burning behaviour – Evaluation of materials and material assemblies when exposed to a source of radiant heat».
3. ISO 9151:1995. «Protectiv clothing against heat and flame: determination of heat transmission on exposure to flame».
4. *Enalejev R.Sh., Kachalkin W.A.* Mathematical Sumulation of Heat and Mass Transfer Process in Skin Cover at Burn Injury. *Annals of the NewYork Academy of Science*, 1998. Vol. 858. P. 30–35.

## **ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ ПРЕГРАД С ГРАДИЕНТНОЙ ПОДЛОЖКОЙ NUMERICAL ANALYSIS OF THE FGM-BARRIER UNDER SHOCK LOAD**

**М.Ю. Орлов, В.В. Голубятников**

**M.Yu. Orlov, V.V. Golubatnikov**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University  
orloff\_m@mail.ru

В интересах развития отечественной авиакосмической отрасли проведены поисковые научные исследования процесса ударного нагружения металлических преград с градиентной подложкой (FGM-barriers). Использование градиентной подложки в составе предполагаемой

защитной конструкции объясняется необходимостью увеличения ресурса живучести и снижении габаритно-массовых характеристик конструкции.

Модель поведения среды описывается с позиций феноменологической макроскопической теории механики сплошных на основе фундаментальных законов сохранения. Упругопластическое течение описывается определяющими уравнениями Прандтля–Рейса при условии текучести Мизеса. Уравнение состояния выбрано в форме Уолша.

Среда является изотропной, сжимаемой, пористой, учитывающей свойства прочности, ударно-волновые явления, а также совместное образование разрушений по типу сдвига и отрыва. Модель разрушения материала является детерминированной и не привязана к какому-либо одному критерию разрушения, но позволяет использовать объемный, деформационный и силовые критерии.

В качестве основного инструмент исследований используется 2D лагранжев метод, расчетная часть которого дополнена механизмами расщепления расчетных узлов и разрушения расчетных элементов. Оригинальность метода заключается в новом способе выделения поверхностей разрыва сплошности материала для решения современных динамических многоконтактных задач МДТТ.

Объектами исследования выбраны преграды из алюминиевого сплава и стали с градиентной подложкой из однонаправленного функционально–градиентного материала. В качестве ударников выбраны однородные удлиненные, компактные и ударники-пластины. Рецептурный состав и местоположение подложки в преграде выбрано в соответствии с ранее проведенными исследованиями. Диапазон начальных скоростей удара не превышал скорости звука в воздухе. Серия вычислительных экспериментов состояла из 8 вариантов расчетов и проведена попарно (градиентный и однородный образец).

Результаты расчетов получены в виде текущих конфигураций «ударник – мишень», графиков и таблиц. В контрольных точках рассчитаны гидростатическое давление и девиаторные напряжения. Вычислен объем поврежденности преграды и градиентной подложки вместе и отдельно. Выявлен диапазон начальных скоростей, при котором наличие градиентной подложки приводит к увеличению ударной стойкости преграды.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ 13-08-00509А, 13-08-00296А.

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ ЛОКАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА  
ЭНЕРГИИ НА ЭВОЛЮЦИЮ ТЕПЛООВОГО ФАКЕЛА  
В ЗАМКНУТОЙ КВАДРАТНОЙ ПОЛОСТИ  
EFFECT OF HEAT SOURCE SIZES ON EVOLUTION OF THERMAL  
PLUME INSIDE SQUARE CAVITY**

**Н.С. Гибанов, М.А. Шеремет  
N.S. Gibanov, M.A. Sheremet**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University  
fire9n@mail.ru

Целью настоящего исследования является численный анализ влияния размеров локального источника энергии на формирование и развитие двумерных тепловых факелов в замкнутой квадратной полости, а также эволюция локального и интегрального чисел Нуссельта в нестационарных режимах.

Рассматривается краевая задача естественной конвекции в замкнутой полости с локальным источником энергии постоянной температуры. Предполагается что горизонтальные стенки адиабатические, а на вертикальных стенках поддерживается постоянная минимальная температура. Режим течения – ламинарный. Среда в области считается ньютоновской, теплопроводной и удовлетворяющей приближению Буссинеска.

Процессы переноса тепла описываются системой нестационарных двумерных уравнений конвекции Обербека-Буссинеска в безразмерных переменных «функция тока – завихренность» [1]:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \frac{\partial \Omega}{\partial X} - \frac{\partial \Psi}{\partial X} \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = \sqrt{\frac{\text{Pr}}{\text{Ra}}} \left( \frac{\partial^2 \Omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Y^2} \right) + \frac{\partial \Theta}{\partial X}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} = -\Omega, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \frac{\partial \Theta}{\partial X} - \frac{\partial \Psi}{\partial X} \frac{\partial \Theta}{\partial Y} = \frac{1}{\sqrt{\text{Ra} \cdot \text{Pr}}} \left( \frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Y^2} \right). \quad (3)$$

Принимается, что в начальный момент времени жидкость, заполняющая полость, является неподвижной и имеет постоянную и одинаковую во всех точках температуру.

Безразмерные граничные условия для предложенной системы уравнений имеют вид:

$$\begin{aligned}
& X = 0, \quad X = 1, \quad 0 \leq Y \leq 1: \\
& \frac{\partial \Psi}{\partial X} = \Psi = 0, \quad \Omega = -\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2}, \quad \Theta = 0; \\
& Y = 0, \quad Y = 1, \quad \text{вне источника энергии:} \\
& \Psi = \frac{\partial \Psi}{\partial Y} = 0, \quad \Omega = -\frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2}, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial Y} = 0.
\end{aligned} \tag{4}$$

Сформулированная задача (1)–(4) решена методом конечных разностей [2]. Разностные уравнения Пуассона для функции тока решены с использованием метода последовательной верхней релаксации. Для аппроксимации конвективных слагаемых в эволюционных уравнениях применялась монотонная схема А.А. Самарского. Уравнения дисперсии завихренности и энергии решались с использованием локально одномерной схемы А.А. Самарского. Тестирование численной методики проведено на ряде модельных задач [1, 2].

Численный анализ проведен в следующем диапазоне изменения чисел Рэлея  $10^5 \leq Ra \leq 10^6$ . Было установлено, что вне зависимости от размера источника энергии при  $Ra = 10^5$  над тепловыделяющим элементом сразу формируется только один двумерный тепловой факел. При  $Ra = 10^6$ , в зависимости от размеров источника, возможно зарождения структуры, состоящей из двух тепловых факелов. Необходимо отметить, что увеличение размеров источника энергии проявляется в модификации временной зависимости для интегрального числа Нуссельта на поверхности тепловыделяющего элемента. Основной причиной таких изменений является сокращение расстояния от вертикальных стенок источника до изотермических границ полости.

Работа реализована в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (задание № 13.1919.2014/К).

### *Литература*

3. *Полежаев В.И., Буне А.В., Везуб Н.А. и др.* Математическое моделирование конвективного тепло- и массообмена на основе уравнений Навье–Стокса. М.: Наука, 1987. 274 с.
4. *Шеремет М.А.* Сопряженные задачи естественной конвекции. Замкнутые области с локальными источниками тепловыделения. Берлин: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 176 с.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАЖИГАНИЯ  
ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УБЫВАЮЩЕГО  
ПОТОКА ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ  
EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF IGNITION OF PINE WOOD  
UNDER DECREASING RADIANT ENERGY FLUX**

**В.О. Гук, В.Т. Кузнецов, А.И. Фильков  
V.O. Guk, V.T. Kuznetsov, A.I. Fil'kov**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University  
bwridderr@mail.ru

Процесс зажигания существенно зависит от типа теплового потока, является ли он статическим или динамическим (когда зажигание зависит от времени). При этом зажигание горючих материалов в динамических условиях изучено недостаточно. Если учесть, что в реальных условиях преобладает динамический тип теплового потока, то актуальность данной проблемы очевидна.

В данной работе приводится анализ результатов зажигания образцов древесины уменьшающимся со временем тепловым потоком. В качестве исследуемых образцов использовалась древесина сосны. Образцы представляли собой цилиндры диаметром  $1.8 \cdot 10^{-2}$  м и высотой  $1.5 \cdot 10^{-2}$  м. Поверхность образцов, поглощающая излучение, покрывалась ламповой копотью. Поток падал на образцы перпендикулярно волокнам древесины.

Для сравнения времен задержки зажигания в статических и динамических условиях, тепловой поток в динамических условиях усредняли. Для этого использовали следующую методику. Измеряли с помощью микрокалориметра на фиксированных расстояниях от фокальной плоскости отражателя интенсивность потока излучения. При известной скорости перемещения образца вдоль оптической оси эллиптического отражателя можно перейти от фиксированных значений расстояния ко времени.

Измерение времени задержки зажигания осуществляли с помощью фотодиода по появлению пламени. Имея время задержки зажигания образца, можно найти тепловой поток в момент зажигания, используя кривую распределения теплового потока от времени.

В ходе проведенных экспериментов было установлено, что для образцов сосны при убывающем потоке излучения время задержки зажигания в 2–2.5 раза меньше, чем для постоянного потока. При этом, с уменьшением величины теплового потока, время задержки зажигания в статических условиях растет быстрее, чем для динамических условий. Полученные результаты не противоречат работе [1], где экспериментально показано, что в случае возрастающего теплового потока время задержки зажигания нитроклетчатки больше, чем при постоянном потоке.

По итогам экспериментов были получены времена задержки зажигания древесины сосны при нагреве в условиях убывающего теплового потока. Проведено сравнение полученных данных для постоянного теплового потока [2].

### *Литература*

1. Еналеев Р.Ш., Матеосов В.А., Синаев К.Н., Динавецкий В.Д., Гайнутдинов Р.Ш. Экспериментальное исследование процесса зажигания конденсированных веществ при динамических условиях подвода лучистой энергии // Физика горения и методы ее исследования, Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та 1973. С. 80–86.

2. Kuznetsov V.T., Fil'kov A.I. Ignition of various wood species by radiant energy // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2011, Vol. 47, no. 1. P. 65–69.

## **ПОВЕДЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ МОДЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТИПА МАТРИЦА – ВКЛЮЧЕНИЕ SURFACE DEFORMATION BEHAVIOR OF A SINGLE INCLUSION MODEL**

**О.С. Зиновьева<sup>1,2</sup>, В.С. Шахиджанов<sup>1</sup>  
O.S. Zinovieva<sup>1,2</sup>, V. Shakhijanov<sup>1</sup>**

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

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

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University

<sup>2</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of RAS  
emelyanova@ispms.tsc.ru

Цель работы – изучить влияние внутренней структуры на формирование поверхностного деформационного рельефа на примере модельной системы «матрица – включение».

Задача об одноосном растяжении двумерных и трехмерных образцов, содержащих единичные включения квадратной/кубической и сферической формы, решалась методами конечных разностей и конечных элементов, соответственно. Математическая постановка плоской задачи в деформациях приведена в [1]. Трехмерная задача решалась в квази-статической постановке, с использованием программного комплекса ABAQUS. Рассматривалась область упругого нагружения. Ориентация включения по отношению к оси растяжения, упругие свойства модельного материала включения и расстояние включения от свободной поверхности в расчетах варьировались. Модельный материал матрицы по механическим свойствам соответствовал алюминиевому сплаву.

Очевидно, что концентрация напряжений наблюдается вблизи границы раздела «матрица – включение». В случае более жесткого включения на поверхности образца наблюдается область экструзии, в случае более мягкого – интрузии. Показано, что неоднородность внутренней структуры приводит к сложному напряженно-деформированному состоянию,

которое, в свою очередь, результируется в виде деформационных складок на свободной поверхности образца.

Установлены зависимости формы и амплитуды поверхностного деформационного рельефа от ориентации и расположения единичного включения относительно свободной поверхности, а также от соотношения упругих свойств включения и матрицы. Показано, что на расстоянии от поверхности, равном линейному размеру включения, его ориентация практически не оказывает влияния на рельефные образования. Для включения, выходящего на поверхность, ориентация оказывает существенное влияние на форму и амплитуду рельефных образований. Показано, что для включения, ориентированного под углом  $45^\circ$  к оси растяжения, наблюдается линейная зависимость амплитуды рельефной складки от расположения включения, в то время как для других случаев зависимость не линейна. Проанализирована причина нелинейности с точки зрения механики, наглядно продемонстрировано, что нелинейность связана с концентрацией растягивающих и сжимающих напряжений, направленных по нормали к свободной поверхности, в области включения.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ (грант № 14-08-00277-а) и государственной программы исследований РАН. Авторы выражают признательность научному руководителю д.ф.-м.н. В.А. Романовой за полезные дискуссии и ценные замечания.

#### *Литература*

1. *Wilkins M.L.* Computer simulation of dynamic phenomena. Springer, 1999.

### **ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИБКОЙ ПАРУСНОЙ ЛОПАСТИ ВЕТРОТУРБИНЫ THE STUDY OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF FLEXIBLE SAIL BLADE OF WIND TURBINE**

**Ж.Т. Камбарова, М.М. Тургунов, А.Р. Алибекова**

**J.T. Kambarova, M.M. Turgunov, A.R. Alibekova**

Карагандинский государственный университет им. академика Е.А.Букетова

Academician E.A.Buketov Karaganda State University

kambarova@bk.ru

Лопастей с динамически изменяемой формой поверхности решают задачу повышения коэффициента использования энергии ветра при малых среднегодовых скоростях ветра. Это достигается тем, что создаются условия для обтекания лопастей, близкие к условиям безотрывного обтекания, что приводит к повышению коэффициента подъемной силы лопастей. Для этого лопасти ветротурбины выполнены в виде



треугольного паруса. Парус преобразует энергию ветра, и на нем возникают аэродинамические силы, в том числе и сила тяги, который способствует движению ветротурбины. Аэродинамическая сила может быть разложена на две слагаемые: силу тяги от которой зависит скорость хода, и поперечную силу. Аэродинамическая сила на парусе зависит, в общем, от давлений, возникающих на подветренной и наветренной сторонах паруса, точнее сказать, от изменений статического и динамического давлений при обтекании паруса воздушным потоком [1].

Предлагаемая ветротурбина, за счет саморегулируемой формы поверхности лопастей, под действием прямого потока ветра и радиального потока при вращательном движении обладает оптимальными аэродинамическими характеристиками. Ветротурбина в потоке ветра является самоорганизованным устройством, эффективно преобразующим энергию ветра в энергию вращательного движения. Гибкость конструкции обеспечивает минимальность аэродинамических сопротивлений, а также приводит к росту коэффициента использования ветра. Ветротурбина работает следующим образом: под воздействием потока ветра треугольная лопасть ветротурбины, расположенная под углом к направлению движения потока ветра, испытывает боковую силу давления и согласно законам аэродинамики толкает каркас, приводя его во вращательное движение. Появляющаяся сила является силой тяги лопасти преобразующая энергию ветра во вращательное движение ветротурбины.

Лопасть с динамически изменяемой формой поверхности за счет воздействия ветра, выполненной в виде треугольного «паруса» с подвижным концом, при изменении направления ветра перекидывается в другую сторону вращающегося каркаса ветротурбины, тем самым обеспечивается сохранение первоначального направления вращения оси ветротурбины.

Из общей теории аэродинамики известно, что характеристики аэродинамической силы зависят от следующих факторов [2]: а) динамического давления; б) площади паруса,  $m^2$ ; в) угла установки паруса относительно направления ветра; г) формы паруса, его профиля, полноты пуза и т.п.; д) свойств парусной ткани, т.е. ее гладкости, жесткости, тягучести, плотности и т.п.; е) угла наклона паруса.

В широком диапазоне изменения направления ветра ветротурбина сохраняет работоспособность. При этом изменение направления ветра на противоположную не изменяет направление вращения оси ветротурбины. Это также является положительным эффектом, обладающим удобством при эксплуатации. Имеется возможность поддержания постоянства оборотов ветротурбины при изменении скорости ветра путем изменения длины крепёжных нитей подвижного конца лопастей в зависимости от скорости ветра.

Для определения оптимального геометрического размера треугольного гибкого паруса были проведены измерения подъемной силы и силы лобового сопротивления парусной лопасти уменьшенного размера от скорости ветра. Испытания парусных лопастей с подвижным концом проводились в аэродинамической трубе Т-1-М. По отдельности парусные лопасти устанавливались в рабочей части аэродинамической трубы Т-1-М и исследовались зависимости аэродинамических характеристик лопастей от скорости набегающего потока. Скорость потока регулировалась с помощью пульта управления аэродинамической трубы и изменялась от 3 до 12 м/с.

Получены зависимости подъемной силы и силы лобового сопротивления парусных лопастей с различными углами вершинами от скорости ветра. Из полученных зависимостей определено, что подъемная сила и сила лобового сопротивления лопастей пропорционально скорости потока ветра. Из сравнения зависимостей парусных лопастей с различными углами одной вершины определено, что значение подъемной силы парусной лопасти с углом вершины 90 градусов выше, чем у остальных. Таким образом, оптимальными аэродинамическими характеристиками обладает гибкая парусная лопасть с углом вершины 90 градусов.

#### *Литература*

1. *Мархай Ч.* Теория плавания под парусами. М., 1970. 411 с.
2. [http://tapemark.narod.ru/vodnik/4\\_04.html](http://tapemark.narod.ru/vodnik/4_04.html)

## **ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА A DEVICE FOR MEASURING HEAT FLUX**

**Д.Ж. Карабекова  
D.Z. Karabekova**

Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова  
Kazakhstan, Karaganda State University named after Y.A. Buketov  
karabekova71@mail.ru

Актуальной задачей, стоящей перед предприятиями коммунальной теплоэнергетики, является надежное обеспечение потребителей теплом и горячей водой. Вследствие значительного физического износа трубопроводов системы теплоснабжения, практически на любом участке теплосети в любое время может возникнуть авария. Последствиями ее, помимо снижения комфортных условий для потребителя, являются материальные потери, связанные с прекращением подачи тепла и горячей воды. Утечка из системы 10 тонн нагретого до 100 градусов теплоносителя эквивалентна потере 1 Гкал тепла. Следовательно, оперативный поиск

утечек на трубопроводах, и устранение их, является одной из актуальных проблем [1].

В последнее время широко обсуждаются аспекты эксплуатации и диагностики подземных инженерных сетей, в т.ч. и тепловых сетей канального исполнения. Диагностика тепловых сетей – это косвенный контроль состояния технологического оборудования и строительных конструкций, скрытых слоев грунта, а в городских условиях дополнительно слоями асфальта, щебня, а в ряде случаев и слоем строительного мусора, от визуального наблюдения. Это большой вопрос почти для всех предприятий, занимающихся вопросами транспорта тепловой энергии, горячей и холодной воды в городских условиях. Например, в городе Караганде подземная прокладка составляет до 75% трубопроводов тепловых сетей, до 55% сетей горячего водоснабжения, а для сетей холодного водоснабжения этот показатель составляет почти 100% [2].

В настоящее время значительное количество трубопроводов различного технологического назначения после длительной эксплуатации требуют оценку состояния с целью обеспечения надежности, продления ресурса и оптимизации ремонтно-монтажных и строительных работ. Поэтому на первом этапе технического диагностирования максимум информации стремятся получить без вскрытия грунта

В тепловых методах неразрушающего контроля используется тепловая энергия, распространяющаяся в объекте контроля. Температурное поле поверхности объекта является источником информации об особенностях процесса теплопередачи, которые, в свою очередь, зависят от наличия внутренних или наружных дефектов. Под дефектом при этом понимается наличие скрытых раковин, полостей, трещин, всевозможных отклонений физических свойств объекта контроля от нормы, наличия мест локального перегрева и т.п.

Разработанный датчик теплового потока не зависит от изменения состояния окружающей среды. Общим элементом этих приборов является батарейный термоэлектрический датчик специальной конструкции, выполняющий роль термоэлектрического преобразователя теплового потока. Термоэлектрический датчик выполнен в форме ограниченного цилиндра, одно основание которого представляет рабочую поверхность, второе основание имеет тепловой контакт с телом, имеющим температуру окружающей среды. Встроенные нагреватели позволяют создавать тепловой поток через термоэлектрический датчик в направлениях перпендикулярных его основаниям [3].

Активные спай термоэлектрического преобразователя имеют тепловой контакт с приемной пластиной, а «пассивные» спай – с нагревательным элементом, температура которого контролируется термозависимым элементом. С помощью нагревательного элемента через

термоэлектрический батарейный преобразователь теплового потока создает тепловой поток, равный по величине и противоположный по направлению тепловому потоку от исследуемой поверхности при нормальных условиях эксплуатации исследуемого объекта. Поток от нагревателя является реперным для исследуемого объекта, с ним сравниваются тепловые потоки в областях, где предполагаются дефекты [4, 5].

Разработанный прибор позволяет по характеру изменения тепловых потерь и температуры грунта над обследуемыми теплотрассами оперативно и с незначительными затратами определять места утечек теплоносителя в окружающую среду, а также своевременно определять участки теплопроводов с неудовлетворительным состоянием их теплоизоляционных и ограждающих конструкций.

### *Литература*

1. [www. atamekenunion.kz](http://www.atamekenunion.kz)
2. *Геращенко О.А.* Теплотрический индикатор диагностики теплотрасс ТИДиТ-01 / О.А.Геращенко, Т.Г. Грищенко // Приборы для теплофизических измерений: каталог. Киев: Час, 1991. С. 19.
3. А.С. 37716 РК 2001г. Прибор для измерения теплового потока. Кусаиынов К., Гладков В.Е., Карабекова Д.Ж.
4. *Nussupbekov B.R., Karabekova D.Zh., Zhargakova S.S.* Nondestructive testing for diagnostics of pipelines. Physical technical journal. 2012. Vol. 9. №2(18). P. 13–18.
5. *Kurytnik I, Nussupbekov B, Karabekova D, Zhargakova S.* Thermal control method for the diagnosis of underground heating systems. Vestnik of the Karaganda State University named after EA Buketova. 2014. Vol. 74. No.2. P. 52–55.

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ NUMERICAL MODELING FOR IGNITION OF WOOD**

**А.В. Каргин, Р.Ш. Еналеев  
A.V. Kargin, R.Sh. Enalejev**

Казанский национальный исследовательский технологический университет  
Kazan national research technological university  
[firepredict@yandex.ru](mailto:firepredict@yandex.ru)

Древесина является традиционным материалом в строительстве и самым распространенным природным полимерным композиционным горючим материалом. Мировая пожарная статистика показывает, что последствия воздействия опасных факторов природных и техногенных пожаров на лесные и строительные горючие материалы являются дестабилизирующим фактором на нашей планете.

Создание теоретических основ процессов воспламенения и горения древесины является актуальной проблемой оценки ее пожарной опасности.

За последние полвека в работах Simms, Гайнутдинова, Roberts, Kung, Гришина, Kashiwagi, Конева, Mikkola, Torvi, Асеевой, Urbas, Agarwal, Еналеева, Babrauskas, Torero, Кузнецова, Филькова и др. приводится огромный объем расчетных и экспериментальных данных по различным стадиям термоокислительной деструкции древесины – испарению, пиролизу, химическим реакциям в твердой и газовой фазах.

Однако в литературе крайне ограничены сведения по моделям, прогнозирующим характеристики зажигания и опасные зоны воспламенения лесных горючих материалов и конструкций из древесины в чрезвычайных ситуациях в режиме online.

В предлагаемой математической постановке гетерогенного воспламенения полимерных горючих материалов за основу принята твердофазная тепловая модель зажигания гомогенных топлив [1]. В отличие от элементарной тепловой модели, переход к горючим полимерным материалам с физико-химическими превращениями и гетерофазным механизмом зажигания вызывает непреодолимые математические трудности. Сложность заключается не столько в физико-математической постановке, сколько в идентификации многочисленных переменных коэффициентов и кинетических параметров. Для определения некоторых из них имеются стандартные методики, для других – литературные данные. При высокоинтенсивном нагреве полимерных материалов подавляющее большинство коэффициентов изменяются в результате их зависимостей от температуры. Данные по этим зависимостям практически отсутствуют и в математической постановке приняты их интегральные значения. Но и по интегральным значениям сведения также крайне ограничены. Для определения интегральных значений коэффициентов и кинетических параметров предлагается интервальный по температуре метод идентификации переменных в вычислительном эксперименте. Постановка таких задач относится к некорректно поставленным задачам уравнений математической физики.

При численном моделировании зажигания древесины момент воспламенения определяется по времени достижения критического значения критерия воспламенения. В качестве критерия используется отношение скорости роста температуры поверхности при решении уравнения Фурье с источниками нехимической природы и физико-химическими превращениями к скорости роста температуры химически инертного тела. Инвариантность критерия к динамике нагрева, объемным источникам нехимической природы, оптико-геометрическим и теплофизическим свойствам топлива, механизму нагрева первоначально была установлена при численном моделировании зажигания баллиститных порохов. Поэтому он условно был назван «универсальным». Обосновано его критическое значение, равное 11. Применение универсального критерия для прогнозирования времени воспламенения целлюлозных

текстильных материалов показало его адекватность экспериментальным данным [2].

В вычислительном эксперименте и опытной проверке адекватности модели в качестве объекта исследования выбраны образцы сосны, березы и дуба. Эксперименты проводились на установке теплового излучения в диапазоне плотности теплового потока 20–50 кВт/м<sup>2</sup>. Температура поверхности образцов в процессе нагрева и воспламенения измерялась ленточными микротермопарами с применением АЦП фирмы L-Card. Время задержки воспламенения – по резкому излому на температурной записи поверхности.

В настоящее время планируются совместные исследования с Томским государственным университетом (Фильков) по физическому и математическому моделированию зажигания древесины при динамическом нагреве.

### *Литература*

1. Merzhanov A.J., Averson A.E. The Present State of the Thermal Ignition Theory: An Invited Review // Combustion and Flame. 1971. Vol. 16. P. 89–124.

2. Enalejev R.Sh. Modeling of the fabrics ignition // Proceedings of 4th Fire Behavior and Fuels Conference, July 1–4, 2013, St. Petersburg, Published by the International Association of Wildland Fire, 2014, Missoula, Montana, USA. P. 394–410.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ АНОМАЛЬНО-ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ С ПРЕПЯТСТВИЕМ MODELING OF DYNAMICS OF POWER-LAW FLUID IN THE CHANNEL WITH OBSTACLE**

**А. Марценко, М. Марценко**

**A. Martsenko, M. Martsenko**

Национальный исследовательский Томский государственный университет

National Research Tomsk State University

martsenko@sibmail.com

В работе рассматривается движение нелинейно-вязкой жидкости со степенным законом связи тензора напряжений с тензором скоростей деформаций [1] при нагревании в канале сложной формы с препятствием. При численных расчетах действие массовых сил не учитывается. При записи математической модели тепломассопереноса нелинейной жидкости используется система уравнений, состоящая из уравнения неразрывности, движения и энергии [2]. Численное решение уравнений движения проводилось в естественных переменных методом расщепления полей скорости и давления. Решение уравнения движения, энергии и уравнения Пуассона для определения поправки к давлению осуществлялось на

разнесенной разностной шахматной сетке при помощи обобщенной неявной схемы переменных направлений установлением по времени. При записи конвективной и диффузионной части уравнений переноса использовалась экспоненциальная схема. Достоверность численных исследований проверялась тестовыми расчетами на сеточную сходимость, сравнением с известными результатами течения ньютоновской жидкости при ламинарном режиме (показатель нелинейности  $m=1$ ). Получены результаты расчета полей скорости и температуры в канале с препятствием, а также профили скорости и температуры за препятствием. Математическая модель может быть использована для описания стационарного процесса нагревания потока нелинейно-вязкой среды в каналах с изменением поперечного сечения. Разработанная модель может быть полезна при создании инженерной методики расчета теплообменного оборудования для нагрева сред с аномальной вязкостью.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект № 13-08-00372-а)

### *Литература*

1. Шульман З.П. Конвективный теплоперенос реологически сложных жидкостей. М.: Энергия, 1975.

2. Шваб А.В., Марценко М.С., Рыжих Ю.Н. Моделирование гидродинамики и процесса усреднения высококонцентрированной гранулированной среды в аппаратах порошковой технологии // ИФЖ. 2011. Т. 84, № 4. С. 676–681.

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДГОТОВКИ РАБОЧЕГО ТЕЛА ДЛЯ КОМПРЕССОРА В СОСТАВЕ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ MATHEMATICAL MODELING OF THE PREPARATION OF THE WORKING FLUID TO THE COMPRESSOR IN THE COMPOSITION OF THE GAS TURBINE PLANT**

**Е.А. Маслов, Н.С. Федотова**

**E.A. Maslov, N.S. Fedotova**

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики ТГУ

National Research Tomsk Polytechnical University

Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics TSU

maslov\_eugene@mail.ru, natafedotova91@mail.ru

Одним из наиболее эффективных способов увеличения тепловой экономичности и удельной мощности ГТУ является впрыск воды на входе в компрессор. Впрыск воды позволяет снизить температуру воздуха на входе в компрессор и повысить мощность газовой турбины, что особенно

актуально в жаркое время года, когда проблематично покрытие пиковой потребности в электроэнергии. Воду впрыскивают при помощи форсунок, обеспечивающих ее хороший распыл. При этом капли воды, попадающие в поток воздуха, испаряются, в результате чего от воздуха отнимается теплота парообразования. Сжатие воздуха в таких условиях сопровождается отводом теплоты, что уменьшает удельную работу компрессора.

Рассматривается задача испарения частиц воды при течении высокотемпературной струи вязкого сжимаемого теплопроводного газа в канале круглого сечения теплоносителя. Частицы воды инжектируются в высокотемпературный поток с некоторой начальной скоростью и температурой.

Математическая модель рассматриваемого процесса испарения капель описывается уравнением движения в поле скоростей установившегося течения газа с учетом сил вязкого сопротивления и силы тяжести и уравнением теплопроводности в сферической системе координат, которые дополняются начальными условиями и граничными условиями. Приняты следующие допущения:

1. Скорость струи дозвуковая.
2. Режим течения струй ламинарный.
3. Стенки канала являются адиабатическими.
4. Капли воды сферические.
5. Капли взаимодействуют в режиме трения-скольжения.

Численное решение поставленной задачи было реализовано с помощью метода контрольных объемов. Для анализа сеточных параметров, методов и алгоритмов численного решения использовалась различная аппроксимация конвективных членов, а также различные методы корректировки поля скорости и давления при решении уравнения Пуассона.

Для анализа испарения капель воды в паровоздушной смеси в канале круглого сечения рассматривался канал длиной 2 м и диаметром 0,5 м. Исследование проводим при следующих постоянных значениях:  $T_f=100^\circ\text{C}$  – температура движущегося потока,  $u_{in} = 10$  м/с – начальная скорость движущегося потока,  $T_{inj}=20^\circ\text{C}$  – температура инжектируемой капли воды.

При заданных параметрах исследования капли воды с начальным диаметром 2 мм гарантировано испаряются при впрыскивании их в поток паровоздушной смеси в пределах рассматриваемого диаметра канала, не осаждаясь на его стенки, и протяженность участка испарения капель составляет 0,05 м. Для капель большего диаметра нужно увеличить скорость потока, для того чтобы они не падали на стенки канала.



## *Литература*

1. *Versteeg H.K., Malalasekera W.* An introduction to computational fluid dynamics. The finite volume method. – Longman Scientific & Technical. 1995. P. 258
2. *Виноградова И.А., Зубков В.Г.* Газодинамические процессы в теплоэнергетических установках на базе метода контрольного объема // Математическое моделирование, 2002. Т. 14, № 6, С. 3–24.
3. *Маслов Е.А., Жарова И.К., Федотова Н.С.* Особенности численного моделирования течения в канале // Всероссийская конференция по математике и механике, посвященная 135-летию Томского государственного университета и 65-летию механико-математического факультета: сб. тезисов. Томск: Изд-во «Иван Федоров», 2013. 244 с. ISBN 978-5-91701-084-7. С. 173.

### **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРЕНИЯ 4% МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В УЗКОМ КАНАЛЕ THE NUMERICAL STUDY OF THE STABILITY OF THE 4% METHANE-AIR MIXTURE COMBUSTION IN THE NARROW CHANNEL**

**А.Ю. Крайнов, К.М. Моисеева**  
**A.Yu. Krainov, K.M. Moiseeva**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University  
akrainov@ftf.tsu.ru

Одной из классических задач отечественной школы горения является задача о сжигании газовой смеси в химическом реакторе. Актуальность данной задачи связана с требованиями промышленности, где зачастую необходимо организовать безопасное и устойчивое горение газа в энергетической установке, являющейся аналогом химического реактора. Решение подобной задачи проводилось в цикле работ различных авторов. В частности, задача об устойчивости горения газовой смеси в химическом реакторе решена в классической работе [1]. Согласно [1] устойчивость горения газовой смеси в реакторе определяется совокупным влиянием параметров тепло- и массопереноса в системе. Исследования более поздних авторов были направлены на подтверждение данного факта и на исследование возможности управления процессом через изменение величины теплообмена в реакторе.

Процессы теплообмена в химическом реакторе, помимо прочего, определяются конструкцией устройства. Управлять устойчивостью горения можно через изменение конструкции реактора. В настоящее время задача горения газовой смеси в химическом реакторе получила развитие в задаче о горении газа в узком канале или тонкой трубке. Для такой задачи определяющим параметром является поперечный размер канала. Для узких

каналов организовать устойчивое горение сложно, а зачастую, для обычных условий, невозможно. Потери тепла через боковую поверхность трубки или канала превышают теплоприход от химического процесса и приводят к затуханию пламени. В современных работах предлагается использовать ряд механизмов для поддержания устойчивого горения, среди которых частичный подогрев стенок канала или модификация конструкции.

Современные исследования по горению газовых смесей в горелочных устройствах направлены не только на развитие и совершенствование миниатюрных горелочных устройств, но и на проблему сжигания смесей, не горящих в обычных условиях. В частности, одним из актуальных направлений на сегодняшний день является задача об эффективном сжигании бедной метано-воздушной смеси, являющейся продуктом производства. Например, существует проблема по эффективной утилизации шахтного метана с процентным содержанием менее 5%.

Целью настоящей работы являлось исследование возможности устойчивого сжигания 4% метано-воздушной смеси в узком канале. Узкий канал был дополнен инертным внутренним телом, участвующим в процессах теплообмена в системе. Инертное тело располагалось вдоль оси канала, считалось, что радиус инертного тела соотносится с радиусом канала, как  $r_{body} : r_{can} = 1 : 3$ . Задача решалась в двухмерной осесимметричной математической постановке. При решении задачи были рассмотрены два варианта инициирования горения – зажигание нагретой боковой поверхностью канала и зажигание инертным внутренним телом.

Безразмерная математическая постановка задачи определялась уравнениями энергии для реакционной смеси и внутреннего тела, уравнением баланса массы горючей компоненты и замыкающими краевыми условиями. Система уравнений решалась численно методом продольно-поперечной прогонки. Конвективные слагаемые задавались конечными разностями против потока. Аппроксимационная сходимость разностной схемы проверялась на решении частных случаев задачи горения газа в горелочном устройстве. Параметры разностной сетки выбирались так, чтобы погрешность расчетов составляла не более 3%. При расчетах варьировалось значение радиуса канала, при этом радиус инертного тела менялся пропорционально,  $r_{body} : r_{can} = 1 : 3$ .

Из численного исследования задачи было определено критическое значение радиуса канала, для которого становится невозможным организовать устойчивое горение 4% метано-воздушной смеси. Показано, что при инициировании горения нагретым внутренним телом существует верхняя и нижняя граница значений радиуса канала, вне которых волна горения затухает. Проведено сопоставление полученных результатов с результатами расчета по одномерной математической модели, соответствующей работе [2]. Показано, что результаты расчетов по

одномерной модели соответствуют результатам расчетов по двумерной математической модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания №2014/223 (код проекта 1943).

### *Литература*

1. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980. 478 с.

2. Буркина Р.С., Моисеева К.М. Моделирование процессов теплообмена и химического реагирования горючей смеси в проточном реакторе // Физика горения и взрыва. 2014. Т. 50, №5. С. 3–12.

## **ДВИЖЕНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ В ВОДНОЙ СРЕДЕ MOVEMENT OF AXISYMMETRIC MODELS IN THE WATER MEDIUM**

**К.Г. Перфильева**

**K.G. Perfilieva**

Национальный исследовательский Томский государственный университет

National Research Tomsk State University

kis33365@yandex.ru

При движении тел в водной среде сила сопротивления намного выше, чем при движении в воздухе, плотность которого на три порядка меньше. Значительное снижение коэффициента сопротивления можно получить при движении тел в режиме суперкавитации. При этом сопротивление среды снижается с помощью специального головного кавитатора образующего полость, в которой находится модель [1–3].

Уравнение движения тела постоянной массы  $m_0$  в жидкой или газообразной среде имеет вид

$$m_0 \frac{du}{dt} = -C_x S_M \frac{\rho u^2}{2},$$

где  $u$  – скорость движения тела;  $t$  – время;  $C_x$  – безразмерный коэффициент сопротивления;  $S_M$  – площадь миделева сечения тела;  $\rho$  – плотность жидкости.

Основным критерием подобия суперкавитационного движения является число кавитации

$$\sigma = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot u^2},$$

где  $\Delta p = p(H) - p_k$ ;  $p(H)$  – гидростатическое давление на глубине погружения  $H$ ;  $p_k$  – давление насыщенных паров воды при пузырьковой кавитации.

Режим суперкавитации реализуется при значении  $\sigma < \sigma_{\text{до}} = 0,06$  [1–3].

Движение суперкавитирующей модели существенно отличается от движения любого обычного тела при сплошном обтекании. Это различие определяется тем, что большая часть суперкавитирующей модели не взаимодействует с набегающим потоком и гидравлические силы возникают только на переднем торце модели (на кавитаторе).

Сопротивление движению суперкавитирующей модели, полностью охватываемой газовой каверной, определяется сопротивлением кавитатора и рассчитывается по формуле

$$R_x = C_x S_k \frac{\rho u^2}{2},$$

где  $S_k$  – площадь поперечного сечения кавитатора.

Коэффициент сопротивления для кавитатора в форме диска, определяется формулой [1–3]

$$C_x = 0.82(1 + \sigma),$$

При больших скоростях движения и малых глубинах погружения величина  $\sigma$  становится малой, при этом коэффициент сопротивления примет постоянное значение

$$C_x = 0.82.$$

При этом уравнение движения инертной модели можно представить в виде

$$\frac{du}{dt} = -ku^2, \quad k = \frac{\rho C_x S_k}{2m_0} = \text{const.}$$

Интеграл этого уравнения (при  $u = u_0$  для  $t = 0$ ) имеет вид

$$u = u_0 \frac{1}{1 + ku_0 t}.$$

В работе получены условия движения осесимметричной модели в режиме суперкавитации в зависимости от скорости и глубины погружения.

Приведены результаты расчетов скорости и дальности движения модели при разных значениях массы и начальной скорости модели.

### *Литература*

1. Савченко Ю.Н., Семенко В.Н., Путилин С.И. Нестационарные процессы при суперкавитационном движении тел // Прикладная гидромеханика. 1999. Т. 1 (73), № 1. С. 79–97.
2. Власенко Ю.Д. Экспериментальные исследования суперкавитационных режимов обтекания самоходных моделей / Прикладная гидромеханика. 2000. Т. 2 (74), № 3. С. 26–39.
3. Савченко Ю.Н., Савченко Г.Ю. Оценка эффективности использования суперкавитации на осесимметричных корпусах // Прикладная гидромеханика. 2004. Т. 6 (78), № 4. С. 78–83.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ О РАСПАДЕ РАЗРЫВА В СЛУЧАЕ МЕЛКОЙ ВОДЫ THE PROBLEM OF BREAKUP OF A DISCONTINUITY SIMULATING IN THE SHALLOW WATER CASE**

**А.А. Потоцкая, М.Д. Михайлов**

**A.A. Pototskaya, M.D. Michailov**

Национальный исследовательский Томский государственный университет

National Research Tomsk State University

bubuzyonok@yandex.ru

Задача о разрушении плотины описывается уравнениями мелкой воды [1]. При выводе системы уравнений мелкой воды предполагается, что среда представляет собой достаточно тонкий слой, глубина которого много меньше его продольного размера, поэтому вертикальной составляющей скорости в слое можно пренебречь. Дополнительно предполагается, что жидкость несжимаема, находится в поле сил тяжести и ее температура постоянна.

Рассматривается одномерное течение жидкости в горизонтальном канале постоянного поперечного сечения с плоским дном. Начальные данные берутся из [2], чтобы впоследствии сравнить результаты. Длина канала  $L = 2000$  м.

В области задается уровень воды и ее скорость. Процесс движения жидкости описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} = -\frac{g}{2} \frac{\partial h^2}{\partial x} \end{cases} \quad (1)$$

с начальными условиями:

$$\begin{cases} u(x, 0) = u_0 = 0, \\ h(x, 0) = \begin{cases} h_1, & x \leq x_0, \\ h_0, & x \geq x_0. \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

где  $h$ , м – уровень воды,  $u$ , м/с – скорость,  $g$ , м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения,  $h_1 > h_0$ .

Решение задачи (1), (2) ищется численно с использованием явной схемы Мак-Кормака [3] второго порядка точности. Область  $\bar{G}$  покрывается сеткой:

$$\bar{\omega}_{h\tau} = \bar{\omega}_h \times \omega_\tau,$$

где  $\bar{\omega}_h = \{x_j: x_j = j \cdot h, j = \overline{0, n}\}$ ,  $\omega_\tau = \{t_k: t_k = k \cdot \tau, k = \overline{0, m}\}$ ,  $h = \frac{L}{n}$ ,  $\tau$  определяется из условия устойчивости.

Схема – дисперсионная с минимальной схемной вязкостью. Для сглаживания разрывов в решении предлагается использовать модификацию метода Бориса и Бука [4]. Она носит локальный характер и не нарушает консервативности разностной схемы. Постоянная диффузия в этом методе вводится только в областях немонотонности. При этом немного сглаживаются физические экстремумы, но, главным образом, устраняются осцилляции, порожденные схемой.

Коэффициент сглаживания в случае разрывных течений газа, когда образуются ударные волны и волны разгрузки в [4] рекомендуется брать из промежутка.

Одна из целей работы – определение оптимального коэффициента сглаживания для модификации метода Бориса и Бука в случае мелкой воды. Для этого проведен ряд численных экспериментов и дано сравнение полученных результатов с данными из [2]. Получен промежуток, из которого необходимо выбирать оптимальный коэффициент сглаживания.

Результаты численных расчетов представлены в виде графиков. Показано совпадение полученных результатов с результатами из [2].

### Литература

1. *Рождественский Б.Л.* Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике / Б.Л. Рождественский, Н.Н. Яненко. М.: Наука, 1978. 688 с.
2. *Богомолов С.В.* Моделирование волн на мелкой воде методом частиц / С.В. Богомолов, Е.В. Захаров, С.В. Зеркаль // Математическое моделирование. 2002. Т. 14. №. 3. С. 103–116.
3. *Уорминг Р.Ф.* Нецентральные разностные схемы второго и третьего порядка точности для решения нелинейных уравнений гиперболического типа / Р.Ф. Уорминг, П. Кутлер, Г. Ломакс // Ракетная техника и космонавтика. 1973. Т. 11, №2. С. 76–85.
4. *Войнович П.А. и др.* О расчете разрывных течений газа // препр. ФТИ им. АФ Иоффе АН СССР. Л., 1977. №. 561. 35 с.

**КОМПОЗИЦИОННЫЙ ИЗОЛИРУЮЩИЙ МАТЕРИАЛ  
ДЛЯ ОДЕЖДЫ СПАСАТЕЛЕЙ С КОМПЛЕКСОМ ЗАЩИТНЫХ  
СВОЙСТВ  
COMPOSITE INSULATING MATERIAL FOR RESCUERS CLOTHES  
WITH A COMPLEX OF PROTECTIVE PROPERTIES.**

**А.А. Сухова, Р.Ш. Еналеев  
А.А. Sukhova, R.Sh. Enalejev**

Казанский химический научно-исследовательский институт  
Kazan chemical research institute, Kazan national research technological university.  
alexandra\_suhova@mail.ru, firepredict@yandex.ru

В техногенных авариях на химических и нефтехимических предприятиях одной из главных целей аварийно-спасательных подразделений МЧС РФ является минимизация потерь в чрезвычайных ситуациях за счет безотлагательной медицинской помощи пострадавшим от воздействия высоких концентраций агрессивных, токсичных химических веществ и нефтепродуктов. При выполнении как штатных, так и аварийных работ имеется потенциальный риск появления очагов возгорания химически опасных веществ при контакте с другими органическими веществами или окислителями. Поэтому материалы одежды спасателей должны обладать комплексом защитных свойств как от воздействия химически опасных веществ, так и опасных факторов пожара.

На основании требований к защитным, изолирующим материалам, предназначенных для аварийных средств защиты кожи в ОАО «КазХимНИИ» в рамках ФЦП «Национальная система химической и биологической безопасности Российской Федерации (2009–2014 годы)» разработан композиционный материал (КМ) с широким спектром защитных свойств [1]. КМ состоит из пяти слоев включающих в себя текстильную основу с двухсторонним покрытием на основе бутилкаучука и тройного этиленпропиленового каучука и двух слоев на основе смеси хлорсульфированного полиэтилена и полихлоропрена. В покровном, фронтальном слое присутствует антипирен.

Результаты испытаний прорезиненного многослойного КМ на соответствие европейскому стандарту EN 943-2:2002 показали, что КМ отвечает требованиям самого высокого 6 класса защиты от химически опасных веществ, а также стойкости материала к открытому пламени в течение 10 секунд.

Однако в реальных условиях наибольшую опасность для человека представляет воздействие радиационно-конвективного нагрева. Поэтому в зарубежных стандартах проводится оценка материалов одежды от воздействия как открытого пламени, так и теплового излучения [2, 3]. С целью повышения защитных свойств от воздействия теплового излучения проведена модификация рецептуры фронтального слоя и технология склеивания слоев.

В результате испытаний модифицированного КМ по [2, 3] было установлено новое физико-химическое явление-«вспучивание» фронтального слоя. Механизм вспучивания обусловлен отслоением фронтального слоя при его нагреве выше 180 °С от других слоев, эластичного растягивания, образованием герметичного воздушного зазора. Теплозащитный эффект близок к вспучивающимся покрытиям (краскам), применяемых для пожарной защиты металлических и деревянных конструкций. Но механизм тепловой защиты принципиально отличается от традиционных покрытий, которые наносятся на защищаемый материал и при термическом разложении образуют пенококс. В КМ эффект тепловой защиты образуется в самом материале за счет образования воздушного зазора. Сравнительные испытания КМ с другими теплозащитными материалами показали, что термозащита находится на уровне серийных отражающих фильтрующих материалов для пожарных.

Проведено численное моделирование процесса теплопередачи в КМ в процессе инертного нагрева, термического разложения и образования воздушного зазора. Сложный теплообмен в зазоре моделируется введением эквивалентного коэффициента теплопроводности, зависящего от критериев Грасгофа и Прандтля [4].

На основе КМ в ОАО «КазХимНИИ» создан костюм высшего уровня защиты для персонала аварийно-спасательных формирований от воздействия предельных концентраций токсичных, агрессивных веществ, компонентов ракетного топлива, нефти и нефтепродуктов [5]. По защитным показателям и конструктивному исполнению КМ и костюмы на его основе не уступают лучшим зарубежным образцам (TeamMaster pro – ET, Vautex Elite ET), а по огне- и теплозащитными свойствами превосходят зарубежные аналоги.

### *Литература*

1. Пат. 2521053, Российская Федерация, МПК В32В25/10 А62В17/00 Способ получения многослойного изолирующего материала с широким спектром защитных свойств/ № 2012128292/05.
2. ISO 9151:1995. "Protectiv clothing against heat and flame: determination of heat transmission on exposure to flame".
3. ISO 6942:2003 "Textile fabrics – Burning behaviour – Evaluation of materials and material assemblies when exposed to a source of radiant heat".
4. *Мухеев М.А.* Основы теплопередачи. М.: Госэнергоиздат, 1956. 392 с.
5. Пат. 126944, Российская Федерация, МПК А62В17/00 Костюм герметичный изолирующий/№ 2012141977/12.



# ВСПЛЫТИЕ ОДИНОЧНОГО СФЕРИЧЕСКОГО ПУЗЫРЬКА В ПРИСУТСТВИИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ RISING OF A SINGLE SPHERICAL BUBBLE IN THE PRESENCE OF SURFACE ACTIVE SUBSTANCES

А.С. Усанина, М.А. Пахомов

A.S. Usanina, M.A. Pakhomov

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

National Research Tomsk State University

Kutateladze Institute of thermophysics RAS

Usaninaanna@mail.ru, pakhomov@ngs.ru

При движении пузырьков в двухфазной среде существенную роль играют свойства границы раздела фаз, в частности коэффициент поверхностного натяжения. Одним из физических факторов, влияющих на граничные условия, является наличие поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые могут на порядок изменить критериальные зависимости для движения частицы дисперсной фазы. На свободной границе пузырька, движущегося в жидкой среде с ПАВ, возникают тангенциальные капиллярные силы Марангони, способствующие увеличению коэффициента сопротивления частицы.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования влияния ПАВ на динамику всплытия одиночного сферического пузырька воздуха в вязкой жидкости (глицерине). В качестве ПАВ использовалось обычное жидкое мыло.

Исследование проводилось на установке, состоящей из вертикально установленной прозрачной кюветы с плоскопараллельными стенками, наполненной раствором жидкости, устройства для генерации пузырьков и системы визуализации процесса всплытия одиночного пузырька [1]. Эксперименты проведены в следующем диапазоне параметров: диаметр пузырька  $D=(3.22-6.27)$  мм, плотность жидкости  $\rho_l=1260$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициент динамической вязкости жидкости  $\mu_l=(2.13-2.44)$  Па·с, стационарная скорость всплытия пузырька  $u_0=(0.35-1.6)$  см/с; число Рейнольдса  $Re=(7 \cdot 10^{-3}-0.05)$ ; содержание ПАВ  $z=(0.01-0.13)$  %; коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma=42.3 \cdot 10^{-3}$  Н/м.

Анализ экспериментальных данных показал, что время оседания частиц ПАВ на поверхность пузырька  $t$  зависит от содержания ПАВ в глицерине. Для проведенных экспериментов при  $z < 0.037$  % время оседания составляет  $t \sim 10$  с. При  $z > 0.091$  % оседание частиц ПАВ происходит практически сразу при образовании пузырька.

Обнаружено, что при  $z > 0.091$  % происходит деформация пузырька; он принимает каплевидную форму с образованием «хвоста» в тыловой части пузырька. При этом формирование «хвоста» происходит постепенно по

мере всплытия пузырька. Минимальный диаметр пузырька, начиная с которого происходит деформация, уменьшается по мере увеличения содержания ПАВ.

В классических работах по всплытию одиночного пузырька воздуха в чистой жидкости [2] показано, что его деформация проявляется в виде появления «каверны» в нижней части пузырька, и выделяют три основные конфигурации пузырька при всплытии – эллипс, сферический сегмент с секущей плоскостью, расположенной ниже и выше диаметральной плоскости. Приобретение пузырьком каплевидной формы в жидкости с высоким содержанием ПАВ, по-видимому, объясняется утолщением пограничного слоя за счет добавки ПАВ и его «стеканием» с поверхности пузырька под действием силы тяжести.

Для исследованного диапазона чисел Рейнольдса  $Re=7 \cdot 10^{-3}-0.05$  получена уточненная зависимость для коэффициента сопротивления  $c_D=24.06/Re$  с коэффициентом детерминации, равным  $R^2=0.99$ . Полученная зависимость близка к закону сопротивления Стокса ( $c_D=24/Re$ ) для твердых сферических частиц [3]. Таким образом, в присутствии ПАВ характер всплытия пузырька совпадает с характером осаждения твердого шарика того же размера в жидкости, не содержащей ПАВ. Представляется целесообразным проведение исследований динамики всплытия пузырька в области больших чисел Рейнольдса в присутствии ПАВ.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-38-50151 мол\_нр).

### *Литература*

1. *Архипов В.А., Васенин И.М., Усанина А.С.* Экспериментальное исследование нестационарных режимов всплытия одиночного пузырька // Инженерно-физический журнал. 2013. Т. 86, № 5. С. 1097–1106.
2. *Bhaga D., Weber M.B.* Bubbles in viscous liquids: shape, wakes and velocities // Journal of Fluid Mechanics. 1981. Vol. 105. P. 61–85.
3. *Низматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987.

# **ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ТЕЧЕНИИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ИЗОГНУТОМ КАНАЛЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ NUMERICAL SOLUTION OF THE PROBLEM OF FLOW OF A VISCOUS FLUID IN A CURVED CHANNEL WITH THE USE OF PARALLEL PROGRAMMING**

**Е.И. Хегай**

**E.I. Hegay**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk state university  
efim41362@mail.ru

Рассматривается плоское установившееся течение ньютоновской несжимаемой жидкости в изогнутом канале. Подобные течения описываются системой, состоящей из уравнения движения Навье–Стокса и уравнения неразрывности. Жидкость подается в канал через входное сечение с постоянным расходом, при этом профиль скорости совпадает с параболическим, на стенках выполняются условия прилипания, на выходе – «мягкие» граничные условия. Решение поставленных задач сводится к отысканию стационарных полей скорости и давления, а так же распределения изолиний функции тока, которые характеризуют картину течения.

Задача решается численно с помощью конечно-разностного метода. Для нахождения стационарных полей скорости и давления в расчетных узлах разнесенной сетки используется метод установления и алгоритм SIMPLE [1]. Расчет на каждом шаге по времени сопровождается организацией итерационного процесса, при этом для расчета скорости используется экспоненциальная схема.

При написании программы использовалась технология параллельного программирования MPI [2] с целью уменьшения времени расчета. Вся область течения разбивается на 48 одинаковых подобластей, каждая из которых рассчитывается на отдельном процессоре. Между процессорами организован обмен информацией. Проводился сравнительный анализ времени расчета.

В результате были получены картины распределения изолиний функции тока, стационарных полей скорости и давления. В окрестности входной и выходной границ формируется одномерное течение, соответствующее установившемуся течению в плоском бесконечном канале с заданным расходом. В области уступа реализуется двумерное течение с циркуляционными зонами в окрестности внешнего и внутреннего углов. Проведены параметрические исследования картины течения в зависимости от определяющих параметров.

## Литература

1. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
2. Антонов А.С. Параллельное программирование с использованием технологии MPI: учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 2004. 71 с.

## ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ДЛЯ РАСЧЕТА ЛАМИНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ В ВОДОЕМЕ COMPUTATIONAL METHOD FOR CALCULATION OF A LAMINAR FLOW IN A BASIN

**В.В. Чуруксаева**  
**V.V. Churuksaeva**

Национальный Исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk state university  
Chu.VV@mail.ru

В качестве приближения к расчету потока в русле реки рассматривается задача о ламинарном ( $Re = 100$ ) течении воды ( $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu = 8.90 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ) в канале длиной 10 м, шириной 1 м с прямолинейными стенками и переменным рельефом дна. Начальное значение  $x$ -компоненты скорости течения предполагается равным  $\bar{U}_0 = 0.01 \text{ м/с}$ , что приблизительно равно скорости течения реки.

Математическая модель руслового течения строится на основе осредненных по глубине уравнений Рейнольдса для вязкой жидкости

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{U})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{V})}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial(h\bar{U})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{U}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{U}\bar{V})}{\partial y} &= -gh \frac{\partial(z_b + h)}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(h\bar{\tau}_{xx})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(h\bar{\tau}_{xy})}{\partial y} + \frac{(\tau_{xz})_s - (\tau_{xz})_b}{\rho} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial(z_b + h)}{\partial x} (\tau_{xx})_s - \frac{1}{\rho} \frac{\partial(z_b + h)}{\partial y} (\tau_{xy})_s, \\ \frac{\partial(h\bar{V})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{U}\bar{V})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{V}^2)}{\partial y} &= -gh \frac{\partial(z_b + h)}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(h\bar{\tau}_{yx})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(h\bar{\tau}_{yy})}{\partial y} + \frac{(\tau_{yz})_s - (\tau_{yz})_b}{\rho} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial(z_b + h)}{\partial x} (\tau_{yx})_s - \frac{1}{\rho} \frac{\partial(z_b + h)}{\partial y} (\tau_{yy})_s, \end{aligned}$$

где  $h(x, y, t)$  – глубина,  $\bar{U}(x, y, t)$ ,  $\bar{V}(x, y, t)$  – осредненные по глубине значения компонент вектора скорости  $W = (U, V)$ ;  $z_b(x, y)$  – рельеф дна;  $\rho$  – плотность;  $(\tau_{yz})_s, (\tau_{yz})_b, (\tau_{yx})_s, (\tau_{xy})_s$  – трение на поверхности и дне, соответственно.

При этом предполагается, что распределение давления является гидростатическим и характеристики потока слабо меняются по глубине, и глубина значительно меньше горизонтальных размеров области.

Дискретный аналог уравнений модели строится методом конечных объемов на разнесенной по пространству прямоугольной сетке: глубина  $h$  определяется в центрах ячеек, а компоненты скорости  $\bar{U}(x, y, t)$ ,  $\bar{V}(x, y, t)$  –

на границах. Для аппроксимации конвективных членов используется MLU-схема [1]. В силу того, что характеристики течения мало изменяются с течением времени, для подобной задачи предпочтительнее использовать неявный метод.

Для нахождения решения дискретной системы на основе Simple-алгоритма Патанкара и Сполдинга был построен итерационный алгоритм совместного решения уравнений неразрывности и движения, позволяющий получить корректные численные решения для полей скорости и глубины.

На каждом шаге по времени алгоритм предполагает выполнение следующей последовательности действий:

1. Задание начальных значений глубины и скорости

$$\{u^i\} = \{u^0\}, \{v^i\} = \{v^0\}, \{h^i\} = \{h^0\}.$$

2. Решение уравнений движения и получение приближенных значений компонент скорости  $\{u^*\}, \{v^*\}$ .

3. Нахождение значений поправок для компонент скорости

$$u_e = u_e^* + d_e^u / a_e^u (h_E' - h_P'); \quad v_n = v_n^* + d_n^v / a_n^v (h_N' - h_P').$$

4. Решение уравнения неразрывности и нахождение  $\{h'\}$ .

5. Корректируем  $u, v$  и  $h^i$  по  $h^i = h^i + h'$ .

6. Возврат к пункту 2 и повтор расчетов до тех пор, пока не будет достигнута сходимость.

С помощью данного метода были проведены расчеты некоторых тестовых сценариев, иллюстрирующих различные режимы течения, влияние на него трения и рельефа дна. Кроме того, проведенное сравнение профиля скорости на начальном участке канала без учета трения с аналитическим решением, полученным С.М. Таргом [2] для ламинарного течения в канале без учета сил трения показывает хорошее совпадение.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ № 5.628.2014/К.

### *Литература*

1. Noll B. Evaluation of a bounded high-resolution scheme for combustor flow computations // AIAA Journal. 1992. Vol. 30, № 1. P. 64–68.
2. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплоприемниках. М.: Наука, 1982. 472 с.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗГАЗОВОГО ГОРЕНИЯ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ СФЕРИЧЕСКИХ  
РЕАКЦИОННЫХ ЯЧЕЕК  
NUMERICAL MODELING OF GASLESS COMBUSTION  
MODEL USING SPHERICAL REACTION CELLS**

**Д.С. Шульц, А.Ю. Крайнов  
D.S. Shults, A.Yu. Krainov**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
National Research Tomsk State University  
d\_schulz@mail.ru, akrainov@ftf.tsu.ru

При распространении пламени в безгазовых конденсированных системах важную роль играет гетерогенная структура реакционной смеси. В работах [1–4] для описания гетерогенной структуры СВС составов была предложена модель реакционной ячейки. Под реакционной ячейкой понимается усредненный элемент гетерогенной структуры смеси порошков, способных к самораспространяющемуся высокотемпературному синтезу (СВС) синтезу.

В настоящей работе рассматривается распространение волны СВС по образцу, сформированному из смеси порошков двух веществ А и В, способных к реагированию друг с другом с образованием вещества АВ. Предполагается, что частицы вещества А более крупные и окружены мелкими частицами вещества В, занимающими все пространство между частицами вещества А.

В рамках подхода [2] выделяется характерная реакционная ячейка в форме шарика, состоящего из вещества А, окруженного веществом В. Вещества находятся в стехиометрическом соотношении. На границе контакта веществ А и В образуется продукт реакции АВ. Для моделирования распространения плоской реакционной волны СВС в однородной смеси порошков располагаем реакционные ячейки непрерывным образом по длине образца. При распространении реакционной волны по образцу заданной длины по мере прогрева реакционных ячеек в них активируется диффузия, происходит реакция и нарастание слоя продуктов реакции. В силу малости реакционных ячеек пространственное распределение температуры в реакционной ячейке отсутствует [2, 6].

В данной работе приводятся результаты численного моделирования нестационарного распространения волны СВС по образцу и их сравнение с результатами [5], где представлены результаты моделирования в предположении, что реакционные ячейки имеют плоскопараллельную форму.

## *Литература*

1. *Алдушин А.П., Хайкин Б.И.* К теории горения смесевых систем, образующих конденсированные продукты реакции // *Физика горения и взрыва*. 1974. Т. 10, № 3. С. 313–323.
2. *Хайкин Б.И.* К теории процесса горения в гетерогенных конденсированных средах // *Процессы горения в химической технологии и металлургии*. Черноголовка: Изд-во ОИХФ АН СССР. 1975. С. 227–244.
3. *Алдушин А.П., Каспарян С.Г., Шкадинский К.Г.* Распространение фронта экзотермической реакции в конденсированных смесях, образующих двухфазные продукты // *Горение и взрыв: Материалы IV Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву*. М.: Наука, 1977. С. 207–212.
4. *Чернецова В.В., Шкадинский К.Г.* Математическое моделирование макрокинетики взаимодействия во фронте горения гетерогенных составов с конденсированными продуктами реакции // *Химическая физика процессов горения и взрыва. Материалы XII симпозиума по горению и взрыву. Ч. I*. Черноголовка. 2000. С. 153–155.
5. *Шульц Д.С., Крайнов А.Ю.* Численное моделирование нестационарного горения безгазовых составов на основе модели диффузионной кинетики // *Изв.вузов. Физика*. 2013. Т. 56. № 9/3. С. 223–225.
6. *Шульц Д.С., Крайнов А.Ю.* Численное моделирование безгазового горения с учётом гетерогенности структуры и зависимости диффузии от температуры // *Физика горения и взрыва*. 2012. Т. 48. №5. С. 142–147.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ИМПУЛЬСНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОМ БУРЕНИИ INVESTIGATION OF THE EVOLUTION PULSED PRESSURE WHEN ELECTROHYDRAULIC DRILLING**

**Н.Н. Шуюшбаева, Н.Н. Омаров, Ж.Т. Шиликбай**  
**N.N. Shuyushbaeva, N.N. Omarov, Zh. T. Shilikbay**  
Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова  
Karaganda State University named after Y.A. Buketov  
nn\_shuish@mail.ru

Прогресс в освоении техники мощных импульсных разрядов позволил найти приложение для нее не только в технике физического эксперимента, но и в технологических процессах. Среди технологических процессов, использующих короткие мощные импульсы давления, можно выделить электроимпульсную дезинтеграцию материалов, электрогидравлическую обработку, а также электрогидравлический способ бурения. Для решения этих задач в качестве источника энергии используются генераторы импульсных токов, генераторы импульсных напряжений, а также разные конструкции электрогидравлического бура. Хорошо освоены технологические процессы, требующие выделения энергии накопителя за время в несколько микросекунд и более [1–3]. Однако на сегодняшний день задачи о сокращении времени процесса, повышении мощности и скорости ввода мощности являются актуальными, поскольку их решения приводит к росту объемной плотности энергии. В этом случае можно ожидать

изменения импульса давления в канале и увеличения коэффициента полезного действия.

Электрический разряд в жидкой среде сопровождается образованием ударных волн с большой амплитудой давления на фронте, которое и используется в качестве мощного источника механической энергии с высоким коэффициентом полезного действия. Возмущения, вносимые в рабочую среду внешними источниками, в данном случае высоковольтными электрическими разрядами, оказывают влияние на свойства рабочей среды. Рабочая среда, представляющая собой неоднородную жидкость, турбулизуется, так как насыщается парами, в ней образуются газовые пузырьки, растворяются и перемешиваются в процессе разрушения и измельчения горных пород. Все эти аспекты оказывают существенное воздействие на амплитуду и частоту мощных импульсных давлений, и при расчетах это необходимо учитывать [4].

При моделировании гидродинамики электрогидравлического эффекта предполагается изотропность всех процессов, а именно волны возмущения и все другие параметры меняются одинаково по всем направлениям. В проведенных нами экспериментах была обнаружена возможность концентрирования мощности ударной волны при помощи твердого отражателя, которая представляет собой внутреннюю часть электрогидравлического бура изготовлена в виде параболоида.

Проведенные нами численные расчеты динамики давления, на основе термодинамического анализа нелинейного процесса электрогидравлического эффекта в гетерогенной среде, учитывает влияния степени дисперсности среды и изменения геометрии канала на распространение ударной волны посредством введения уточняющих коэффициентов в уравнение теплового баланса.

Объем пространства, в котором происходит распространение ударной волны, равен объему некоторого эллиптического параболоида. Если направить ось эллиптического параболоида по направлению движения ударной волны, тогда радиус основания совпадет с радиусом рабочего канала. При этом предполагается, что высоковольтный кабель-электрод, который является источником мощного импульсного давления, расположен между фокусом и двойным фокусом параболоида. Тогда высота эллиптического параболоида направлена по оси  $x$ , а радиус основания  $r$  определяется значением перпендикулярной оси координаты.

По результатам эксперимента наблюдается увеличение амплитуды импульсного давления в определенных местах центрального кабеля-электрода в параболоидном отражателе бура. Этот факт свидетельствует о случае предельно развитой и самоорганизованной турбулентности, а именно комбинации вихрей, образуемых при отражении от твердых отражателей – случай своего рода некоторого резонанса наложения отраженных ударных волн. При электровзрыве энергия ударной волны



распространяется во все стороны изотропно, а с помощью параболического отражателя она может концентрироваться в одном, преимущественном направлении. Наибольшая эффективность была зафиксирована при расположении кабеля-электрода между фокусом и двойным фокусом параболического отражателя.

### *Литература*

1. *Малюшевский П.П.* Основы разрядно-импульсной технологии. Киев: Наукова думка, 1983. С. 272.
2. *Прибатурин Н.А., Стасенко Д.П.* Исследование возможности интенсификации насыщения жидкостей газом путем воздействия ударных волн // ПМТФ, Новосибирск. 2000. Т. 41, №2. С. 64–69.
3. *Донцов В.Е.* Исследование отражения волн давления на границе многофазных сред // Акустика неоднородных сред. Новосибирск, 1997. Вып. 112. С. 139–147.
4. *Сакипова С.Е.* К расчету импульсного давления при электроразрядном воздействии в неоднородной жидкости // Вестник ТГУ. 2009. №1(5). С. 74–81.

## **ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОСТИ НА УПРУГИЕ СВОЙСТВА И ПРОЦЕССЫ РАЗРУШЕНИЯ ХРУПКОЙ КЕРАМИКИ ИЗ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ EFFECT OF POROSITY ON THE ELASTIC PROPERTIES AND FAILURE PROCESSES, BRITTLE CERAMICS ZIRCONIA**

**А.Д. Пшеничный, Н.Л. Савченко, И.Н. Севостьянова**  
**A.D. Pshenichy, N.L. Savchenko, I.N. Sevastianova**  
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН  
НИ Томский государственный университет  
Institute of Strength Physics and Materials Science RAS  
National Research Tomsk State University  
Gt91ka@gmail.com

Известно, что пористость хрупких материалов может значительно влиять на их физические свойства (механические, термические и электрические). Модуль Юнга, модуль сдвига и коэффициент Пуассона – важнейшие параметры при изучении механического поведения современных материалов. При этом в зависимости от объема порового пространства макроскопическое поведение керамических материалов может меняться от хрупкого до псевдо-пластичного. Поэтому исследование эволюции повреждений в объеме пористого хрупкого материала на разных масштабных уровнях и последующего разрушения в зависимости от скорости деформирования, стесненности деформации и др. представляет значительный интерес с точки зрения возникновения иерархии структур деформации и разрушения в подобных хрупких материалах (керамиках, горных породах).

Цель настоящей работы – изучение взаимосвязи между такими параметрами как пористость, предел прочности при сжатии, эффективными модулями Юнга и сдвига, измеренными в процессе механического нагружения при сжатии и сдвиге, а также структурами разрушения и деформации в объеме керамики из диоксида циркония.

Установлено, что поровая структура спеченной керамики  $ZrO_2$  при низких температурах спекания наследует структуру исходного порошка, а с увеличением температуры, наряду со снижением объема порового пространства, наблюдается увеличение среднего размера пор, связанное с объединением мелких пор в крупные изолированные поры.

Анализ кривых напряжение-деформация показал, что имеет место переход от типично хрупкого разрушения для относительно плотной керамики до псевдопластичного при высоком уровне пористости. В результате проведенных исследований показано, что значение пористости существенно влияет на исследованные свойства керамики. Значения предела прочности при сжатии, эффективных модулей упругости и сдвига, а также коэффициента Пуассона уменьшаются с увеличением объема порового пространства керамик, что коррелирует с появлением множественного растрескивания в ходе деформации керамики из диоксида циркония.

Были получены рентгеноструктурные данные о тонкой кристаллической структуре (ОКР, параметры элементарной решетки), также были получены металлографические количественные данные о трещинах. Величина твердости по Виккерсу (8000–3500 МПа) и коэффициента вязкости разрушения ( $2,1-1,9 \text{ Мпа}\cdot\text{м}^{1/2}$ ) линейно уменьшались с ростом величины пористости от 10 до 60%.

В работе установлено, что характер разрушения образцов  $ZrO_2$  зависит от объема порового пространства. В керамике до 20% пористости наблюдается типично хрупкое разрушение образцов с формированием большого количества осколков. Выше 20% пористости наблюдается псевдопластичное разрушение, за счет формирования множественного растрескивания в объеме образцов диоксида циркония. В объеме материала наблюдается формирование зоны разрушения в виде усеченного конуса с углом раствора около  $60^\circ$ , при этом основание конуса лежит практически в плоскости неподвижного захвата, причем размер зоны разрушения в виде конусов зависит от объема порового пространства.

## Алфавитный указатель

### А

Агафонцев М.В. 153, 154  
Александрова А.Г. 115, 131  
Алибекова А.Р. 168  
Алипова К.А. 137  
Андреюк С.М. 156  
Анциферов А.А. 87  
Архипов В.А. 9, 106  
Абишева А.К. 16, 36  
Alain 40  
Астахов А.Л. 108

### Б

Brian Morse 40  
Бакеев Р.А. 150  
Баранников Е.А. 109  
Баранникова С.А. 89, 95  
Бардин С.С. 157  
Баурин Н.О. 41, 85, 87, 88  
Батурин А.П. 114  
Бейсенбек А.Ж. 18  
Богомолов Г.Н. 20  
Бодров А.С. 43  
Бовсуновский А.Б. 7  
Борзенко Е.И. 159  
Бочкарёва А.В. 95  
Бояркина К.Е. 159  
Браун О.В. 46  
Бузимов А.Ю. 79  
Булышко Д.Ю. 80  
Буркин В.В. 124, 127, 134  
Буяков А.С. 83  
Буякова С.П. 91, 93

### В

Васенин И.М. 110  
Володченко С.И. 45

### Г

Côté Alain  
Габидуллин А.Ф. 160

Галушкина Т.Ю. 118  
Гойко В.Л. 46, 65  
Гойко М.Ю. 48  
Гольдин В.Д. 56, 66  
Голубятников В.В. 22, 162  
Гибанов Н.С. 164  
Глазова Е.Г. 28, 101  
Гук В.О. 166  
Гуськов А.В. 112

### Д

Drobnikova N. 78  
Данилов В.И. 100  
Десятник А.В. 50  
Джумаев А.М. 16  
Довгаль О.В. 85  
Дьяченко Ю.В. 139  
Дьячковский А.С. 124, 127, 128

### Е

Elek 25  
Eckl 79  
Евсеев Н.С. 52  
Емельянова Т.В. 140  
Еналеев Р.Ш. 158, 172, 183

### Ж

Жакиев Н.С. 36  
Жарова И.К. 9  
Жуков И.А. 93

### З

Земляк В.Л. 85, 87, 88

Зиновьева О.С. 167  
Зюзков В.М. 144

### И

Jagamaz S. 25  
Иванюк Ю.И. 140  
Иващенко А.О. 142

Ильин С.А. 53  
Ионова Н.А. 89  
Ипатов К.И. 41  
Ищенко А.Н. 124, 127, 128, 134

## К

Kalugina Y.N. 152  
Kharik E.K. 40  
Камбарова Ж.Т. 168  
Касимов В.З. 128  
Карабекова Д.Ж. 170  
Каргин Д.И. 144  
Каргин А.В. 172  
Карпова А.А. 54  
Кирюшкин А.Е. 56  
Кинзерский В.В. 114  
Королев В.А. 87  
Корольков Л.В. 124, 127, 134  
Котов И.А. 57  
Кочетков А.В. 28, 101  
Кочетков М.А. 14  
Кулешов А.А. 7  
Куликова П.В. 122  
Кульков С.Н. 79, 83, 93  
Кузнецов В.Т. 166  
Кузнецова А.Е. 59  
Кузнецова В.В. 117  
Kruzka L. 11  
Красавин Д.С. 115  
Крайнов А.Ю. 29, 30, 110, 177, 190  
Крайнов Д.А. 108  
Кретов Ю.Л. 91  
Крылов С.В. 28

## Л

Ламаш А.А. 41  
Левков Р. 93  
Ли Ю.В. 95, 103  
Ломан В.А. 112  
Логинова М.О. 118  
Лобода Е.Л. 153, 154  
Лунев А.Г. 89

## М

Макаров П.В. 150  
Макарова Е.А. 154  
Мекеева А.М. 23  
Марценко А. 174

Марценко М. 174  
Маслов Е.А. 9, 175  
Маслова А.И. 120  
Markovic 25  
Milinovic 25  
Mickovic D. 25  
Mickovic M. 25  
Менибаев Р.Р. 122  
Микушина В.А. 97  
Милевский К.Е. 112  
Мирошниченко И.В. 60  
Михайлов М.Д. 181  
Михневич В.Л. 62  
Моисеева К.М. 177

## Н

Надежкин М.В. 89  
Нарикович А.С. 103  
Николаев С.В. 88

## О

Омаров Н.Н. 191  
Oglov M. Yu. 11, 21, 162  
Оспанова Ж.Ж. 63  
Орлова Д.В. 100  
Орлова Ю.Н. 26

## П

Пахомов М.А. 185  
Пекарь А.П. 87  
Петросян Г.В. 88  
Перфильева К.Г. 179  
Повереннов Е.Ю. 28  
Пономарева М.А. 50, 59, 77  
Помогаева С.В. 67  
Помилуйко А.С. 64  
Порязов В.А. 29, 30  
Потоцкая А.А. 181  
Пшеничный А.Д. 193

## Р

Roubtsova V.P. 40  
Ранова Г.А. 34  
Рейно В.В. 153, 154  
Рикун Ю.А. 98  
Рогаев К.С. 124, 127, 134  
Рыльцев И.А. 69

## С

Савельева Л.А. 117  
Савченко Н.Л. 193  
Сагимбекова М.Н. 32  
Саденова К.К. 31, 33, 37  
Садохин А.Н. 12  
Саденова К.К. 34, 38  
Саммель А.Ю. 124, 127, 134  
Саморокова Н.М. 128  
Самбаров Г.Е. 125  
Светличная Е.Л. 70  
Севостьянова И.Н. 193  
Селюнина И.В. 45, 72  
Скрипченко П.В. 118  
Сидоров А.Д. 128  
Синяев С.В. 45, 71  
Соколов Р.В. 41  
Солоненко В.А. 7  
Сухачева Е.С. 149  
Сухова А.А. 183  
Стаскевич О.С. 100  
Старченко А.В. 53  
Степанов Е.Ю. 124, 127, 128, 134  
Сюсина О.М. 125  
Степанов Е.Ю. 122

## Т

Такиров Е.О. 16, 36  
Танашева Н.К. 38, 37  
Тиней Р.И. 144  
Тургунов М.М. 168  
Турсынханов Б. 7  
Турыгина И.А. 101  
Томилова И.В. 122, 131  
Тлеубергенова А.Ж. 38  
Трофименко Н.Н. 146  
Трегубова Ю.Б. 73  
Тыдыков К.А. 148

## У

Ульянов А.Д. 75  
Усанина А.С. 185

## Ф

Fafard aro 40  
Фарапонов В. 9, 124  
Фадеев В.С. 85  
Федоров А.А. 148  
Федотова Н.С. 175  
Филина М.П. 77  
Фильков А.И. 156, 166

## Х

Хандаев Б.В. 103  
Хасенов А.К. 16, 36  
Хегай Е.И. 187  
Хмылева Т.Е. 149  
Худяшев Н.С. 132

## Ч

Чигрин Ю.Л. 85  
Чуруксаева В.В. 188  
Чупашев А.В. 124, 127, 134

## Ш

Шадрин В.С. 105  
Шаповалова К.В. 135  
Шахиджанов В.С. 167  
Шеремет М.А. 59, 164  
Щербаков И.В. 150  
Шиликбай Ж.Т. 191  
Шваб А.В. 46, 51  
Шрагер Г.Р. 159  
Шульц Д.С. 190  
Шуюшбаева Н.Н. 191

## Щ

Щербаков И.В.

## Я

Якутенок В.А. 50, 59, 77  
Ящук А. 7  
Jagamaz 24

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	5
-------------------	---

### Пленарные доклады

<i>Кулешов А.А., Солоненко В.А., Яцук А.А., Бовсуновский А.Б., Турсынханов С.Б.</i> Использование средств математического моделирования для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений .....	7
<i>Маслов Е.А., Архипов В.А., Фарапонов В.В., Жарова И.К.</i> Экспериментальное исследование газодинамики и теплообмена при обтекании тела сложной формы высокоскоростным потоком .....	9
<i>Orlov M. Yu., Kruzskaya L. S.</i> The investigation of the ice under explosive loading .....	11
<i>Садохин А.Н.</i> Компания «КузбассСпецВзрыв»: Производство взрывных работ .....	12
<i>Кочетков М.А.</i> Компания «Саровский Инженерный Центр».....	14

### Секция 1. Взрывные, детонационные процессы и свойства вещества при высокоэнергетических воздействиях

<i>Абишева А.К., Такиров Е.О., Хасенов А.К., Джумаев А.М.</i> Разработка электротехнологий для извлечения белка из кости .....	16
<i>Бейсенбек А.Ж.</i> Технология получения кремниевых порошков.....	18
<i>Богомолов Г.Н.</i> Определение начальных данных для задач математического моделирования по оценке НДС трубопроводов.....	20
<i>Голубятников В.В., Орлов М.Ю.</i> Экспериментальное исследование процессов взрывного нагружения массива известняка.....	22
<i>Мекеева А.М.</i> Дробление волластонитовой руды электрогидроимпульсным способом .....	23
<i>Markovic M., Milinovic M., Elek P., Jaramaz S., Mickovic D.</i> Comparative approaches to the modelling of explosively formed projectiles.....	25
<i>Орлова Ю.Н.</i> Численное исследование процесса взрывного нагружения льда на водной подложке.....	26
<i>Повереннов Е.Ю., Глазова Е.Г., Кочетков А.В., Крылов С.В.</i> Численное моделирование процессов взрывного нагружения снега.....	28
<i>Порязов В.А., Крайнов А.Ю.</i> Расчет скорости горения пороха Н при изменении давления .....	29
<i>Порязов В.А., Крайнов А.Ю.</i> Расчет скорости горения металлизированного СТТ с учетом процессов в газовой фазе.....	30
<i>Сагимбекова М.Н., Саденова К.К.</i> Электрогидроимпульсная технология переработки высокопарафинистой нефти месторождения Каражанбас.....	32
<i>Ранова Г.А., Танашева Н.К., Саденова К.К.</i> Исследования влияния электроразрядной технологии на процесс очистки и активации воды .....	34
<i>Такиров Е.О., Жакиев Н.С., Хасенов А.К., Абишева А.К.</i> Электроимпульсный способ обработки биоэтанола .....	36
<i>Танашева Н.К., Глеубергенова А.Ж., Саденова К.К.</i> Реагент пластификатор для водоугольного топлива получаемого на основе электрогидроимпульсного воздействия.....	38

## Секция 2. Численные методы, алгоритмы, программы и точные решения задач механики сплошных сред

<i>Kharik E.K., Roubtsova V.P., Fafard Mario, Brian Morse, Alain Côté</i> 1D ice material model generalization in 3D for its implementation into ANSYS .....	40
<i>Баурин Н.О., Ипатов К.И., Соколов Р.В., Ламаи А.А.</i> Разработка способов повышения несущей способности ледовых переправ.....	41
<i>Бодров А.С.</i> Численное исследование влияния давления и скорости титанового образца на процесс ДКУП.....	43
<i>Володченков С.И., Селюнина И.В., Синяев С.В.</i> Сравнительный анализ результатов расчета индукционного нагрева полых цилиндрических проводников в электротехнической и магнитодиффузионной постановках задачи.....	45
<i>Браун О.В., Шваб А.В.</i> Численное моделирование аэродинамики в воздушно-центробежном классификаторе .....	46
<i>Гойко В.Л.</i> Использование гибридных параллельных технологий для расчета движения космического тела с гиперзвуковой скоростью в атмосфере .....	46
<i>Гойко М.Ю.</i> Моделирование турбулентного закрученного течения в вихревой камере.....	48
<i>Десятник А.В., Пономарева М.А., Якутенок В.А.</i> Моделирование растекания капли вязкой жидкости по твердой стенке в плоской постановке методом VOF.....	50
<i>Евсеев Н.С., Шваб А.В.</i> Исследование влияния параметров закрутки на эффективность фракционного разделения частиц .....	52
<i>Ильин С.А.</i> Параллельные алгоритмы для решения двумерного уравнения теплопроводности с помощью схемы расщепления .....	53
<i>Карпова А.А., Старченко А.В.</i> Применение весового интерполяционного сплайна для построения монотонных разностных схем для решения уравнения конвекции-диффузии.....	54
<i>Кирюшкин А.Е.</i> Газодинамический подход к моделированию горячей поверхности .	56
<i>Котов И.А., Гольдин В.Д.</i> О решении задачи вязкого сверхзвукового обтекания затупленного тела .....	57
<i>Кузнецова А.Е., Пономарева М.А., Якутенок В.А.</i> Численное исследование аппроксимационной сходимости непрямого метода граничных элементов при моделировании осесимметричных течений вязкой жидкости.....	59
<i>Мирошниченко И.В., Шеремет М.А.</i> Влияние коэффициента излучения ограждающих конструкций на нестационарные режимы турбулентной естественной конвекции в замкнутой полости с локальным источником энергии .....	60
<i>Михневич В.Л.</i> Об аддитивной разностной схеме для расчета на кластере теплового состояния многослойного ортотропного кольца.....	62
<i>Оспанова Ж.Ж.</i> Моделирование процессов движения газопылевой смеси в пространстве с лесозащитной полосой .....	63
<i>Гойко В.Л., Помилуйко А.С.</i> Решение нестационарных уравнений газовой динамики на примере расчета задачи о движении космического тела в атмосфере .....	65
<i>Помогаева С.В., Гольдин В.Д.</i> Об одном алгоритме решения задачи сверхзвукового невязкого обтекания затупленных тел.....	67
<i>Рыльцев И.А.</i> Численное моделирование течения вязкой жидкости в плоской каверне с использованием алгоритма SIMPLE .....	69
<i>Светличная Е.Л.</i> Исследование численного решения уравнений газовой динамики, полученного на основе разностной ENO схемы высокого порядка точности .....	70
<i>Селюнина Н.В., Синяев С.В.</i> Математическое моделирование индукционного нагрева ансамблей тонкостенных цилиндрических проводников аксиальным магнитным полем .....	72

<i>Трегубова Ю.Б.</i> Параллельные вычисления в математическом моделировании динамики линейной макромолекулы.....	73
<i>Ульянов А.Д.</i> Разработка программного пакета для генерации структурной модели конического адаптера для программного комплекса «Композит НК Анизогидрид».....	75
<i>Пономарева М.А., Филина М.П., Якутенок В.А.</i> Особенности использования метода простой итерации для решения системы нелинейных алгебраических уравнений при моделировании течений степенной жидкости непрямым методом граничных элементов.....	77

### **Секция 3. Исследования новых перспективных материалов в приложениях механики сплошных сред**

<i>Drobnikova N.</i> Short overview of the Smart Water project result.....	78
<i>Бужимов А.Ю., Кульков С.Н., Wilhelm Eckl.</i> Исследования свойств Al-P-O цеолитов.....	79
<i>Булышко Д.Ю.</i> Термостабильность структуры и механических свойств сплавов системы Zr-Nb в ультрамелкозернистом состоянии.....	80
<i>Буяков А.С., Кульков С.Н.</i> Изучение влияния концентрации оксида магния в композите со стабилизированным оксидом магния диоксидом циркония на параметры спекания и структуру материала.....	83
<i>Довгаль О.В., Фадеев В.С., Чигрин Ю.Л.</i> Оптимизация физико-механических свойств материала и геометрических параметров головной части ударника для высокоскоростного взаимодействия с металлической преградой.....	85
<i>Земляк В.Л., Баурин Н.О., Королев В.А., Пекарь А.П., Анциферов А.А.</i> Определение минимальной несущей способности ледяного покрова при движении по нему автотранспортных средств.....	87
<i>Земляк В.Л., Баурин Н.О., Петросян Г.В., Николаев С.В.</i> Влияние формы подводного судна при подледном движении на параметры генерируемых волн.....	88
<i>Надежкин М.В., Лунев А.Г., Баранникова С.А., Ионова Н.А.</i> Локализация деформации в титановых сплавах.....	89
<i>Кретов Ю.Л., Буякова С.П.</i> Изучение пористости, усадки и испытание композиционной системы Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -MgO на термоудар.....	91
<i>Левков Р., Жуков И.А., Буякова С.П., Кульков С.Н.</i> Пористая керамика, полученная из оксида и гидроксида алюминия.....	93
<i>Ли Ю.В., Бочкарёва А.В., Баранникова С.А.</i> Водородное охрупчивание алюминиевых сплавов.....	95
<i>Микушина В.А.</i> Исследование особенностей накопления повреждений в углепластиках.....	97
<i>Рикун Ю.А.</i> Оценка эффективности перколяционного критерия прочности в задачах механики композитов.....	98
<i>Стаскевич О.С., Орлова Д.В., Данилов В.И.</i> Влияние малых электрических потенциалов на микротвердость металлических материалов.....	100
<i>Турыгина И.А., Кочетков А.В., Глазова Е.Г.</i> Численное моделирование ослабления ударных волн проницаемыми преградами.....	101
<i>Хандаев Б.В., Ли Ю.В., Нарикович А.С.</i> Влияние интенсивной пластической деформации на физико-механические свойства легких конструкционных сплавов....	103
<i>Шадрин В.С.</i> Исследование структуры и механических свойств псевдосплавов Al-ZrW <sub>2</sub> O <sub>8</sub> .....	105



#### Секция 4. Баллистика и небесная механика

<i>Астахов А.Л., Архипов В.А.</i> Методика экспериментального исследования диспергирования жидкости эжекционными форсунками .....	108
<i>Баранников Е.А.</i> Оценивание вероятности столкновения астероидов с планетами .....	109
<i>Васенин И.М., Крайнов А.Ю., Крайнов Д.А.</i> Моделирование внутриваллистических процессов ГПВРД при его движении на больших высотах с учетом набегающего потока воздуха.....	110
<i>Гуськов А.В., Ломан В.А., Милевский К.Е.</i> Методы защиты Земли от опасных космических объектов.....	112
<i>Кинзерский В.В., Батулин А.П.</i> Вычисление ближений астероидов с Землей с использованием различных эфемерид больших планет и Луны .....	114
<i>Красавин Д.С., Александрова А.Г.</i> Долговременная орбитальная эволюция торов частиц космического мусора в зоне ГЕО.....	115
<i>Кузнецова В.В., Савельева Л.А.</i> Влияние химической природы металлического горючего на термодинамические характеристики твердых топлив .....	117
<i>Логинова М.О., Скрипченко П.В., Галушина Т.Ю.</i> Астрометрическая поддержка позиционных наблюдений в программном комплексе EROS.....	118
<i>Маслова А.И.</i> Изменение орбиты спутника под действием малой трансверсальной силы .....	120
<i>Менибаев Р.Р., Томилова И.В., Куликова П.В.</i> Сопоставление двух методов оценки хаотичности в динамике околоземных космических объектов .....	122
<i>Саммель А.Ю., Буркин В.В., Ищенко А.Н., Корольков Л.В., Рогов К.С., Фараонов В.В., Дьячковский А.С., Степанов Е.Ю., Чупашев А.В.</i> Цифровой формирователь задержки импульса для синхронизации быстропротекающих процессов.....	124
<i>Самбаров Г.Е., Сюсина О.М.</i> Влияние систематических ошибок на динамику движения потенциально опасных астероидов.....	125
<i>Саммель А.Ю., Буркин В.В., Ищенко А.Н., Корольков Л.В., Рогов К.С., Дьячковский А.С., Степанов Е.Ю., Чупашев А.В.</i> Информационно измерительный комплекс НИИ ПММ ТГУ .....	127
<i>Ищенко А.Н., Дьячковский А.С., Касимов В.З., Саморокова Н.М., Сидоров А.Д., Степанов Е.Ю.</i> Моделирование ввода электрической энергии в пороховой заряд .....	128
<i>Томилова И.В., Александрова А.Г.</i> Вековые резонансы в динамической эволюции объектов зоны супер-ГЕО .....	131
<i>Худяшев Н.С.</i> Моделирование базисных наблюдений метеоров на Земле .....	132
<i>Саммель А.Ю., Буркин В.В., Ищенко А.Н., Корольков Л.В., Рогов К.С., Степанов Е.Ю., Чупашев А.В.</i> Автоматизация сбора данных электробаллистического эксперимента .....	134
<i>Шаповалова К.В.</i> Редукция геодезических высот к поверхности относимости Квазигеоида .....	135

#### Секция 5. Вопросы теоретической математики

<i>Алипова К.А.</i> О стирании особенностей отображений с s-усредненной характеристикой .....	137
<i>Дьяченко Ю.В.</i> Исследование момента разладки для модели AR(1).....	139
<i>Емельянова Т.В., Иванюк Ю.И.</i> Усеченное последовательное оценивание параметров непрерывной авторегрессии.....	140

<i>Иващенко А.О.</i> Принятие решений на основе метода анализа иерархий .....	142
<i>Каргин Д.И.</i> Пример связной топологической группы, которая не гомеоморфна $\omega$ -тонкой топологической группе .....	144
<i>Тиней Р.И., Зюзков В.М.</i> Поиск чисел, являющихся одновременно псевдопростыми Ферма по основанию 2 и псевдопростыми Фибоначчи .....	144
<i>Трофименко Н.Н.</i> Пространства непрерывных функций на «длинных прямых Зоргенфрея» .....	146
<i>Тыдыков К.А.</i> О полноте пространств непрерывных функций в топологии поточечной сходимости .....	148
<i>Федоров А.А.</i> Одно обобщение теоремы Тихонова–Шаудера .....	148
<i>Сухачева Е.С., Хмылева Т.Е.</i> О гомеоморфизмах некоторых модификаций прямой Зоргенфрея .....	149
<i>Щербаков И.В., Макаров П.В., Бакеев Р.А.</i> Моделирование формирования провала над карстовой полостью как катастрофического процесса в нелинейной динамической системе .....	150

### **Секция 6. Математическое и физическое моделирование технических и природных систем**

<i>Kalugina Y.N. and Francois Lique</i> Inelastic scattering of CN radical with para- and ortho- $H_2$ .....	152
<i>Агафонцев М.В., Лобода Е.Л., Рейно В.В.</i> Исследование пульсаций температуры в пламени с применением методов ИК–диагностики в различных спектральных диапазонах .....	153
<i>Агафонцев М.В., Лобода Е.Л., Макарова Е.А., Рейно В.В.</i> Об особенностях применения термографии для исследования полей температуры в пламени .....	154
<i>Андреюк С.М., Фильков А.И.</i> Исследование особенностей прогрева образца торфа в зависимость от размера .....	156
<i>Бардин С.С.</i> Моделирование неравновесной He- $N_2$ газоразрядной плазмы .....	157
<i>Борзенко Е.И., Бояркина К.Е., Шрагер Г.Р.</i> Течение степенной жидкости в трубе с внезапным сужением .....	159
<i>Габидуллин А.Ф., Еналеев Р.Ш.</i> Комплексный метод прогнозирования вероятностей тепловых поражений .....	160
<i>Голубятников В.А., Орлов М.Ю.</i> Численный анализ процесса ударного нагружения преград с градиентной подложкой .....	162
<i>Гибанов Н.С., Шеремет М.А.</i> Анализ влияния размеров локального источника энергии на эволюцию теплового факела в замкнутой квадратной полости .....	164
<i>Гук В.О., Кузнецов В.Т., Фильков А.И.</i> Экспериментальные исследования зажигания древесины сосны под воздействием убывающего потока лучистой энергии .....	166
<i>Зиновьева О.С., Шахиджанов В.С.</i> Поведение поверхности при деформации модельной системы типа матрица – включение .....	167
<i>Камбарова Ж.Т., Тургунов М.М., Алибекова А.Р.</i> Исследование аэродинамических характеристик гибкой парусной лопасти ветротурбины .....	168
<i>Карабекова Д.Ж.</i> Прибор для измерения теплового потока .....	170
<i>Каргин А.В., Еналеев Р.Ш.</i> Численное моделирование зажигания древесины .....	172
<i>Марценко А., Марценко М.</i> Моделирование динамики аномально-вязкой жидкости в канале сложной формы с препятствием .....	174

<i>Маслов Е.А., Федотова Н.С.</i> Математическое моделирование подготовки рабочего тела для компрессора в составе газотурбинной установки.....	175
<i>Крайнов А.Ю., Моисеева К.М.</i> Численное исследование устойчивости горения 4% метано-воздушной смеси в узком канале .....	177
<i>Перфильева К.Г.</i> Движение осесимметричных моделей в водной среде.....	179
<i>Потоцкая А.А., Михайлов М.Д.</i> Моделирование задачи о распаде разрыва в случае мелкой воды .....	181
<i>Сухова А.А., Еналеев Р.Ш.</i> Композиционный изолирующий материал для одежды спасателей с комплексом защитных свойств .....	183
<i>Усанина А.С., Пахомов М.А.</i> Всплытие одиночного сферического пузырька в присутствии поверхностно-активных веществ .....	185
<i>Хегай Е.И.</i> Численное решение задачи о течении вязкой жидкости в изогнутом канале с применением технологии параллельного программирования .....	187
<i>Чуруксаева В.В.</i> Численный метод для расчета ламинарного течения в водоеме .....	188
<i>Шульц Д.С., Крайнов А.Ю.</i> Численное моделирование безгазового горения с использованием модели сферических реакционных ячеек.....	190
<i>Шуюшбаева Н.Н., Омаров Н.Н., Шиликбай Ж.Т.</i> Исследование эволюции импульсного давления при электрогидравлическом бурении.....	191
<i>Пшеничный А.Д., Савченко Н.Л., Севостьянова И.Н.</i> Влияние пористости на упругие свойства и процессы разрушения хрупкой керамики из диоксида циркония .....	193

## CONTENTS

<b>PREFACE</b> .....	5
----------------------	---

### Plenary session

<i>Solonenko V.A. etc</i> The use of mathematical modeling for the safe operation of building and structure .....	7
<i>Maslov E.A., Archipov V.A., Faraponov V.V., Zharova I.K.</i> Experimental study of gas dynamics and heat transfer in a body complex shape high flow .....	9
<i>Orlov M.Yu., Kruzskaya L.S.</i> The investigation of the ice under explosive loading .....	11
<i>Sadochin A.N.</i> KuzbassSpezVzryv Ltd: Production blasting .....	12
<i>Kochetkov M.A.</i> Sarov Engineering Center Ltd.....	14

### Session 1. Explosion, detonation phenomena and properties of matter at high-intensive

<i>Abisheva A.K., Takirov E.O., Khassenov A.K., Dzhumayev A.M.</i> The development electrical technology for protein extraction from bone .....	16
<i>Beisenbek A.Zh.</i> The technology for producing silicon powder .....	18
<i>Bogomolov G.N.</i> The determination of initial data for problem mathematical simulation to evaluate the stress-strain state of pipelines .....	20
<i>Golubatnikov V.V., Orlov M.Yu.</i> The experimental study of the processes of explosive loading array limestone.....	22
<i>Mekeyeva A.M., Tleuberliev Y.Y.</i> Wollastonite ore crushing electrohydroimpulse way.....	23
<i>Markovic M., Milinovic M., Elek P., Jaramaz S., Mickovic D.</i> Comparative approaches to the modelling of explosively formed projectiles.....	25
<i>Orlova Yu.N.</i> Numerical study of the process of explosive loading of ice water-substrate .	26

<i>Glazova E.G., Kochetkov A.V., Krylov S.V., Poverennov E.Yu.</i> Numerical modelling of explosive loading snow .....	28
<i>Poryzov V.A., Krainov A.Yu.</i> Calculation of aluminized solid rocket propellant burning rate with provision for Gas-phase process .....	29
<i>Poryzov V.A., Krainov A.Yu.</i> Compration value of calculated steady and non-steady powder combustion rate with pressure change .....	30
<i>Sagimbekova M.N., Sadenova K.K.</i> Electrohydropulse processing technology high-paraffinic oil karazhanbas .....	32
<i>Ranova G.A., Tanasheva N.K., Sadenova K.K.</i> Research influence technology of electric discharge on process cleaning and activation of water .....	34
<i>Takirov Y.O., Zhakiyev N.S., Khasenov A.K., Abisheva A.K.</i> Electric pulse processing method bioethano .....	36
<i>Tanasheva N.K., Tleubergenova A.Zh., Sadenova K.K.</i> Reagent plasticizer for coal-water fuel derived from electrohydropulse influences .....	38

## **Session 2. Numerical methods, algorithms, codes, and accurate solutions of the continium mechanics**

<i>Kharik E.K., Roubtsova V.P., Fafard M., Morse B., Alain C.</i> 1D Ice material model generalization in 3D for its implementation into ANSYS .....	40
<i>Baurin N.O., Ipatov K.I., Sokolov R.V., Lamash A.A.</i> Development ways to improve the bearing capacity of ice crossing .....	41
<i>Bodrov S.A.</i> Numerical investigation of the effect of titanium specimens pressure and velocity on the DCAP process .....	43
<i>Volodchenkov S.I., Selyunina N.V., Sinyaev S.V.</i> Comprative analyses of the simulation data by inductive heating of light-wall cylindrical conductors in the electrotechnical and magneto-diffusive statements of the problems .....	45
<i>Braun O.B., Shvab A.V.</i> Numerical simulation of aerodynamic sincetrifugalair classifier ..	46
<i>Goiko V.L.</i> Application of hybrid parallel technologies to calculate the motion of the cosmic body at hypersonic speeds in the atmosphere .....	46
<i>Goiko M.Yu.</i> Simulation of the turbulent swirling flow in the VORTEX-chamber .....	48
<i>Desyatnik A.V., Ponomareva M.A., Yakutenok V.A.</i> Simulation of 2D viscous drop spreading on a solid wall using VOF-method .....	50
<i>Evseev N.S., Shvab A.V.</i> The research of influence of parameters of spin the fractional efficiency of separation of particles .....	52
<i>Il'in S.A.</i> Parallel algorithms for solving the 2D heat equation using the splitting scheme .	53
<i>Karpova A.A., Starchenko A.V.</i> The use weighting interpolation spline to construct monotone difference schemes for solving the equtions of convection-diffusion .....	54
<i>Kiryushkin A.E.</i> Gas-dynamic approach to modelling a burning surface .....	56
<i>Kotov I.A., Gol'din V.D.</i> The model of a viscous shock layer .....	57
<i>Kuznetsova A.E., Ponomareva M.A., Yakutenok V.A.</i> Numerical investigation of indirect boundary element method approximations for axisymmetric viscous fluid flow simulation .....	59
<i>Miroshnichenko I.V., Sheremet M.A.</i> Effect of surface emissivity on unsteady natural convection in an air filled cavity with local heat source .....	60
<i>Michnevich V.L.</i> Additive differential calculation scheme on the cluster thermal condition of multilayered orthotropic rings .....	62
<i>Ospanova Z.Z.</i> Modelling of processes of motion in the GAS-DUST mixture space with windbreaks .....	63
<i>Goiko V.L., Pomiluyko A.S.</i> Solution of unsteady gas dynamics equations on the example	

of calculating the motion of the cosmic body at hypersonic speeds in the atmosphere .....	65
<i>Pomogaeva S.V., Goldin V.D.</i> An algorithm for solving the problem of supersonic inviscid flow around blunt bodies .....	67
<i>Ryltsev I.A.</i> Numerical simulation of viscous flow in a planar cavity using simple Algorithm.....	69
<i>Svetlichnaya E.L.</i> Numerical solution of gas dynamics equations with ENO difference schemes of high-order accuracy .....	70
<i>Selyunina N.V., Sinyaev S.V.</i> Mathematical modelling of inductive heating ensembles of light-wall cylindrical conductors by axial magnetic field .....	72
<i>Tregubova Yu.B.</i> Parallel computing for mathematical modelling of the dynamics linear macromolecules.....	73
<i>Ul'yanov A.U.</i> The development software package for the generation of structural models tapers adapter for program complex "Composite NK Anizogidrid".....	75
<i>Ponomareva M.A., Filina M.P., Yakutenok V.A.</i> An effective simple iteration scheme of nonlinear algebraic equations system solving for power law fluid flow simulation by indirect boundary element method .....	77

### **Session 3. Investigation of advanced materials in applications of continuum mechanics**

<i>Dobrinkova N.</i> Short overview of the smart water project results .....	78
<i>Buzimov A. Yu., Kulkov S.N., Eckl W.</i> Investigation of properties of Al-Na zeolites.....	79
<i>Bulyanko D.Yu.</i> Thermal stability of structure and mechanical properties of the Zr-Nb alloys in ultrafine-grained state.....	80
<i>Buykov A.S., Kulkov S.N.</i> Study of the influence of magnesia concentration on sintering parameters and structure of the in magnesia-stabilized zirconia composite.....	83
<i>Dovgal O.V., Fadeev V.S., Chigrin Y.L.</i> Optimization of physic mechanical properties materials and geometrical parameters of head part of the drummer for high-speed interaction with a metal barrier .....	85
<i>Zemlyak V.L., Baurin N.O., Korolev V.V., Pekar` A.P., Antsiferov A.A.</i> The determination of the minimum load-bearing capacity of the ice on it when driving vehicles .....	87
<i>Zemlyak V.L., Baurin N.O., Petrosyan G.V., Nikolaev S.V.</i> The influence of peculiarities of the form a submarine vessel on the parameters of generated waves in the ice motion.....	88
<i>Ionova N.A., Barannikova S.A., Lunev A.G., Nadezhkin M.V.</i> Localization of plastic deformation in the titanium alloys .....	89
<i>Kretov Yu. L., Buykova S.P.</i> Study porosity, shrinkage and testing composite Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -MgO system on thermal shock.....	91
<i>Levkov R., Gukov I.A., Buykova S.P., Kulkov S.N.</i> Porous ceramic obtained from aluminium oxide and gidrodiksid.....	93
<i>Bochkaryova A.V, Li. Yu.V, Barannikova S.A.</i> Hydrogen embrittlement of aluminium Alloys.....	95
<i>Mikushina V.A.</i> Investigation of damages accumulation in carbon fiber reinforced Plastics .....	97
<i>Rikun Yu.A.</i> Evaluation of the effectiveness of the perlocation strength criterion in problems of mechanics of composites.....	98
<i>Staskevich O.S., Orlova D.V., Danilov V.I.</i> The effect of electric potential on material microhardness .....	100
<i>Glazova E.G., Kochetkov A.V., Turygina I.A.</i> Numerical modeling of shock waves dumping by permeable barriers.....	101
<i>Handaev B.V., Li Yu.V., Narikov A.S.</i> Influence of severe pkastic deformation	

on the physics mechanical properties of light structural alloys .....	103
<i>Shadrin V.S., Dedova E.S., Kulkov S.N.</i> The study on structure and mechanical Properties of Al – ZrW <sub>2</sub> O <sub>8</sub> pseudo alloys.....	105

#### Session 4. Ballistics and Celestial mechanics

<i>Astakhov A.L., Arkhipov V.A.</i> Technique for experimental study of liquid disperation by ejection atomizers .....	108
<i>Barannikov E.A.</i> Estimation of probability of asteroids impacts with planets .....	109
<i>Vasenin I.M., Krainov A.Yu., Krainov D.A.</i> Simulation scramjet ballistics at high altitudes taking into account oncoming airflow .....	110
<i>Guskov A.V., Loman V.A., Milevsky K.E.</i> Methods of protecting the Earth from dangerous space objects .....	112
<i>Kinzersky V.V., Baturin A.P.</i> Computing of asteroids encounter to the Earth with different ephemerides of major planets and the Moon.....	114
<i>Krasavin D.S., Aleksandrova A.G.</i> Long-term orbital evolution of the space debris torus in the GEO area.....	115
<i>Kuznetsova V.V., Savelieva L.A.</i> The influence of the chemical nature of metal fuel on the thermodynamic characteristics of solid propellants .....	117
<i>Loginova M.O., Skripchenko P.V., Galuschina T.Yu.</i> Astrometric support positional observation in the Software package EROS .....	118
<i>Maslova A.I.</i> Changing the orbit under the action of the small trasverse forse .....	120
<i>Menibaev R.R., Tomilova I.V., Kulikova P.V.</i> Comparision of two methods of estimation in the dynamics of near-earth objects.....	122
<i>Sammel A.Y. etc</i> Digital shaper pulse delay for synchronization fast processes.....	124
<i>Sambarov G.E., Syusina O.M.</i> The influence of systematic errors on the motion dynamics of potentially Hazardous asteroids .....	125
<i>Sammel A.Y., etc.</i> RSI of applied mathematics and mechanics (TSU).....	127
<i>Ishenko A.N., etc</i> Simulation input electrical energy into the powder charge .....	128
<i>Tomilova I.V., Aleksandrova A.G.</i> Secular resonances in dynamical evolution of objects in Super-Geo region .....	131
<i>Khudyashev N.S.</i> Modelling of double-station meteor observations on the earth .....	132
<i>Sammel A.Y. etc</i> Automation of data collection electric ballistic experiments.....	134
<i>Shapovalova K.V.</i> The transformation of geodetic heihts to the reference surface of quasi- geoid for precise leveling by GNSS observation .....	135

#### Session 5. Aspects of theoretical mathematics

<i>Alipova K.A.</i> On removal of singularities of the mapping with S-averaged characteristic ..	137
<i>D'achenko Yu.V.</i> The investigation change-point model AR(1).....	139
<i>Emel'yanova T.V., Ivanyuk J.V.</i> Truncated sequential estimation of the parameters in a continuous autoregression .....	140
<i>Ivashenko A.O.</i> Decision-making on the basis of the analytic hierarchy process.....	142
<i>Kargin D. I.</i> The example connected topological group, that is not homeomorphic to $\Omega$ -thin topological groups .....	144
<i>Tiney R.I., Zuzkov V.M.</i> Search of number that are simulaneously Fermat's pseudoprimes on base 2 and fibonacci's pseudoprimes .....	144
<i>Trofimenko N.N.</i> The spaces of continuous functions of the long sorgenfrey lines.....	146
<i>Tydykov K.A.</i> On the completeness of spaces of continuous functions in the topology of pointwise convergence .....	148

<i>Fedorov A.A.</i> A Generalization of tychonoff's theorem-Schauder .....	148
<i>Suhcheva E.S., Khmyleva T.E.</i> On homermorpisms of certain modifications sorgenfrey line.....	149
<i>Scherbakov I.V., Makarov P.V., Bakeev R.A.</i> Modeling of cavern formayion as a catastrophic process in the nonlinear dynamic system.....	150

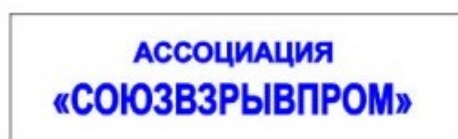
### **Session 6. Mathematical and physical modeling of technical and natural systems**

<i>Kalugina Y.N., Lique F.</i> Inelastic scattering of CN radical with para and ortho-H <sub>2</sub> .....	152
<i>Agafontsev M.V., Loboda E. L., Makarova E.A., Reyno V.V.</i> On the use of thermography for research fields temperature in flames .....	153
<i>Agafontsev M. V., Loboda E. L., Reyno V.V.</i> Study of temperature fluctuations in the flame using the method of IR diagnostics in different spectral ranges .....	154
<i>Andreuk S.M., Fil'kov A.I.</i> Investigation of characteristics of peat sample heating depending on size .....	156
<i>Bardin S.S.</i> Modeling of nonequilibrium He-N <sub>2</sub> gasdischarge plasma .....	157
<i>Borzenko E.I., Boyarkina K.E., Shrager G.R.</i> The power-law fluid in a pipe with a sudden contraction .....	159
<i>Gabidullin A.F., Enaleev R.Sh.</i> Integrated method on predicting of thermal injuries .....	160
<i>Golubatnikov V.V., Orlov M.Yu.</i> Numerical analysis of FG barriers under shock load.....	162
<i>Gibanov N.S., Sheremet M.A.</i> Effect of heat source sizes evolution of thermal plume inside square cavity .....	164
<i>Guk V.O., Kuznetsov V.T., Filkov A.I.</i> Experimental investigation of ignition of pine wood under decreasing radiant energy flux .....	166
<i>Zinovieva O.S. , Shakhijanov V.S.</i> Surface deformation behavior of a single inclusion model .....	167
<i>Kambarova J.T., Turgunov M.M., Alibekova A.R.</i> The study of aerodynamic characteristics of flexible sail blade of wind turbine.....	168
<i>Karabekova D.Z.</i> A device for measuring heat flux.....	170
<i>Kargin A.V., Enalejev R.Sh.</i> Numerical modeling for ignition of wood .....	172
<i>Martsenko A., Martsenko M.</i> Modeling of dynamics of power-law fluid in the channel with obstacle .....	174
<i>Maslov E.A., Fedotova N.S.</i> Mathematical modeling of the preparation of the working fluid to the compressor in the composition of the gas turbine plant .....	175
<i>Krainov A.Yu., Moiseeva K.M.</i> The numerical study of the stability of the 4% methane-air mixture combustion in the narrow channel .....	177
<i>Perfilieva K.G.</i> Movement of axisymetrical models in the water medium .....	179
<i>Pototskaya A.A., Michailov M.D.</i> The problem of breakup of a discontinuity simulating in the shallow water case .....	181
<i>Sukhova A.A., Enalejev R.Sh.</i> Composite insulting material for rescuers clotheswith a complex of protective properties .....	183
<i>Usanina A.S., Pakhomov M.A.</i> Rising of a single spherical bubble in the presence of sur face active substances .....	185
<i>Hegay E.I.</i> Numerical solution problem of flow of a viscous fluid in a curved channel with the use of parallel programming.....	187
<i>Churuksaeva V.V.</i> Computational method for calculation of a laminar flow in a basin .....	188
<i>Shults D.S., Krainov A.Yu.</i> Model modeling of gasless combustion model using spherical reaction cells.....	190
<i>Shuyushbaeva N.N., Omarov N.N., Shilikbay Zh.T.</i> Investigation of the evolution pulsed pressure when electrohydraulic drilling.....	191
<i>Pshenichy A.D., Savchenko N.L., Sevastianova I.N.</i> Effect of porosity on the elastic properties and failure processes, brittle ceramics zirconia .....	193

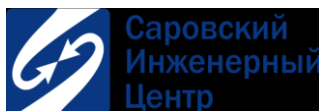
## СПОНСОРЫ И ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ



Книжный магазин «Академкнига». Новая литература по различным областям знаний. Учебники для школ и вузов. Постоянное поступление учебников по СИ++. Адрес: г. Томск, Набережная реки Ушайки, 18а, телефон (3822)516036, факс (3822)516036, E-mail: akademkniga@mail.tomsknet.ru



ООО "Кузбасское специализированное управление по производству буровзрывных работ «КузбассСпецВзрыв», производство взрывных работ и доставка взрывных материалов до места проведения взрывных работ. Адрес: Россия, 650905, г. Кемерово, ул. Баха, 15А, Тел/факс (3842) 71-25-34, бухг. 71-25-38, E-mail: ksv158@mail.ru, kuzbassv@mail.ru



Компания «Саровский Инженерный Центр» является научно-инженерным предприятием, работающим в области современных компьютерных технологий. Специалисты компании имеют многолетний опыт работы в различных отраслях промышленности. Адрес: Нижний Новгород 603005, ул. Б. Покровская, д.20Б Тел: +7(831)4119596, E-mail: nn@saec.ru



Российский Фонд Фундаментальных Исследований (РФФИ)  
Адрес: Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, 32а, 20-21 этаж, В-334, ГСП-1. Телефон: (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 публикаций. По состоянию на январь 2014 в базе данных eLIBRARY.ru насчитывается 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.  
Адрес: Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 36  
<http://smu.tsu.ru/OSovet>



Научное издание

Международная молодежная научная конференция  
«Актуальные проблемы современной механики  
сплошных сред и небесной механики»  
17–19 ноября 2014 г., Томск

Подписано в печать 27.01.2015 г.  
Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Печ. л. 13,1; усл. печ. л. 12,2; уч.-изд. л. 12,4.  
Тираж 115 экз. Заказ

Отпечатано в ООО «Вайар»  
634034. г. Томск, ул. Советская, 69  
тел. (3822)-529811, [www.yr.tomsk.ru](http://www.yr.tomsk.ru)