



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



**VIII Всероссийская молодежная научная конференция
«Актуальные проблемы современной механики
сплошных сред и небесной механики – 2018»
г. Томск, 26–28 ноября 2018 г.**

**VIII All-Russian Scientific Conference
«Current issues of
continuum mechanics and celestial mechanics – 2018»,
November, 26–28, 2018**

Томск-2019

УДК 539.3.004
ББК 22.25; 22.251.22.62
М43

Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» 26–28 ноября 2018 г.: М43 Материалы конференции / под ред. М.Ю. Орлова. – Томск: Изд-во «Красное знамя». 2019. – 278 с.

ISBN 978-5-6040102-8-0

Представлены материалы конференции молодых ученых «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики», прошедшей 26–28 ноября 2018 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 18-31-10052 мол_г.

Публикуется в авторской редакции

ISBN 978-5-6040102-8-0

© Издательство «Красное знамя», 2019

Editor

Maxim Yu. Orlov

National Research Tomsk State University

Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics

36 Lenin prospect

Tomsk, 634050

Tomsk Region

Russian Federation

E-mail: orloff_m@mail.ru

To learn more about the Conference Proceeding, please visit the webpage:

www.cimcm.tsu.ru

«Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics 2018»

VIIIth All-Russian Youth Scientific Conference

Tomsk, Russia, 26–28 November 2018



EDITOR

Maxim Yu. Orlov

National Research Tomsk State
University

Research Institute of Applied
Mathematics and Mechanics
of Tomsk State University

Tomsk, Russia

Sponsoring organizations

The Ministry of Education and Science Russia

Russian Fund of Basic Research

National Research Tomsk State University

@Tomsk State University
Printed in the Russian Federation

All-Russian Youth Scientific Conference "Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics", November 26–28, 2018: The conference proceedings / Ed. M.Yu. Orlov. – Tomsk: "Izdatelstvo "Krasnoe znamya", 2019. – 278 p.

ISBN 978-5-6040102-8-0

For scientific worker, the teachers, graduate student and students.

ISBN 978-5-6040102-8-0

© "Izdatelstvo "Krasnoe znamya", 2019

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ:

Председатели:

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

Члены программного комитета:

Архипов В.А., профессор, д.ф.-м.н., зав. отд. НИИ ПММ ТГУ; **Бородовицына Т.В.**, профессор, д.ф.-м.н., зав. отд. НИИ ПММ ТГУ; **Биматов В.И.**, профессор, зав. кафедрой ФТФ ТГУ; **Бутов В.Г.**, профессор, зав. отд. НИИ ПММ ТГУ; **Васенин И.М.**, Заслуженный деятель науки РФ, д.ф.-м.н., профессор ТГУ; **Васильев А.Н.**, профессор СПб. политехнического университета им. Петра Великого; **Глазырин В.П.**, д.ф.-м.н. зав. лаб. НИИ ПММ ТГУ; **Еремин И.В.**, ученый секретарь НИИ ПММ ТГУ; **Ищенко А.Н.**, профессор, д.ф.-м.н., зам. директора НИИ ПММ ТГУ; **Крайнов А.Ю.**, профессор, д.ф.-м.н. ТГУ; **Кульков С.Н.**, профессор, д.ф.-м.н. ТГУ; **Масловский В.И.**, доцент, директор МЦ ТГУ; **Милейко С.Т.**, в.н.с. профессор ИФТТ РАН; **Орлов М.Ю.**, к.ф.-м.н., НИИ ПММ ТГУ, **Разоренов С.В.**, профессор, д.ф.-м.н., ТГУ; **Скрипняк В.А.**, профессор, д.ф.-м.н., зав. кафедрой ФТФ ТГУ; **Шваб А.В.**, профессор, д.ф.-м.н., зав. кафедрой ФТФ ТГУ; **Шрагер Г.Р.**, профессор, д.ф.-м.н., зав. кафедрой ФТФ ТГУ

МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Кружка Л.С. (Военно-технологический университет им. Домбровского, Польша)
Фомин Н.А. (Институт тепло-массообмена им. Лыкова, Белоруссия)
Кусаинов К.К. (Карагандинский госуниверситет им. А.Е. Букутова, Республика Казахстан)
Ахмед Браара (директор RIB, Алжир)
Момчило Милинович (Белградский университет, Сербия)
Аль Карагулай Хуссам Али Халаф (Ди Кар университет, Ирак)
Паскаль Форкью (Университет Ж. Форье, Франция)
Ашрат Икбал (Университет Нью Дели, Индия)
Джонсон Алэнгарам (Малайский университет, Малазия)
Абрахам Кристиан (Национальный университет Сингапура, Сингапур)
Юлий Бай (Пекинский технологический университет, Китай)
Александр Фильков (Университет Мельбурна, Австралия)
Микко Хокка (Технологический университет Тампере, Финляндия)
Чэнцин Ву, (Технологический университет Сиднея, Австралия)

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель:

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

Секретари конференции.

Сидоров А.Д., аспирант ТГУ; **Никитась О.С.**, студент ТГУ;
Савкина Н.В., к.ф.-м.н., доцент ТГУ; **Козулин А.А.**, к.ф.-м.н., доцент ТГУ, к.ф.-м.н.; **Рыжих Ю.Н.**, к.ф.-м.н., доцент ТГУ; **Борзенко Е.И.**, к.ф.-м.н., доцент ТГУ;
Пикушак Е.В., к.ф.-м.н., доцент ТГУ; **Хмелева М.Г.**, магистрант ТГУ;
Порязов В.А., аспирант ТГУ; **Солоненко В.А.**, к.ф.-м.н., доцент ТГУ;
Хрусталева А.П., магистрант ТГУ; **Евсеев Н.С.** НИИ ПММ ТГУ, **Пристаев А.М.**, студент ТГУ; **Фызылов Т.В.**, студент ТГУ; **Перфильева К.Г.** магистрант ТГУ;
Маслов Е.А., к.ф.-м.н., НИИ ПММ ТГУ; **Басалаев С.А.** к.ф.-м.н., НИИ ПММ ТГУ

VIII All-Russian Youth Scientific Conference

«Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics – 2018»:

Co-Chairs:

Aleksey Lipanov and Yury Milehin academician of RAS

Anatoly Glazunov, Ph.D., professor, TSU

Ernst Shrager, Ph.D., professor, TSU

Program Committee Members:

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

International Committee Members:

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

Iqbal M.A. Ph.D. Dr. Indian Institute of Technology Roorkee (India); **Al. Filkov**, Ph.D. The University of Melbourne; Prof. **Mikko Hokka** Tampere University Technology (Finland); Prof. **Chengqing Wu** University of Technology Sydney, (Australia)

Organizing and Technical Committee Members:

M. Orlov (Ph.D., RSI AMM, Committee Chair), **Alex. Sidorov** and **O. Nikitas** (TSU Conference Technical Secretary), **N. Savkina**, **A. Kozulin**, **Yu. Ryzhikh**, **E. Borzenko**, **E. Pikushchak**, **M. Hmeleva**, **V. Poryazov**, **V. Solonenko**, **A. Chrustalev**, **N. Evseev**, **A. Pristai**, **T. Fyzylov**, **K. Perfileva**, **S. Basalaev**, **E. Maslov**

ОРГАНИЗАЦИИ, УЧАСТНИКИ КОНФЕРЕНЦИИ «АПМСС-2018»:

Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск),

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск),

Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск),

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

Московский авиационный университет (Москва),

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

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

Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения

Институт проблем прочности и материаловедения (Томск),

Новосибирский государственный технический университет (Новосибирск),

Томский университет систем управления и радиоэлектроники (Томск),

Кемеровский государственный университет (Кемерово),

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

Иркутский государственный университет (Иркутск)

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

РФЯЦ ВНИИ экспериментальной Физики (Саров),

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

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

Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук (Красноярск)

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН (Кемерово)

Крыловский государственный научный центр (Санкт-Петербург)

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, (Барнаул)

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» (Санкт-Петербург)

Organizations

National research Tomsk State University (Tomsk),
Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics (Tomsk),
National Research Tomsk Polytechnic University (Tomsk),
Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod (N. Novgorod),
National Research Moscow Aviation Institute (Moscow),
M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS (Moscow),
Bauman Moscow State Technical University (Moscow),
Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (Tomsk),
Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk),
Tomsk State University of control system and Radioelectronics (Tomsk),
Kemerovo State University (Kemerovo),
Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk),
Irkutsk State University (Irkutsk),
Amur State University named after Sholom Aleichem (Birobidjan),
The Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics (Sarov),
Siberian State Aerospace University (Krasnoyarsk),
SB RAS Kemerovo Science Center (Kemerovo),
Krylov State Research Centre (S. Petersburg),
Polzunov Altai State Technical University (Barnaul),
Baltic State Technical University “VOENMEH” (St. Petersburg)

ПРЕДИСЛОВИЕ

26–28 ноября 2018 г. на базе Национального исследовательского Томского государственного университета прошла ежегодная Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики». Мы встретились 8-й раз, а мероприятие было приурочено к 140-летию Томского государственного университета.

В работе конференции принимали участие молодые ученые из Томска, Москвы, Санкт-Петербурга, Симферополя, Сарова, Новосибирска, Барнаула, Н. Новгорода, Кемерово, Казани, Красноярска, Биробиджана, Новокузнецка, Иркутска и других городов. Хотелось бы отметить, что на секционных заседаниях присутствовало максимальное количество докладчиков из других городов России.

Одной из основных целей конференции является привлечение и закрепление в сфере науки и инноваций молодых исследователей – будущего отечественной науки. Были представлены новые теоретические и экспериментальные результаты в области современной механики. Авторами продемонстрированы оригинальные экспериментальные установки, программы для расчета напряженно-деформированного состояния материалов под нагрузкой и многочисленные результаты расчетов, в том числе с привлечением суперкомпьютеров. Подавляющее большинство работ поддержаны РФФИ, РНФ и другими отечественными фондами.

Пленарные и секционные заседания проходили в течение трех дней и содержали более 100 докладов. На пленарном заседании выступали проф. Т.В. Бордовицына и проф. Г.О. Рябова, которые рассказали об успехах небесной механики. Доклад Л.Н. Мухина был адресован всем будущим выпускникам технических специальностей. Доклад С.В. Пашкова посвящен численному моделированию задач динамического нагружения твердых тел. Доцент Ю.П. Михайличенко продемонстрировал новые эксперименты по дифракции и интерференции. Доклад доцента Е.А. Маслова был посвящен задачам газодинамики и теплообмена.

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

Информация о конференции находится на веб-страницах:

<http://cimcm.tsu.ru/index.php/ru/>

<https://vk.com/cimcm>

До новых встреч!

Председатель Организационного комитета конференции
К.ф.-м.н., *М.Ю. Орлов*

PREFACE

November 26–28, 2018, the annual All-Russian Youth Scientific Conference "Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics" was held at the National Research Tomsk State University. This time we met 8 times, and our event was dedicated to the 140th anniversary of Tomsk State University.

Young scientists from Tomsk, Moscow, St. Petersburg, Simferopol, Sarov, Novosibirsk, Barnaul, N. Novgorod, Kemerovo, Kazan, Krasnoyarsk, Birobidzhan, Novokuznetsk, Irkutsk and other cities took part in the conference. I would like to note that this time the maximum number of speakers from other cities of Russia attended the sectional meetings.

One of the main objectives of the conference is to attract and consolidate in the field of science and innovation young researchers - the future of domestic science. New theoretical and experimental results in the field of modern mechanics were presented. The authors demonstrated original experimental setups, computer programs for calculating the stress-strain state of materials under loading, and numerous calculation results, including the use of supercomputers. The vast majority of the works are supported by the RFBR, RNF and other domestic Funds.

Plenary and parallel sessions were held for three days and contained more than 100 reports. At the plenary session were prof. Tatiana Bordovitsyna and prof. Galina Ryabova, who told about the successes of celestial mechanics. Leonid Mukhin's report was addressed to all future graduates of technical specialties. Sergey Pashkov's report is devoted to numerical simulation of problems of dynamic loading of solids. Ass. Professor Yury Mikhailichenko demonstrated new experiments on diffraction and interference. Ass. Prof. Eugen Maslov's was devoted to the problems of gas dynamics and heat transfer.

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

<http://cimcm.tsu.ru/index.php/ru/>

<https://vk.com/cimcm>

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

Until next time!

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

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

Со-Председатели:

д.ф.-м.н. Шрагер Г.Р.

д.ф.-м.н. Глазунов А.А.

Небесная механика,
Исследования космоса,
Физический кабинет,
Лекционные демонстрации
Двухфазные потоки,
Газовая динамика,
Численные методы в механике деформируемого твердого тела,
Математическое моделирование,
Трудоустройство,
Рекрутинг

PLENARY SESSION

Co-Chairs

Prof. Ernst Schrager
Prof. Anatoly Glazunov

Celestial mechanics,
Space exploration,
Physics demo room,
Lecture demonstrations,
Two-phase flows,
Gas dynamics;
Numerical method,
Mathematical modelling,
Employment,
Recruiting.

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ОКОЛОЛУННЫХ ОБЪЕКТОВ

Т.В. Бордовицына

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
tvbord@sibmail.com

Ключевые слова: окололунные объекты, динамика, орбитальная эволюция, время жизни, вековые резонансы.

Аннотация. Обсуждаются результаты обширного численного эксперимента по исследованию особенностей динамики окололунных объектов искусственного происхождения. Представлен детальный анализ орбитальной эволюции 5180 модельных объектов, движущихся в гравитационном поле Луны (с учетом второй зональной гармоник) под действием притяжения Земли и Солнца. Показано, что совместное действие апсидально-нодальных резонансов, ассоциируемых с Землей, сопровождается быстрым ростом эксцентриситетов орбит объектов с наклонениями от 70 до 110 градусов. Это, в свою очередь, приводит либо к столкновению объектов с Луной, либо к выбросу их за пределы окололунного пространства. Данные результаты могут быть использованы при выборе стратегии размещения спутниковых систем долговременного использования в окололунном орбитальном пространстве.

THE MAIN FEATURES OF THE NEAR LUNAR OBJECT'S DYNAMICS

Tatiana V. Bordovitsyna

National research Tomsk State University
tvbord@sibmail.com

Keywords: near-moon objects, dynamics, orbital evolution, lifetime, secular resonances.

Abstract. The results of an extensive numerical experiment to study the features of the dynamics of near-moon objects of artificial origin are discussed. The detailed analysis of the features of the orbital evolution for 5180 model objects moving in the gravity field of the Moon (up to the second zonal harmonic) under the influence of the attraction of the Earth and Sun are given. We demonstrate that the combined effect of the apsidal-nodal resonances associated with the Earth can lead to a rapid increase of orbital eccentricities for objects with inclinations from 70 to 110 degrees. This, in turn, leads either to a collision of objects with the Moon, or to throwing them out of the circumlunar space. These results can be used to select a strategy for deploying long-term satellite systems in the near-moon orbital space.

В связи с предстоящим исследованием Луны большой интерес представляет изучение динамической структуры окололунного орбитального пространства. Знание этой структуры необходимо для развития спутниковых систем для обеспечения любых длительных экспериментов на поверхности Луны.

В ряде работ (Song et al., 2010; Gupta and Sharma, 2011) исследовано влияние гравитационного поля Луны и притяжения Земли на низкие спутники Луны. Однако результаты, представленные в этих работах, практически не пересекаются с результатами данной работы. Наибольший интерес, с точки зрения нашего исследования, представляет статья (Tzirti et al., 2014), где вековая динамика лунных спутников изучается методом частотного анализа Прони. При моделировании орбит авторы учитывали гармоники селенопотенциала и влияние Земли и рассматривали высоты до 1000 км над поверхностью Луны.

Мы представляем здесь анализ динамической структуры околорунного орбитального пространства (и вековых частот в том числе) для обширной области околорунного пространства в диапазоне больших полуосей $[1.1 R_L, 15 R_L]$ (R_L есть радиус Луны) и диапазоне наклонов $[0, 180^\circ]$. Эволюция орбит изучается в течение десятилетнего интервала времени. Учитываются влияние несферичности лунного гравитационного поля, а также притяжение Земли и Солнца. Интересно отметить, что для высот 1000 км над поверхностью Луны, где уже заметно действие Земли, результаты, представленные в данном докладе, хорошо совпадают с результатами (Tzirti et al., 2014).

Результаты, приведенные в работах (Rossi, 2008; Bordovitsyna et al., 2012, Daquin et al., 2016), показывают, что вековые резонансы играют важную роль в долгосрочной динамической эволюции спутниковых объектов, прежде всего апсидально-нодальные резонансы, а также геометрический резонанс Лидова–Козаи. Однако влияние этих резонансов на динамику околорунных объектов остается малоизученным. Поэтому здесь мы уделяем особое внимание изучению влиянию апсидально-нодальных резонансов. Представляемые нами результаты были получены с использованием численно-аналитического подхода.

Путем численного интегрирования уравнений движения, записанных с учетом указанных выше возмущений, была построена орбитальная эволюция 5180 околорунных объектов, равномерно распределенных в изучаемом орбитальном пространстве с шагом $0,1 R_L$ по большой полуоси и 5 градусов по наклону.

В обобщенной форме результаты исследования эволюции орбиты для всего набора объектов показаны на рис. 1. Основной особенностью эволюции околорунных объектов является увеличение эксцентриситетов их орбит (рис. 1, а) для начальных орбитальных наклонов от 65 до 115 градусов и больших полуосей, превышающих 7500 км ($4,3 R_L$). Эксцентриситеты для объектов, имеющих большие полуоси менее 5500 км ($3,2 R_L$), растут слабо.

Время жизни объектов показано на рис. 1, б. Как и ожидалось, все объекты с большими полуосями более 7500 км ($4,3 R_L$) и с наклонами от

70 до 110 градусов имеют наименьшее время жизни от 0,1 до 2 лет. Для большинства объектов с небольшими орбитальными наклонениями от 0 до 35 градусов и от 145 до 180 градусов в широком диапазоне больших полуосей эксцентриситеты либрируют с небольшими амплитудами вокруг некоторых значений, незначительно отличающихся от нуля.

Таким образом, мы видим, что околополярные и околоэкваториальные объекты имеют совершенно иной характер эволюции орбит, несмотря на то что имеют одинаковые возмущения. Это можно объяснить только свойствами частотного базиса, создаваемого возмущениями и резонансными взаимодействиями частот.

Известно (Breiter, 1999, 2001a, 2001b, Daquin et al., 2016; Бордовицына, Томилова, 2016; Чувашов et al., 2017), что основной причиной увеличения эксцентриситеты орбит является действие апсидально-нодальных вековых резонансов. Поэтому влияние этих резонансов на орбитальную эволюцию рассматриваемых объектов было изучено весьма тщательно.

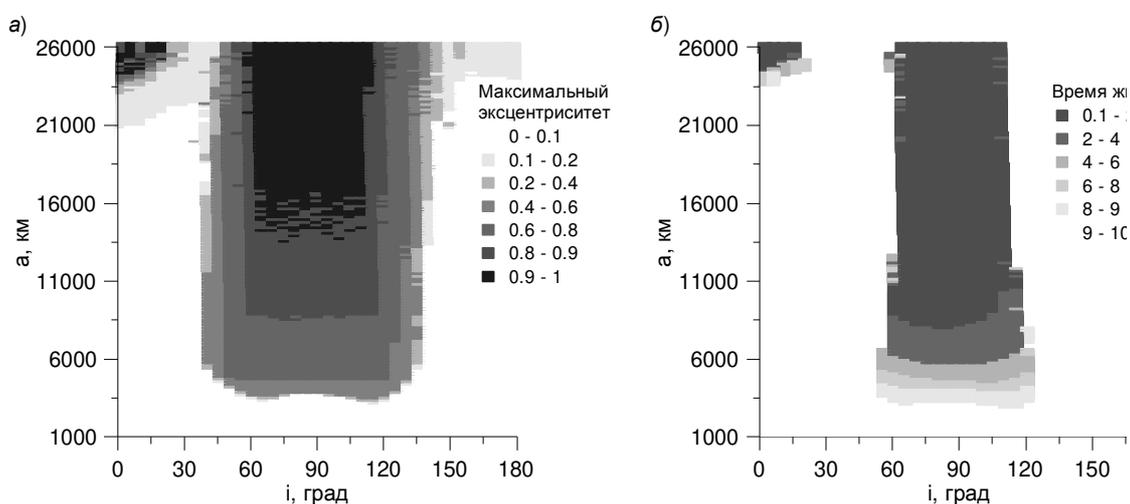


Рис. 1. Особенности орбитальной эволюции: *а* – эволюция эксцентриситетов орбит; *б* – время жизни окололунных объектов

Прежде всего были рассмотрены особенности структуры частотного базиса, возникающего в результате действия возмущений, и изучена зависимость изменения всех компонентов базиса от орбитального наклонения объекта и его большой полуоси. Затем используя методику, изложенную в (Бордовицына et al., 2014), были выведены все апсидально-нодальные резонансные соотношения до шестого порядка.

Совместное исследование поведения резонансных соотношений, их критических аргументов и сопоставление этих результатов с орбитальной эволюцией объектов, позволили сделать ряд интересных выводов.

Изучение орбитальной эволюции 5180 модельных объектов на десятилетнем интервале времени указывает на то, что орбитальные

эксцентриситеты для всех объектов, имеющих наклонения орбит в диапазоне от 70 до 110 градусов, имеют тенденцию к увеличению.

Резонанс Лидова–Козаи (Лидов, 1961; Kozai, 1962) проявляет себя в обширной области окололунного орбитального пространства, ограниченного наклонениями орбит от 30 до 150 градусов. Однако области острого резонанса Лидова–Козаи находятся в области наклонений от 55 до 75 градусов и от 105 до 125 градусов.

Влияние одного резонанса Лидова–Козаи не приводит к быстрому увеличению орбитальных эксцентриситетов. Действие любого единичного резонанса не вызывает катастрофической орбитальной эволюции.

Во всех случаях, когда эволюция орбиты протекает в соответствии с катастрофическим сценарием, большое количество вековых апсидально-нодальных резонансов одновременно действует на орбиту спутника.

Движение околополярных объектов особенно сложно. Эти объекты подвержены действию острого нодального резонанса второго порядка. Резонанс Лидова–Козаи представлен в этой области как стабильный малый знаменатель. Кроме того, незначительность значений нодального резонанса и резонанса Лидова–Козаи, а также отрицательное значение последнего порождают появление других резонансов и малых знаменателей.

Вековые апсидально-нодальные резонансы, связанные с Солнцем, практически не оказывают устойчивого действия на орбитальную эволюцию окололунных объектов.

Представленные в докладе результаты не дают исчерпывающего представления обо всех особенностях динамики окололунных объектов, но уже позволяют сделать выводы о том, какие зоны окололунного орбитального пространства не пригодны для размещения спутниковых систем долговременного использования.

Литература

1. *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. вестн.* 2014. Т.48, № 4. С. 280–289.

2. *Бордовицына Т.В., Томилова И.В.* Особенности структуры вековых резонансов в динамике околоземных космических объектов // *Изв. вузов. Физика*, 2016, Т. 59. № 3, С. 41–48.

3. *Лидов М.Л.* Эволюция искусственных спутников планет под действием гравитационных возмущений от внешнего тела // *Искусственные спутники Земли*. 1961. Т. 8. С. 5–45.

4. *Чувашов И.Н., Красавин Д.С., Бордовицына Т.В.* Особенности долговременной орбитальной эволюции спутников Эталон-1 и Эталон-2 // *Изв. вузов. Физика*, 2017, Т. 60, № 3 С. 64–69.

5. *Breiter S.* Lunisolar apsidal resonances at lowsatellite orbits // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* 1999. Vol. 74. Pp. 253–274.

6. *Breiter S.* Lunisolar resonances revisited // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* 2001a. Vol. 81. Pp. 81–91.
7. *Breiter S.* On the coupling of lunisolar resonances for Earth satellite orbits // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* 2001b. Vol. 80. Pp. 1–20.
8. *Daquin J., Rosengren A.J., Alessi E.M., Deleflie F., Valsecchi G.B., Rossi A.* The dynamical structure of the MEO region: long-term stability, chaos, and transport // *Celest Mech Dyn Astr. Celest. Mech. and Dyn. Astr.*, 2016, Vol. 124 (4). Pp. 335–366.
9. *Gupta S., Sharma R.K.* 2011 Effect of Altitude, Right Ascension of Ascending Node and Inclination on Lifetime of Circular Lunar Orbits // *IJAA*, Vol. 1. Pp. 155–163.
10. *Kozai Y.* Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity // *Astron. J.* 1962. Vol. 67. Pp. 591–598.
11. *Rossi A.* Resonant dynamics of Medium Earth Orbits: space debris // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* 2008. Vol. 100. Pp. 267–286.
12. *Song Y., Park S, Kim H and Sim E.* 2010, Development of Precise Lunar Orbit Propagator and Lunar Polar Orbiter’s Lifetime Analysis // *J. Astron. Space Sci.* Vol. 27. Pp. 97–106.
13. *Tzirti S., Noullez A., Tsiganis K.* 2014, Secular dynamics of a lunar orbiter: a global exploration using Prony’s frequency analysis// *Celest Mech Dyn Astr.* Vol. 118. Pp. 379–397.

References

1. *Bordovitsyna T.V., Tomilova I.V., and Chuvashov I.N.* Secular resonances as a source of dynamic chaoticity in the long-term orbital evolution of uncontrolled satellites // *Solar System Research*, 2014, Vol. 48, No. 4. Pp. 259–268
2. *Bordovitsyna T.V. and Tomilova I.V.* 2016. Special feature of the structure of secular resonances in the dynamics of near-Earth space object // *Rus. Phys. Jour.* Vol. 59. No. 3. Pp. 365–373.
3. *Lidov M.L.* The evolution of artificial satellites under the influence of gravitational perturbations from the external body // *Artificial Earth’s satellite* 1961. No 8. Pp. 5–45.
4. *Chuvashov I.N., Krasavin D.S., and Bordovitsyna T.* Special feature of long-term orbital evolution of Etalon-1 and Etalon-2 satellites // *Rus. Phys. Jour.* 2017. Vol. 60. No. 3. Pp. 449–454
5. *Breiter S.* Lunisolar apsidal resonances at low satellite orbits // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* 1999. Vol. 74. Pp. 253–274.
6. *Breiter S.* Lunisolar resonances revisited // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* 2001a. Vol. 81. Pp. 81–91.
7. *Breiter S.* On the coupling of lunisolar resonances for Earth satellite orbits // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* 2001b. Vol. 80. Pp. 1–20.
8. *Daquin J., Rosengren A.J., Alessi E.M., Deleflie F., Valsecchi G.B., Rossi A.* The dynamical structure of the MEO region: long-term stability, chaos, and transport // *Celest Mech Dyn Astr. Celest. Mech. and Dyn. Astr.*, 2016. Vol. 124 (4). Pp. 335–366.
9. *Gupta S., Sharma R.K.* 2011 Effect of Altitude, Right ascension of ascending node and inclination on lifetime of circular lunar orbits // *IJAA*. Vol. 1. Pp. 155–163.
10. *Kozai Y.* Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity // *Astron. J.* 1962. Vol. 67. Pp. 591–598.
11. *Rossi A.* Resonant dynamics of medium earth orbits: space debris // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* 2008. Vol. 100. Pp. 267–286.
12. *Song Y., Park S, Kim H and Sim E.* 2010, Development of precise lunar orbit propagator and lunar polar orbiter’s lifetime analysis // *J. Astron. Space Sci.* Vol. 27. Pp. 97–106.
13. *Tzirti S., Noullez A., Tsiganis K.* 2014, Secular dynamics of a lunar orbiter: a global exploration using Prony’s frequency analysis// *Celest Mech Dyn Astr.* Vol. 118. Pp. 379–397.

ВОЗМОЖНОСТИ ТРУДОУСТРОЙСТВА ВЫПУСКНИКОВ ВУЗОВ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОДГОТОВКИ

Л.Н. Мухин

Национальный исследовательский Томский государственный университет
leonmukhin@gmail.com

Ключевые слова: трудоустройство, работодатели, рекрутинг, вакансии.

Аннотация. Проанализированы возможности трудоустройства выпускников вузов физико-математических направлений подготовки. Приведены источники информации о возможных направлениях занятости, о возможностях трудоустройства, о вакансиях. Перечислены основные предприятия и целые отрасли, где востребованы молодые специалисты данного профиля. Приведены адреса и характерные особенности сайтов в сети Интернет, где публикуется основное количество вакансий предприятий г. Томска и всей России. Отмечена роль производственной практики, возможность представления ее в профессиональном резюме, как источника практического опыта.

OPPORTUNITIES OF EMPLOYMENT OF GRADUATES-PHYSICISTS AND MATHEMATICIANS

L.N. Mukhin

National Research Tomsk State University
leonmukhin@gmail.com

Keywords: employment, employers, recruiting, vacancies.

Abstract. Some possibilities of employment of graduates of high schools of physical and mathematical specialties are given. Sources of information about vacancies are listed. The role of industrial practice as a source of practical experience is noted.

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

В первую очередь университет готовит ученых-исследователей. Выпускников ТГУ всегда готовы видеть у себя академические институты не только Томского филиала СО РАН, но и институты Новосибирского Академгородка, других городов России. Наш университет имеет многолетние

связи со многими научными учреждениями Российской Федерации, в том числе благодаря сотням выпускников ТГУ, работающим в различных областях науки и техники.

В последнее десятилетие резко увеличилось количество предложений от крупных компаний о приеме на работу молодых специалистов инженерных и физико-математических специальностей. Крупнейшие промышленные предприятия России, испытывая дефицит кадров, стараются «рекрутировать» будущих сотрудников еще со студенческой скамьи. Любое крупное предприятие ведет политику адаптации, поддержки и развития выпускников, стремясь в короткий срок превратить их в квалифицированных специалистов. В качестве примера можно привести предприятия «Росатома» [1, 2], «Роскосмоса».

Определенную сложность с трудоустройством испытывают выпускники НИ ТГУ – иностранные граждане, в том числе граждане стран СНГ и те, кто уже получил российское гражданство, но имеет близких родственников за рубежом. Предприятия «Росатома» и «Роскосмоса» не принимают на работу таких граждан по правилам службы безопасности.

Несколько вариантов трудоустройства молодых специалистов предлагает Министерство обороны РФ: срочная служба в научной роте, служба по контракту по полученной в гражданском вузе специальности, служба по контракту в 12-м ЦНИИ МО РФ. Выпускник вуза может выбрать место службы по своей гражданской специальности, при этом он обеспечивается обмундированием, питанием, служебной или съемной жилплощадью и конкурентной зарплатой в зависимости от места службы и специальности. На службу по контракту принимают и иностранных граждан, при этом первый контракт заключается на пять лет и, по желанию гражданина, процедура смены гражданства значительно упрощается. Это тоже один из вариантов карьерного лифта для иностранных граждан, желающих остаться в России.

В последнее десятилетие, на сайтах крупных промышленных компаний, академических институтов, предприятий госкорпораций появились разделы, посвященные привлечению молодых специалистов. В разделе «Карьера» или «Вакансии для выпускников вузов» описан порядок представления резюме, проведения отбора, условия работы, размер вознаграждения, социальные гарантии сотрудников и т.д. Примером может служить сайт Компании «Шлюмберже» (Schlumberger) [4], где привлечению выпускников посвящен целый портал и описаны вакансии и возможности прохождения нескольких видов практик в разное время года. Очень интересные возможности открываются для выпускников магистратуры, которые бакалавриат закончили по одной специальности, а магистратуру – по другой, например биология и физика или химия и математика. Кроме того, компания периодически запускает обучающие бесплатные on-line проекты. На момент подготовки данного материала на сайте компании красовался

анонс бесплатного онлайн курса для девушек «Разгляди себя в нефтегазе» [5]. Это не только шанс получить важные знания для будущей возможности трудоустройства, но и получить стипендию в размере 50000 рублей и пройти стажировку в глобальной технологической компании!

Другая возможность трудоустройства выпускников физико-математических направлений подготовки – это вакансии «экономист-математик», «математик-аналитик». В таких специалистах нуждаются банки, крупные кредитные организации, брокерские конторы. Вот некоторые из направлений деятельности таких специалистов:

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

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

Очень хороший способ приобрести компетенции в области экономики – выучиться и получить сертификат программиста 1С: Предприятие. Да и сами вакансии программиста 1С встречаются очень часто, поэтому эта область тоже может стать областью применения сил выпускника-математика.

Работу по поиску возможностей будущего трудоустройства нужно начинать уже на первом-втором курсе. Для этого нужно хорошо изучить свой факультет, научные группы, направления их работы, научных и производственных партнеров, выбрать себе будущего научного руководителя, предложить свои услуги, возможно даже на безвозмездной основе в рамках курсовых и т.д.

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

Производственная практика, проведенная на реальном предприятии, практическое знакомство с реальными научными или производственными задачами – это тот опыт, который в профессиональном резюме можно представить как опыт работы. Даже, если студент проходит практику в родном университете, работая на современном оборудовании, используя аппаратные и программные средства, применяемые в производстве, опыт выполнения таких практик можно представить как реальный опыт работы и не стесняться этого. Выпускники химического факультета НИ ТГУ

2017 г., выполнявшие курсовые работы и проходившие практику в стенах родных лабораторий, на типовом промышленном оборудовании, разместили свои резюме в сети Интернет [7, 8] и получили предложения от работодателей Томска и Новосибирска.

Кроме собственных сайтов предприятий, в Интернете можно найти множество других источников информации о возможностях трудоустройства. В первую очередь это, конечно, специализированные сайты с прямыми вакансиями работодателей. В Томске основными сайтами для поиска работы являются: сайт газеты «Вакансии для всех» [9], томский раздел федерального портала «Zarplata» [10]. На сайте ОПиТ ТГУ [11] можно найти базу ссылок на страницы вакансий предприятий г. Томска, вакансии, полученные от работодателей, другие возможности трудоустройства выпускников и занятости студентов.

В последние годы резюме молодых специалистов востребованы на порталах федеральных рекрутинговых компаний HeadHunter [6] и Superjob [7]. Причем обращаются к ним не кадровые агентства, а реальные работодатели, предприятия и компании.

Интересную информацию о возможностях трудоустройства можно получить на профессиональных форумах, обсуждениях в блогах и т.д. Где, как не на профессиональных тусовках, можно узнать, чем и где занимаются специалисты определенного профиля, куда и кому можно предложить свои услуги. В последние годы многие рекрутеры ведущих предприятий широко используют для привлечения молодых специалистов социальные сети: тематические группы и личные аккаунты.

Большие возможности для трудоустройства предоставляет федеральная служба занятости. После регистрации в Центре занятости молодому специалисту становится доступна база имеющихся вакансий на предприятиях всей России [8]. Центр занятости населения (ЦЗН) г. Томска, совместно с ОПиТ НИ ТГУ открыли новую услугу – биржу труда для студентов. Можно выбрать вакансию на сайте ЦЗН [12] среди вакансий работодателей, готовых принять студентов на подработку в свободное от учебы время или прийти в приемные часы и получить консультацию специалиста.

Необходимо упомянуть еще два важных качества выпускника, способствующих успешному трудоустройству: владение специальными компьютерными программами и уверенное владение английским (или иным иностранным) языком. Почти в каждой специальности есть специализированные компьютерные программы, уверенное владение которыми значительно повышает шансы на успешное трудоустройство. А без знания английского языка многие крупные мировые компании вообще не рассматривают кандидатов.

Таким образом, перед студентами физико-математических направлений подготовки открывается множество возможностей найти и выбрать интересную работу после окончания вуза. Для этого надо определиться с выбо-

ром будущей занятости, повышать квалификацию, поставить себе цель уже на 1-2 курсе и искать людей, работодателей, предприятия, которые помогут ее достичь.

Литература

1. ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина». Целевой набор: [сайт]. URL: <http://www.vniitf.ru/sotrudnikam/budushchim-sotrudnikam/tselevoj-nabor-2014>
2. Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ – ВНИИЭФ). Организация практики и дипломного проектирования студентов: [сайт]. URL: <http://www.vniief.ru/wps/wcm/connect/vniief/site/carier/cpolit/practice/>
3. 12 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации. Вакансии: [сайт]. URL: <http://ens.mil.ru/science/SRI/infrmation.htm?id=12008@morfOrgScience>
4. Компания «Шлюмберже». Вакансии для выпускников вузов: [сайт]. URL: http://www.slb.ru/careers/carier_start/#tab_section113
5. Компания «Шлюмберже». Разгляди себя в нефтегазе: [сайт]. URL: <http://changelenge.com/slb-career/>
6. Группа компаний HeadHunter. Работа в Томске: [сайт]. URL: <https://tomsk.hh.ru/>
7. Superjob. Работа в Новосибирске: [сайт]. URL: <https://nsk.superjob.ru/>
8. Работа в России. Общероссийская база вакансий: [сайт]. URL: <https://trudvsem.ru/>
9. Вакансии для всех. Еженедельная газета: [сайт]. URL: <http://vacancy-tomsk.ru>
10. «Зарплата.ru». Вакансии в Томске: [сайт]. URL: <https://tomsk.zarplata.ru/>
11. Отдел практик и трудоустройства НИ ТГУ. Вакансии предприятий Томска: [сайт]. URL: http://www.cstv.tsu.ru/pv_2017.pdf
12. Центр занятости населения г. Томска. Биржа труда для студентов: [сайт]. URL: <http://czn.tomsk.ru/notes/ob185/>

References

1. FSUE RFNC - VNIITF named after academician E.I. Zababakhin. Target set: [site]. URL: <http://www.vniitf.ru/sotrudnikam/budushchim-sotrudnikam/tselevoj-nabor-2014>
2. Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics (RFNC-VNIIEF). Organization of practice and graduate design of students: [site]. URL: <http://www.vniief.ru/wps/wcm/connect/vniief/site/carier/cpolit/practice/>
3. 12 Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Jobs: [site]. URL: <http://ens.mil.ru/science/SRI/infrmation.htm?id=12008@morfOrgScience>
4. Schlumberger. Vacancies for university graduates: [site]. URL: http://www.slb.ru/careers/carier_start/#tab_section113
5. Schlumberger. Look yourself in the oil and gas: [site]. URL: <http://changelenge.com/slb-career/>
6. Group of companies HeadHunter. Work in Tomsk: [site]. URL: <https://tomsk.hh.ru/>
7. Superjob. Work in Novosibirsk: [site]. URL: <https://nsk.superjob.ru/>
8. Work in Russia. All-Russian base of vacancies: [site]. URL: <https://trudvsem.ru/>
9. Jobs for all. Weekly newspaper: [site]. URL: <http://vacancy-tomsk.ru>
10. “Salary.ru”. Jobs in Tomsk: [site]. URL: <https://tomsk.zarplata.ru/>
11. Department of practices and employment of TSU. Jobs enterprises Tomsk: [site]. URL: http://www.cstv.tsu.ru/pv_2017.pdf

12. Center of employment of the population of Tomsk. Labor exchange for students: [site]. URL: <http://czn.tomsk.ru/notes/ob185/>

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА ПРИ УДАРНЫХ И ВЗРЫВНЫХ НАГРУЗКАХ

М.Ю. Орлов, В.П. Глазырин, Ю.Н. Орлов

Национальный исследовательский Томский государственный университет
orloff_m@mail.ru

Ключевые слова: лед, модель, взрыв, удар, эксперимент, моделирование, расчет, разрушение.

Аннотация. В работе представлены результаты комплексных теоретико-экспериментальных исследований поведения льда при ударных и взрывных нагрузках. Приведены основные достижения коллектива в области механики разрушения льда. Изложена физико-математическая модель деформирования и разрушения льда при ударных и взрывных нагрузках. Предпринята попытка учета зависимости прочности льда от его температуры. Моделирование процессов ударного и взрывного нагружения льда проведено с использованием численного лагранжева метода. Задачи решены в двумерной осесимметричной постановке при помощи разработанного программного комплекса. В течение семи последних лет на реке Томь в районе г. Томска проведены натурные эксперименты по подводному взрыву заснеженного и бесснежного ледяного покрова эмульсионной взрывчаткой. Изучена морфология разрушения льда, определен диаметр полыньи во льду и состояние его кромки. Приведены результаты экспериментов по низкоскоростному соударению ударников с однослойными и многослойными ледяными преградами, изготовленными в лабораторных условиях.

STUDY DESTRUCTION OF ICE AT SHOCK AND EXPLOSIVE LOADS

M.Yu. Orlov, V.P. Glazyrin and Yu.N. Orlov

National research Tomsk State University
orloff_m@mail.ru

Keywords: Ice, model, explosion, projectile, experiment, simulation, computation, destruction.

Abstract. The paper presents the results of a comprehensive theoretical and experimental study of the behavior of ice under shock and explosive loads. The main achievements of the team in the field of ice fracture mechanics are given. A physical and mathematical model of the deformation and destruction of ice under shock and explosive loads is briefly described. An attempt is made to account for the temperature of ice formation from its strength. A numerical method for calculating the processes of shock and explosive loading of ice is given. The simulations were carried out in 2D axisymmetric formulation using a non-commercial software package. For the last seven years on the Tom conducted field experiments on the under-

water explosion of snow-covered and snow-free ice covers with emulsion explosives. The morphology of the destruction of ice has been studied. The diameter of polynya in ice and the state of its edge have been determined. The results of laboratory tests on low-velocity impact of projectiles with single-layer and multi-layer ice barriers are presented. Ice is artificial and is distinguished by time and freezing temperature.

В настоящее время сложной и актуальной научной задачей являются исследования поведения льда при ударных и взрывных нагрузках. Актуальность обусловлена необходимостью развития северных территорий и увеличением добычи природных ископаемых на Крайнем Севере, борьбой с ледяными заторами на сибирских реках, созданием новых защит от микрометеоритов, некоторыми военными приложениями. Следует также отметить, что начиная с 2013 г. в соответствии с задачей, поставленной президентом РФ, возобновляется постоянное присутствие России в Арктике, а Северный морской путь является «исторически сложившийся национальной единой транспортной коммуникацией России в Арктике» [1, 2]. Основная сложность исследований определена еще в середине прошлого столетия в работах [3, 4] и заключается в том, что лед является древнейшим природным материалом, деформирование которого сопровождается фазовыми переходами, а сам лед имеет аномальные пластические свойства. Известно более 15 типов льда, причем некоторые из них имеют внеземное происхождение. Анализ научной литературы указывает на необходимость углубления научных знаний в области физики и механики разрушения льда, включая создание адекватных математических моделей разрушения льда при взрыве.

В НИИ ПММ ТГУ постоянно ведутся поисковые научные исследования, объектом исследования которых является лед (морской, пресноводный, искусственный). Разрабатывается физико-математическая модель поведения льда при динамических нагрузках, а также численные методы расчета. Экспериментальные исследования заключаются в полномасштабных натурных экспериментах и лабораторных экспериментах по низкоскоростному соударению ударников с ледяными преградами. Работы выполнены совместно с ООО КузбасСпецВзрыв, МЧС РФ по ТО и ТРОО «Ассоциация практической стрельбы» [5, 6].

Физико-математическая модель деформирования и разрушения льда при ударных и взрывных нагрузках базируется на фундаментальных законах сохранения механики деформируемых твердых тел и определяющих соотношениях. Упруго-пластическое поведение ν fnthbfcf задаётся уравнениями Прандтля–Рейса при условии текучести Мизеса. Модель не привязана к одному типу уравнения состояния, поэтому возможно использование различных уравнений, включая широкодиапазонные. При описании разрушения льда используется концепция образования разрушения по типу отрыва и по типу сдвига, развитая в [7].

В качестве основного метода исследований использован численный метод, основанный на лагранжевом подходе к описанию движения сплошных сред [8]. Согласно терминологии [9] метод содержит новый способ выделения поверхностей разрыва сплошности материалов, который не накладывает серьезных ограничений на решении многоконтактных динамических задач МДТТ. В работе [10] предложен улучшенный алгоритм расчета контактных и свободных поверхностей специально для расчета задач подрыва толстого льда (≤ 200 см) безоболочечными зарядами ВВ.

Последней инновацией следует считать организованную на базе НИИ ПММ мобильную лабораторию «Взрывное разрушение природных материалов», основная цель которой является экспресс-анализ поведения льда при взрывных нагрузках. Лаборатория развивается как альтернатива американской исследовательской программы ScIce и в настоящий момент имеет статус инициативного проекта. На р. Томь выявлены экспериментальные площадки, на которых ежегодно образуется заснеженный и бесснежный ледяной покров, ледяной покров сэндвич структуры (Снег – Шуга – Лед), а также «игольчатый» лед. Приблизительный возраст льда 125 дней. Изучено поведение таких льдов при подводном взрыве заряда эмульсионной взрывчатки массой 4 кг (3.25 кг в ТНТ эквивалент по теплоте взрыва). Предметом исследования является майна (полынья), а именно: ее диаметр и состояние кромки и т.п. Установлено, что в зависимости от типа льда результат взрыва является прогнозируемым. Данный факт подтвержден экспериментами на протяжении семи лет.

Проведены лабораторные эксперименты по низкоскоростному соударению ударников с оживальной и закругленной головными частями с ледяными цилиндрами. Объектами исследования были однослойные и многослойные ледяные преграды. Воздушный зазор между слоями отсутствовал. Лед отличался температурой и временем заморозки. Процесс пробития льда фиксировался на высокоскоростную камеру. Измерена начальная и запреградная скорость ударника. Во всех случаях лед разрушался на фрагменты, при этом ударник сохранял первоначальную форму.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 19-08-01152.

Литература

1. Богородский В.В., Гаврило В.П. Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л.: Гидрометеиздат, 1980, 383 с.
2. Бочаров Л.Ю., Корчак В.Ю., Тужиков Е.З. Научные исследования США в Арктике: организационный подход и военные программы // Арктика: экология и экономика № 3 (19), 2015 С. 48–53.
3. Мазно Н. Наука о льде. М.: Мир, 1988. 231 с.
4. Кан С.И. Морские льды. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 136 с.
5. Официальный сайт ООО КузбасСпецВзрыв, <http://kuzbasspecvzriv.kemerovo7.ru/>
6. Официальный сайт Томской региональной общественной организации «Ассоциация практической стрельбы», <http://strelok.tomsk.ru/>

7. Толкачев В.Ф., Трушков В.Г. Математическое моделирование сдвиговых и откольных разрушений при ударном взаимодействии упругопластических тел // Химическая физика. 1993. Т. 12. С. 170–175.

8. Johnson G.R. High Velocity Impact Calculations in Three Dimensions / Journal of Applied Mechanics, Vol. 44, No. 1, Trans. ASME. Vol. 99, Series E. Mar., (1977). Pp. 95–100.

9. Орлов М.Ю., Глазырин В.П., Орлов М.Ю. Исследование поведения твердых тел при ударных и взрывных нагрузках. Полномасштабные натурные эксперименты. Лабораторные эксперименты. Численное моделирование // Труды Томского государственного университета. Т. 302. Серия физико-математическая: Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики: Международная молодежная научная конференция 27–29 ноября 2017 г. Томск / под ред. М.Ю. Орлова. Томск: Изд-во Том. ун-та. С. 26–35.

10. Орлова Ю.Н. Комплексное теоретико-экспериментальное исследование поведения льда при ударных и взрывных нагрузках: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2014.

References

1. Bogorodsky V.V., Gavrilov V.P., Led. Fizicheskaya Svoystva Sovremennyye Metody Glyatsiologii, (Ice. Physical Property. Modern Methods of Glaciology – in Russian), Gidrometeoizdat Press, Leningrad, USSR, 1980.

2. Bocharov L.Yu., et al. US Scientific Research in the Arctic: Organizational Approach and Military (in Russian), *Arctic: Ecology and Economy*, 3 (2015), 19, pp. 48–53

3. Maeno N. Science of ice. M.: Mir, 1988. 231 p.

4. Kan S.I. Sea ice. L.: Gidrometeoizdat, 1974. 136 p.

5. Official website of LLC Kuzbass Spets Explosion, <http://kuzbasspecvzriv.kemerovo7.ru/>

6. Official site of the Tomsk regional public organization “Practical Shooting Association”, <http://strelok.tomsk.ru/>

7. Tolkachev V and Trushkov V [Matematicheskoye modelirovaniye sdivigovykh i otkol'nykh razrusheniy pri udarnom vzaimodeystvii uprugoplasticheskikh tel] Russian Journal of Physical Chemistry B: Focus on Physics. 12, pp. 170–175 (1993) (in Russ)

8. Johnson G.R. High Velocity Impact Calculations in Three Dimensions, Journal of Applied Mechanics, Vol. 44, No. 1, Trans. ASME. Vol. 99, Series E. Mar., (1977), pp. 95–100.

9. Orlov M.Yu., Glazyrin V.P. and Orlov Yu.N. Investigation of the behavior of solids under shock and explosive loads. Full-scale field experiments. Laboratory experiments. Numerical modeling // Proceedings of Tomsk State University. Vol. 302. Physics and Mathematics series: Current Issues of continuum mechanics and celestial mechanics: International Youth Scientific Conference, November 27–29, 2017. Tomsk / ed. M.Yu. Orlov. Publishing House of Tomsk University. pp. 26–35.

10. Orlova Yu.N. A comprehensive theoretical and experimental study of the behavior of ice under shock and explosive loads / Ph. D Thesis, Tomsk State University, 2014.

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЗАДАЧ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ

С.В. Пашков

Национальный исследовательский Томский государственный университет
s300@ngs.ru

Ключевые слова: вероятностный подход, динамическое разрушение, осколочный спектр, высокоскоростной удар, дефекты структуры.

Аннотация. Во многих задачах разрушения фрагментация является существенно вероятностным процессом, который определяется стохастическим характером распределения неоднородностей внутренней структуры материала. Описан вероятностный подход, позволяющий в достаточно простой форме, практически без усложнения модели и дополнительных экспериментов, моделировать структурные неоднородности материала. С использованием экспериментальных данных и результатов численного моделирования показано, что введение в модель материала всего одного дополнительного параметра (дисперсии распределения прочностных свойств) позволяет на любом масштабном уровне моделирования структуры придать процессу трещинообразования вероятностный характер, что соответствует теоретическим представлениям и экспериментальным данным. Начальные неоднородности и дефекты структуры материала моделируются тем, что прочностные характеристики материала распределяются по выбранным законам распределения по ячейкам расчетной области. Показано, что осколочные спектры, полученные с использованием разных законов распределения с одинаковой дисперсией, совпадают с точностью до вероятностного фактора, что позволяет использовать в расчетах любой закон распределения.

PROBABILISTIC APPROACH IN MODELING DYNAMIC FRACTURE PROBLEMS

S.V. Pashkov

National research Tomsk State University
s300@ngs.ru

Keywords: probabilistic approach, dynamic fracture, fragmentation spectrum, high-velocity impact, material structure defects.

Abstract. In many fracture problems, fragmentation is essentially a probabilistic process, which is determined by the stochastic nature of the distribution of inhomogeneities of the internal structure of material. The probabilistic approach is described, which allows to model structural heterogeneities of the material in a simple form, practically without complication of the model and additional experiments. Using experimental data and numerical simulation results, it is shown, that the introduction of only one additional parameter (dispersion of the strength properties distribution) into the material model makes it possible to give a probabilistic character to the crack formation process at any scale level, which corresponds to theoretical concepts and experimental data. Distribution of materials strength characteristics (according to the selected distribution law) in the cells of the computational domain is used for initial

heterogeneities and materials structure defects modeling. It is shown that the fragmentation spectra obtained using different distribution laws with the same dispersion coincide up to the probability factor, which allows to use any distribution law in the calculations.

Для большинства задач разрушения трещинообразование и фрагментация являются существенно вероятностным процессом, который определяется стохастическим характером распределения неоднородностей внутренней структуры материала [1]. Особенно наглядно это проявляется для осесимметричных задач (например, разрушение оболочек вращения под действием продуктов взрыва [2–4]). Долгое время вероятностный подход для подобных задач ограничивался аналитическими зависимостями параметров осколочного спектра от скорости деформации, определяемых моделью Мотта и её вариантами [1]. В настоящее время развитие компьютерных технологий делает наиболее перспективным подход, позволяющий при численном моделировании учесть неоднородность внутренней структуры тела путём распределения физико-механических характеристик, отвечающих за прочность [3, 4, 6, 7]. В данной работе, на примерах задач динамического разрушения, описывается подход, позволяющий придать процессу трещинообразования вероятностный характер. Основным препятствием для вероятностного характера трещинообразования при классическом подходе к моделированию является то, что в структуре материала отсутствуют неоднородности, в реальной ситуации обеспечивающие образование микротрещин и локальную релаксацию напряжений в прилегающем объёме на более ранних этапах деформирования. Следовательно, для придания процессу вероятностного характера, приближенного к реальности, распределение прочностных характеристик по объёму образца (узлам и ячейкам расчетной области) должно обеспечивать некий разброс предельных состояний материала, при которых начинается образование микротрещин. При этом информация о реальной внутренней структуре становится избыточной и даже для композитов при численном моделировании становится возможным использовать эффективные значения физико-механических и прочностных характеристик. В описываемом подходе предлагается распределять предел текучести и предельное значение параметра поврежденности, которое используется в качестве критерия разрушения. Если используемая модель накопления и роста поврежденности не предполагает явной связи между выбранными параметрами, то их распределения считаются независимыми, поскольку они зависят от разных дефектов структуры.

Численные эксперименты с разрушением толстостенных цилиндрических оболочек [2] показали, что на формирование осколочного спектра дисперсия начального распределения прочностных свойств оказывает более сильное влияние, чем его форма, что снижает требования, предъявляемые к выбору закона распределения, и позволяет в аналитических и численных расчетах с одинаковым успехом использовать практически любой

униmodalный закон. Определяющее влияние дисперсии распределения вполне согласуется с теоретическими представлениями – реализоваться в макротрещины смогут не все дефекты структуры, а лишь те, чьё отклонение от среднего значения превышает определенную величину. Другими словами, формирование осколочного спектра для конкретной задачи определяется ограниченным участком функции распределения предельных значений. Ширина этого участка зависит от скорости деформации и определяется исходя из условия распространения волн разгрузки (от первых микротрещин) на весь объём разрушаемого образца. В дальнейшем происходит локализация деформаций, рост и слияние трещин и вид функции распределения на оставшемся диапазоне уже практически не влияет на крупную фракцию осколочного спектра.

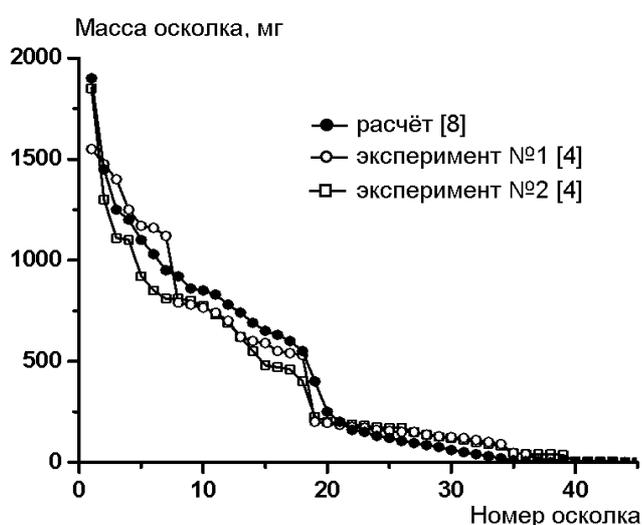


Рис. 1. Масса фрагмента кольца в зависимости от номера фрагмента

В работе предлагается использовать нормальное распределение, как более обоснованное теоретически и удобное для моделирования, в отличие от работ [3, 5-7], в которых используется распределение Вейбулла, вытекающее из степенной «функции катастроф» в теории Мотта. При отсутствии привязки к эксперименту используется, как правило, дисперсия, соответствующая 10-процентному практическому интервалу (99% значений случайной величины попадают в интервал $\pm 10\%$ от номинального значения [2]). Уменьшение дисперсии, как правило, увеличивает мелкую фракцию осколочного спектра, увеличение – увеличивает крупную фракцию. Использование нормального закона для распределения позволяет достаточно легко математически выделить интересующий интервал и исключить нефизические значения случайных величин. Разрушение стального кольца, надетого на заполненную взрывчатým веществом металлическую трубу [3, 4] также является хорошей иллюстрацией вероятностного подхода, так как схема эксперимента обеспечивает достаточно равномерную ра-

диальную скорость. В связи с тем, что скорость деформации практически одинакова для всех точек кольца, разделение его на фрагменты происходит благодаря наличию внутренних неоднородностей и локализации деформаций на самых крупных из них [4]. Итоговый осколочный спектр, полученный в работе [8] с использованием описываемого подхода, качественно и количественно согласуется с результатами экспериментов [4] как по количеству формируемых фрагментов, так и по их массам (рис. 1). Стоит отметить, что в [4] авторы также приходят к выводу, что выбор закона распределения не оказывает на осколочный спектр существенного влияния. Таким образом, введение в модель материала всего одного дополнительного параметра (дисперсии распределения прочностных свойств) позволяет придать процессу трещинообразования вероятностный характер, что соответствует экспериментальным данным и позволяет повысить точность расчетов без предварительного исследования структуры материала. Предложенный вероятностный подход может использоваться при любом шаге сетки и на любом уровне многоуровневого моделирования, обеспечивая распределение неоднородностей характерного размера. Кроме того, данный подход может применяться при решении широкого круга задач механики твердого тела [2, 8–10] для любых моделей материала и критериев разрушения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 19-08-01152.

Литература

1. Наймарк О.Б., Уваров С.В., Давыдова М.М., Банникова И.А. Многомасштабные статистические закономерности динамической фрагментации // Физическая мезомеханика, 2017, т. 20, № 1. С. 94–105.
2. Пашков С.В. Влияние распределения дефектов структуры на осколочный спектр при моделировании взрывного разрушения толстостенных цилиндрических оболочек // Труды ТГУ. Серия физико-математическая / под ред. М.Ю. Орлова. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2018, т. 302. С. 204–211.
3. Lambert D.E., Weiderhold J., Osborn J., Hopson M.V. Explosively driven fragmentation experiments for continuum damage modeling // Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME, 2012, Vol. 134, Issue 3, 031209.
4. Diep Q.B., Moxnes J.F., Nevstad G. Fragmentation of projectiles and steel rings using 3D numerical simulations // Proc. 21th Int. Symp. on Ballistics, 19–23 April 2004, Adelaide, Australia, 2004. Pp. 752.
5. Elek P., Jaramaz S. Modeling of fragmentation of rapidly expanding cylinders // Theoretical and Applied Mechanics, 2005, Vol. 32, Issue 2. Pp. 113–130.
6. Meyer H.W., Brannon R.M. A model for statistical variation of fracture properties in a continuum mechanics code // International Journal of Impact Engineering, 2012, 42. Pp. 48–58.
7. James G. Rasico, Craig A. Newman, Morten Rikard Jensen. Modeling fragmentation of a 155mm artillery shell IED in a buried mine blast event // International Journal of Vehicle Performance, 2018 Vol. 4, No. 4. Pp. 323–346.

8. *Герасимов А.В., Пашков С.В.* Численное моделирование пробития слоистых преград // Механика композиционных материалов и конструкций, 2013, т. 19, №1. С. 49–62.

9. *Глазырин В.П., Орлов Ю.Н., Орлов М.Ю.* Деформирование и разрушение неоднородных ударников при взаимодействии с преградами // Известия вузов. Физика. 2014. Т. 57. №8/2. С. 104–109.

10. *Глазырин В.П., Орлов Ю.Н.* Моделирование процесса взаимодействия комбинированных ударников с преградами // Известия вузов. Физика. 2011. Т. 54. №10/2. С. 141–145.

References

1. *Naimark O.B., Uvarov S.V., Davydova M.M., Bannikova I.A.* Multiscale statistical laws of dynamic Fragmentation // Physical Mesomechanics, 2017, Vol. 20, Issue 1. Pp. 90–101.

2. *Pashkov S.V.* Effect of material structure defects distribution on the fragmentation spectrum in the simulation of explosive destruction of thick-walled cylindrical shells // Proceedings of Tomsk state University. Tomsk: Tomsk State University, 2018, Vol. 302. Pp. 204–211.

3. *Lambert D.E., Weiderhold J., Osborn J., Hopson M.V.* Explosively driven fragmentation experiments for continuum damage modeling // Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME, 2012, Vol. 134, Issue 3, 031209.

4. *Diep Q.B., Moxnes J.F., Nevstad G.* Fragmentation of projectiles and steel rings using 3D numerical simulations // Proc. 21th Int. Symp. on Ballistics, 19–23 April 2004, Adelaide, Australia, 2004. 752 p.

5. *Elek P., Jaramaz S.* Modeling of fragmentation of rapidly expanding cylinders // Theoretical and Applied Mechanics, 2005, Vol. 32, Issue 2. Pp. 113–130.

6. *Meyer H.W., Brannon R.M.* A model for statistical variation of fracture properties in a continuum mechanics code // International Journal of Impact Engineering, 2012, 42. Pp. 48–58.

7. *James G. Rasico, Craig A. Newman, Morten Rikard Jensen.* Modeling fragmentation of a 155mm artillery shell IED in a buried mine blast event // International Journal of Vehicle Performance, 2018 Vol. 4. No.4. Pp. 323–346.

8. *Gerasimov A.V., Pashkov S.V.* Numerical simulation of the perforation of layered barriers // Composites: Mechanics, Computations, Applications, An International Journal, 2013. Vol. 4, Issue.2, Pp. 97–111.

9. *Glazyrin V.P., Orlov Yu.N., Orlov M.Yu.* Деформирование и разрушение неоднородных ударников при взаимодействии с преградами // Известия вузов. Физика. 2014. Vol. 57. № 8/2. S. 104–109.

10. *Glazyrin V.P., Orlov Yu.N.* Моделирование процесса взаимодействия комбинированных ударников с преградами // Известия вузов. Физика. 2011. Vol. 54. №10/2. S. 141–145.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ МОДЕЛИ В РАБОЧЕЙ ЧАСТИ ИМПУЛЬСНОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

¹ Н.П. Скибина, ¹ Н.В. Савкина, ¹ В.В. Фарапонов, ² Е.А. Маслов

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет

uss.skibina@gmail.com

Ключевые слова: аэродинамика, вычислительная гидродинамика, коэффициент лобового сопротивления, импульсная аэродинамическая установка.

Аннотация. Цель данной работы заключается в математическом моделировании процесса сверхзвукового обтекания модели в рабочей части импульсной аэродинамической установки потоком воздуха со скоростью $M = (2 \div 5)$. Исследуемые модели представляют клин и конус с углом полураствора 15° , но при этом структура течений вблизи тел различна. Выбор геометрии обусловлен тем, что ранее для данных моделей были проведены серии экспериментальных исследований.

Задача высокоскоростного обтекания модели решалась с использованием вычислительной среды Ansys Fluent. Математическое описание процесса осуществлялось системой осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, в качестве модели турбулентности выбрана модель сдвиговых напряжений Ментера.

Рассогласование экспериментальных данных и результатов расчета по величине скорости потока составило 3%. Качественное сравнение кадров визуализации обтекания с полями распределения газодинамических величин, полученных в ходе расчета, показало хорошее совпадение результатов физического и математического моделирования.

NUMERICAL ANALYSIS OF GASDYNAMIC PARAMETERS OF SUPERSONIC FLOW AROUND MODEL IN EXPERIMENT CHAMBER OF AERODYNAMIC WIND TUNNEL

¹ N.P. Skibina, ¹ N.V. Savkina, ¹ V.V. Faraponov, ² E.A. Maslov

¹National Research Tomsk State University, Russian Federation

²National Research Tomsk Polytechnic University, Russian Federation

uss.skibina@gmail.com

Keywords: aerodynamic; computational fluid dynamics; aerodynamic drag coefficient; pulsed wind tunnel.

Abstract. The main purpose of this article is the mathematical modeling of the supersonic flow around model in experimental chamber of pulsed aerodynamic wind tunnel. Airflow rate in Mach number varied in range $M = (2 \div 5)$. The trial models represent a wedge and a cone with half angle of 15° , but flow has differently structure around bodies. The choice of bodies' geometry due a series of experiments that carried out for these models earlier.

The problem of high-speed flow the model solved using the Ansys Fluent computing environment. The mathematical description of the process carried out by a system of Reynolds-averaged Navier–Stokes equations, the Menter shear stress model was chosen as the turbulence model.

The discrepancy between the experimental data and the results of the calculation by the magnitude of the flow velocity was 3%. A qualitative comparison of the frames of visualization of the flow around the fields of distribution of gas-dynamic quantities obtained during the calculation showed a close agreement between the results of physical and mathematical modeling.

В настоящее время ведется интенсивная работа по созданию высокоскоростных летательных аппаратов военного и гражданского назначения, что в свою очередь приводит к необходимости изучения аэродинамики, тепломассообмена и механики полета на больших скоростях. Актуальность исследований подтверждается выполняемыми исследовательскими программами и опытно-конструкторскими работами, реализуемыми на территории Европы, США, Японии, Индии и Российской Федерации [1, 2].

Одной из главных задач наземных испытаний летательных аппаратов и их частей является воспроизведение реальных атмосферных и близких к ним условий эксперимента при исследовании аэродинамических характеристик моделей. Использование теории подобия физических процессов и явлений позволяет моделировать различные эффекты, например, вязкости (подобие по числу Рейнольдса) и сжимаемости (подобие течений по числу Маха).

Импульсная аэродинамическая установка [3, 4] используется для проведения различных экспериментальных исследований в высокоскоростных потоках со скоростями потока в числах Маха $M=(2\div 7)$. Основными достоинствами данной установки являются ее надежность, широкий диапазон режимов работы, низкие расходы сжатого газа и электроэнергии.

Проведение измерений в сверхзвуковых и гиперзвуковых потоках – трудоемкий процесс, организация и проведение которого требуют учета различных аспектов. Регистрирующие приборы могут вносить возмущения в поток и искажать картину течения, провоцировать возникновение отрывных течений и высоких градиентов давления. В данном случае математическое моделирование является менее ресурсозатратным способом исследований, позволяющим получать информацию о распределении газодинамических величин для любой интересующей части потока. Результаты экспериментального исследования при этом являются критерием оценки адекватности используемого подхода: в ходе сравнения результатов математического моделирования и данных, полученных опытным путем, можно судить о достоверности результатов комплексного физико-математического моделирования.

Целью настоящей работы является математическое моделирование процесса обтекания тела, установленного в рабочей части ударной аэродина-

мической трубы, потоком воздуха при числах Маха $M=(2 \div 5)$. В качестве моделей выбраны клин и конус [5]. Выбор геометрии обусловлен тем, что ранее для данных моделей были экспериментально изучены аэродинамические характеристики [6, 7] и получена информация о газодинамических параметрах обтекания тел. Модели имеют одинаковое сечение с углом полураствора 15 градусов, при этом необходимо отметить, что структура течения вблизи тел различна.

Методом конечных элементов, реализованным в вычислительной среде Ansys Fluent, осуществлялось решение системы осредненных уравнений Навье–Стокса в декартовых координатах [8, 9]. Для моделирования эффектов турбулентности была использована SST модель [10]. Расчетная сетка структурирована, состояла из гексагональных элементов со сгущением по мере приближения к поверхности исследуемой модели, что позволяет получить хорошее разрешение течения в пограничном слое.

Относительная погрешность результатов численного расчета и результатов эксперимента составила не более 3%. Качественное сравнение картин обтекания, полученных экспериментально – фрагменты видеосъемки процесса высокоскоростной видеокамерой, и полей распределения рассчитанных газодинамических параметров показало хорошее согласование математического и физического моделирования.

В ходе работы разработана методика численного расчета, позволяющая получать значения аэродинамических характеристик моделей и термогазодинамических параметров обтекания тел в рабочей части при заданной скорости набегающего потока. База данных, сформированная в ходе физического и математического моделирования [4], позволяет изучать аэродинамику тел более сложной формы и моделировать их обтекание сверхзвуковыми и гиперзвуковыми потоками.

Таким образом, сочетание результатов численных расчетов и экспериментальных данных, используемых для задания начальных и граничных условий, позволяет получать достоверные данные об аэродинамических и термогазодинамических параметрах – скорости, давлении, температуре и плотности по всей области рабочей части аэродинамической установки.

Литература

1. Железнякова А.Л., Суржиков С.Т. Численное моделирование гиперзвукового обтекания модели летательного аппарата Х-43 // Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Машиностроение». 2010. №. 1.
2. Румынский А.Н., Чуркин В.П. Обтекание затупленных тел гиперзвуковым потоком вязкого излучающего газа // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1974. Т. 14. №. 6. С. 1553–1570.
3. Звегинцев В.И. Газодинамические установки кратковременного действия. Ч. I. Установки для научных исследований. Новосибирск: Параллель, 2014. 551 с.
4. Маслов Е.А., Жарова И.К., Фарапонов В.В., Мацкевич В.В., Чижев С.Ю. Физическое моделирование обтекания тел плоской и осесимметричной формы сверхзвуковым

потоком // Труды Томского государственного университета. Т. 298. Серия физико-математическая: Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики / под ред. М.Ю. Орлова. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2016. С. 84–88. DOI: 10.17223/9785751124199/17

5. *Фараонов В.В., Маслов Е.А., Чупашев А.В., Мацкевич В.В., Чижов С.Ю.* Экспериментальное исследование обтекания тел плоской и осесимметричной формы // *Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: сб. трудов IX всероссийской научной конференции, 21–25 сентября 2016 года, г. Томск.* Томск: Томский государственный университет, 2016. С. 144–145.

6. *Артонкин В.Г., Леутин П.Г., Петров К.П. и др.* Аэродинамические характеристики острых и притупленных конусов при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях // *Тр. ЦАГИ.* 1972. Вып. 1413. 92 с.

7. *Шелудько Ю.В.* Измерение донного давления осесимметричных тел малого удлинения // *Физико-газодинамические баллистические исследования / под ред. Г.И. Мишина.* Л.: Наука, 1980. С. 68–77.

8. *Скибина Н.П., Савкина Н.В., Фараонов В.В.* Численное моделирование обтекания цилиндрического тела сверхзвуковым потоком // *Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики (ФППСМ-2016): сб. трудов IX всероссийской научной конференции, 21–25 сентября 2016 года, г. Томск.* Томск: Томский государственный университет, 2016. С. 151–153.

9. *Скибина Н.П., Савкина Н.В., Фараонов В.В.* Математическое моделирование газодинамических параметров потока в импульсной аэродинамической установке и численный расчет аэродинамических характеристик при обтекании тела в рабочей части: сб. трудов X всероссийской научной конференции, 3–5 сентября 2018 года, Томск. Томск: Томский государственный университет, 2018. С. 83–85.

10. *Снегурёв А.Ю.* Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: учеб. пособ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 143 с.

References

1. *Zheleznyakova A.L., Supzhikov S.T.* Chislennoe modelirovanie giperzvukovogo obtekaniya modeli letatel'nogo apparata X-43 // *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. Baumana. Seriya «Mashinostroenie».* 2010. №. 1.

2. *Rumynskij A.N., Churkin V.P.* Obtekanie zatuplennykh tel giperzvukovym potokom vyzkogo izluchayushhego gaza // *Zhurnal vychislitel'noj matematiki i matematicheskoy fiziki.* 1974. T. 14. №. 6. S. 1553–1570.

3. *Zvegintsev V.I.* Gas dynamic installation of short duration. Part I. Installations for scientific research. Novosibirsk: Parallel, 2014. 551 s.

4. *Maslov E.A., Zharova I.K., Faraponov V.V., Matskevich V.V., Chizhov S.Yu.* Fizicheskoe modelirovanie obtekaniya tel ploskoj i osesimmetrichnoj formy sverkhzvukovym potokom // *Trudy Tomskogo gosudarstvennogo universiteta.* T. 298. Seriya fiziko-matematicheskaya: Aktual'nye problemy sovremennoj mekhaniki sploshnykh sred i nebesnoj mekhaniki / pod red. M.Yu. Orlova. Tomsk: Izd-vo Tom. un-ta, 2016. 136s. S. 84–88. DOI: 10.17223/9785751124199/17

5. *Faraponov V.V., Maslov E.A., Chupashev A.V., Matskevich V.V., Chizhov S.Yu.* Eksperimental'noe issledovanie obtekaniya tel ploskoj i osesimmetrichnoj formy // *Fundamental'nye i prikladnye problemy sovremennoj mekhaniki: Sbornik trudov IX vserossijskoj nauchnoj konferentsii, 21-25 sentyabrya 2016 goda, g. Tomsk.* Tomsk: Tomskij gosudarstvennyj universitet, 2016. S. 144–145.

6. *Artonkin V.G., Leutin P.G., Petrov K.P. i dr.* Aehrodinamicheskie kharakteristiki ostrykh i prituplennykh konusov pri dozvukovykh i sverkhzvukovykh skorostyakh // Tr. TSAGI, 1972. No.1413, 92 s.

7. *Shelud'ko Yu.V.* Izmerenie donnogo davleniya osesimmetrichnykh tel malogo udlineniya // Fiziko-gazodinamicheskie ballisticheskie issledovaniya / pod red. G.I. Mishina. L.: Nauka, 1980. S. 68–77.

8. *Skibina N.P., Savkina N.V., Faraponov V.V.* (2016) Chislennoe modelirovanie obtekaniya cilindricheskogo tela sverkhzvukovym potokom// Fundamental'nye i prikladnye problemy sovremennoj mekhaniki (FPPSM-2016): Sbornik trudov IX vserossijskoj nauchnoj konferencii 21–25 sentyabrya 2016 goda, g. Tomsk. Tomsk: Tomskij gosudarstvennyj universitet. Pp. 151–153.

9. *Skibina N.P., Savkina N.V., Faraponov V.V.* (2018) Matematicheskoe modelirovanie gazodinamicheskikh processov v impul'snoj aerodinamicheskoy ustanovke i chislennyj raschet nekotoryh parametrov obtekaniya tela, zakreplennogo v rabochej chasti // Fundamental'nye i prikladnye problemy sovremennoj mekhaniki (FPPSM-2018): Sbornik trudov X vserossijskoj nauchnoj konferencii 3–5 sentyabrya 2018 goda, g. Tomsk. Tomsk: Tomskij gosudarstvennyj universitet. Pp. 83–85.

10. *Snegiryov A.Yu.* Vysokoproizvoditel'nye vychisleniya v tekhnicheskoy fizike. Chislennoe modelirovanie turbulentnykh techenij. Proc. benefit SPb.: Publishing house Polytechnic University, 2009. 143 p.

Секция 1

Взрывные, детонационные процессы и свойства вещества при высокоэнергетических воздействиях

Со-Председатели:

к.ф.-м.н. Орлов М.Ю.

к.ф.-м.н. Ящук А.А.

Детонация,
Кумуляция,
Взрыв и взрывчатые вещества,
Энергетические материалы,
Наночастицы,
Температура,
Масс-спектрометрия,
Биопокрытия

Session 1

Explosion and detonation processes and properties of matter under high energy impacts

Co-Chairs

Ph.D. Maxim Orlov
Ph.D. Alexey Yaschuk

Detonation,
Cumulation,
Explosion and Explosive substances,
Energy-related materials,
Metal nanoparticles,
Temperature,
Mass spectrometry,
Biocoatings

ДВУХФОТОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ НЕОДИМОВОГО ЛАЗЕРА ПРЕССОВАННЫМИ ТАБЛЕТКАМИ ПЕНТАЭРИТРИТТЕТРАНИТРАТА

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

Кемеровский государственный университет, Россия
hipnose_4u@mail.ru

Ключевые слова: взрывное разложение, лазерное инициирование, PETN, наночастицы меди, математическое моделирование.

Аннотация. В работе модель инициирования теплового взрыва PETN с наночастицами металлов адаптирована для расчета закономерностей инициирования взрывного разложения прессованных таблеток PETN без светопоглощающих добавок. Показано, что энергии кванта второй гармоники неодимового лазера достаточно для реализации механизма двухфотонного поглощения. Рассчитанная критическая плотность энергии инициирования в данном случае составила 16.2 Дж/см^2 , что количественно соответствует величине, полученной ранее экспериментально.

TWO-PHOTON ABSORPTION OF SECOND HARMONIC OF NEODYMIUM LASER BY PRESSED PILLET PENTAERYTHRITE TETRANITRATE

M.V. Ananyeva, V.V. Galkina, N.V. Gazenaur

Kemerovo State University, Russia Federation
hipnose_4u@mail.ru

Keywords: explosive decomposition, laser initiation, PETN, copper nanoparticles, mathematical modeling.

Abstract. Model of initiation of explosion decomposition of PETN containing metal nanoparticles was adapted to calculate regularities of explosion decomposition of pure PETN pillet. It was shown that energy of the second harmonic quantum of neodymium laser is sufficient for realization of mechanism of two-photon absorption. Critical energy density of PETN pressed pillet explosion decomposition in this case is 16.2 J/cm^2 and quantitatively corresponds to the values obtained earlier experimentally.

Иницирование взрывного разложения вторичных взрывчатых веществ (ВВ) с добавками наночастиц металлов лазерным импульсом описывается моделью теплового взрыва в микроочаговом варианте. Для понимания влияния наночастиц металлов на закономерности взрывного разложения ВВ, инициированного лазерным импульсом, необходимо исследовать начальные стадии взрывного разложения чистых таблеток ВВ. Экспериментальное исследование таких процессов выполнены на прессованных

таблетках пентаэритриттетранитрата (PETN). Проведено сравнение закономерностей инициирования взрывного разложения PETN импульсами основной и второй гармоник неодимового лазера. Показано, что при инициировании образцов импульсом второй гармоники неодимового лазера значение критической плотности энергии, соответствующей 50 % вероятности взрывного разложения, составляет 12.3 Дж/см^2 [1]. Авторами [2] показано, что значение критической плотности энергии PETN при инициировании основной гармоникой неодимового лазера более 100 Дж/см^2 , проведено исследование температурной зависимости пороговой плотности энергии инициирования, кристаллизованного PETN, аппроксимация при комнатной температуре также дает значение критической плотности энергии инициирования около 100 Дж/см^2 [2]. Таким образом, критерий инициирования PETN существенно зависит от длины волны лазера, снижаясь при переходе от основного ко второй гармонике неодимового лазера более чем в 8 раз. В работе [3] исследованы оптические свойства прессованных таблеток PETN на длине волны второй гармоники неодимового лазера. При увеличении плотности энергии импульса наблюдалось существенное нелинейное поглощение, наиболее вероятным механизмом которого является двухфотонное поглощение излучения.

Целью работы является моделирование закономерностей инициирования PETN импульсами основной и второй гармоник неодимового лазера, сравнение с экспериментом и вывод о механизмах инициирования взрывного разложения и поглощения энергии импульса.

В работе процесс разложения PETN рассмотрен с позиции модели теплового взрыва. Модель учитывает нагревание образца лазерным излучением, кондуктивный теплоперенос и реакцию экзотермического разложения энергетического материала. Физико-химические параметры модели заимствованы из микроочаговой модели теплового взрыва [3]. Численное решение уравнений модели выполнялось на сетке с переменным шагом по координате [3]. Полученная система обыкновенных дифференциальных уравнений решалась методом Рунге–Кутты 1–5 порядка с переменным шагом по времени [4].

Проведен расчет критической плотности энергии инициирования взрывчатого разложения PETN импульсами основной и второй гармоник неодимового лазера при индукционном периоде 0.01 с. Моделирование закономерностей инициирования взрывного разложения импульсом основной гармоники неодимового лазера приводит к значениям критической плотности энергии более 100 Дж/см^2 . Энергия кванта второй гармоники неодимового лазера составляет 2.34 эВ и менее чем в 2 раза меньше ширины запрещенной зоны PETN (3.5 эВ). Следовательно, есть возможности для реализации механизма двухфотонного поглощения излучения второй гармоники неодимового лазера прессованными таблетками PETN [5].

Оценена критическая плотность энергии инициирования взрывного разложения прессованных таблеток РЕТН в режиме двухфотонного поглощения. Полученное значение критической плотности энергии составило 16.2 Дж/см^2 . Максимальная температура на момент окончания импульса наблюдается на поверхности образца, и при критической плотности энергии ее значение составляет 657 К.

Для иллюстрации процесса образования очага реакции рассчитаны распределения температуры в приповерхностном слое вещества при 10% превышении пороговой плотности энергии в моменты времени 20, 100, 200, 300, 400, 405 и 408 нс. Образование очага реакции разложения происходит на облучаемой поверхности. Экспериментальная величина плотности энергии инициирования составляет 12.3 Дж/см^2 [1] и достаточно близка к оцененной теоретически.

Литература

1. Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Лисков И. Ю., Каленский А.В., Ананьева М.В., Звеков А.А. Закономерности инициирования взрывчатого разложения ТЭНа импульсным излучением второй гармоники неодимового лазера // Химическая физика. 2015. Т. 34, № 11. С. 44–49.

2. Aluker E.D., Krechetov A.G., Mitrofanov A.Y., Tupitsyn A.V., Aluker N.L., Belokurov G.M., Nurmukhametov D.R. Laser initiation of PETN / *Energetic Materials: Chemistry, Hazards and Environmental Aspects*, 2011. Pp. 213–227.

3. Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Лисков И.Ю., Звеков А.А., Каленский А.В. Температурная зависимость порога инициирования композита тетранитропентаэритрит-алюминий второй гармоникой неодимового лазера // Химическая физика. 2015. Т. 34, № 7. С. 54–57.

4. Кригер В.Г., Каленский А.В., Звеков А.А., Зыков И.Ю., Никитин А.П. Процессы теплопереноса при лазерном разогреве включений в инертной матрице // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20. № 3. С. 375–382.

5. Medvedev V.V., Forat E.V., Tsipilev V.P., Yakovlev A.N. The effect of aluminum particles dispersity on characteristics of ammonium perchlorate – aluminum composition laser ignition // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Т. 830. № 1. С. 012146.

References

1. Aduiev B.P., Nurmukhametov D.R., Liskov I.Yu., Kalenskii A.V., Anan'eva M.V., Zvekov A.A. Characteristics of the initiation of the explosive decomposition of PETN by the second-harmonic pulsed radiation of a neodymium laser // *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2015, Vol. 9, No. 6. Pp. 914–918.

2. Aluker E.D., Krechetov A.G., Mitrofanov A.Y., Tupitsyn A.V., Aluker N.L., Belokurov G.M., Nurmukhametov D.R. Laser initiation of PETN / *Energetic Materials: Chemistry, Hazards and Environmental Aspects*, 2011. Pp. 213–227.

3. Aduiev B.P., Nurmukhametov D.R., Liskov I.Yu., Zvekov A.A., Kalenskii A.V. Temperature dependence of the threshold of initiation of pentaerythritol tetranitrate–aluminum composite by second-harmonic radiation of a neodymium laser // *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2015. Vol. 9. No. 4. Pp. 644–647.

4. Kriger V.G., Kalenskii A.V., Zvekov A.A., Zykov, I.Yu. Nikitin A.P. Heat-transfer processes upon laser heating of inert-matrix-hosted inclusions // Thermophysics and Aeromechanics. 2013. Vol. 20. No. 3. Pp. 367–374.

5. Medvedev V.V., Forat E.V., Tsipilev V.P., Yakovlev A.N. The effect of aluminum particles dispersity on characteristics of ammonium perchlorate – aluminum composition laser ignition // Journal of Physics: Conference Series. 2017. T. 830. № 1. P. 012146.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ ЧАСТИЦ ПРИ ГОРЕНИИ МОНОЛИТНЫХ ЧАСТИЦ ТИТАНА

Н.С. Белоусова, О.Г. Глотов, А.В. Гуськов

Новосибирский государственный технический университет, Россия
nata.bel.94@mail.ru

Ключевые слова: частица титана, горение в воздухе, движение частиц, «жизненный цикл» частицы.

Аннотация. Разработана методика создания крупных горящих монолитных частиц титана диаметром 250–500 мкм. Исследованы траектории свободного падения частиц при горении их в воздухе. Посредством видеосъёмки определены характерные времена начала фрагментации, окончания фрагментации, окончания горения, закономерности движения частиц, в частности их скорость и координата в момент начала фрагментации.

STUDY OF THE FREE FALLING PARTICLES TRAJECTORY AT THE BURNING MONOLITHIC TITANIUM PARTICLES

N.S. Belousova, O.G. Glotov, A.V. Guskov

Novosibirsk State Technical University, Russian Federation
E-mail: nata.bel.94@mail.ru

Keywords: Titanium particle; combustion in air; particle motion, particles of "life cycle".

Abstract. The technique for producing the large titanium monolithic burning particles with a diameter of 250–500 microns is developed. The free-fall trajectories of particles during the combustion of their air are investigated. The characteristic times for the following events – beginning of fragmentation, end of fragmentation, end of burning, as well as the particle's motion law (including the coordinate and the velocity at the moment when the fragmentation process starts) are defined using the video recording.

Титан является одним из распространенных конструкционных материалов. С одной точки зрения, Ti – конструкционный материал, применяемый в экстремальных условиях (в изделиях ракетно-космической и авиационной техники [1], т.п.). С другой, Ti – пирофорное металлическое горючее. В этом качестве Ti применяется в составе пиротехнических композиций [2]

и в композициях технологического горения [3]. Из-за двойного применения Ti, как конструкционного материала и металлического горючего, исследования воспламенения и горения Ti проводятся и на массивных образцах и на микрочастицах.

В экспериментах используется образец, представляющий собой полосу безметальной матрицы с внедрёнными включениями, нанесённую на кварцевую трубку диаметром 12 мм, которая играет роль держателя образца. Размеры матрицы W×L×H примерно 3×30×2 мм. В матрице сделаны глухие отверстия диаметром 1.2 мм, глубиной около 1 мм, в которых фиксируются титановые фрагменты. В волне горения матрицы каждый фрагмент превращается в горящую частицу-агломерат. Масса, состав и структура агломератов определены рецептурой и размером включений. Дальнейшее горение частиц происходит в воздухе [4, 5].

В процессе исследования были получены траекторные измерения частиц в свободном падении, такие, как скорость и координата частицы в соответствующие моменты времени, регистрировались характерные события: начало фрагментации, конец фрагментации и конец горения.

«Жизненный цикл», типичный для крупных (250–500 мкм) частиц был продемонстрирован. Этот рисунок собран из фрагментов кадров видеозаписи посредством технологии вырезать – вставить. Был представлен весь трек частицы от ее выхода из образца (событие 0) до «исчезновения» (событие b).

Общая картина поведения частиц Ti при горении. Количественные данные о наступлении событий bf, ef, b.

События bf и ef есть начало и конец фрагментации, соответственно.

Фрагментации происходит по типу “еловая ветвь”, и на видно, что между метками событий bf и ef трек частицы «лохматый» из-за отстрела мелких фрагментов. Вертикальный отрезок «50 см» определяет масштаб изображения, длина трека более 2 м. Горизонтальные линии слева от трека соответствуют границами участков трека, принадлежащим отдельным кадрам, т.е. они делят трек на участки, которые частица пролетала за 1/25 с.

Отметим некоторые наблюдаемые особенности:

– до начала фрагментации (выше точки bf) частица падает вертикально, фрагментация вызывает небольшие возмущения ее движения (отклонение траектории от прямолинейной);

– после окончания фрагментации (ниже точки ef) скорость частицы заметно снижается. Трек частицы постепенно сужается и тускнеет и ниже точки b частицу уже не видно. Точка b – конец горения.

Получены данные о траекторных измерениях монолитных материнских частиц титана диаметром 300–500 мкм в свободном падении. В дальнейшем совокупность этих данных будет использована для определения коэффициента аэродинамического сопротивления горящих частиц.

Литература

1. *Зубков Л.Б.* Космический металл. Все о титане. М.: Наука, 1987. 129 с.
2. *Шидловский А.А.* Основы пиротехники. М.: Машиностроение, 1973. 280 с.
3. *Мержанов А.Г., Сычев А.Е.* О самораспространяющемся высокотемпературном синтезе. <http://www.ism.ac.ru/handbook/shsfr.htm>
4. *Evgeny Shafirovich, Soon Kay Teoh, Arvind Varma.* Combustion of levitated titanium particles in air // *Combustion and Flame*. 2008. Vol. 152. P. 262–271.
5. *Белюсова Н.С., Глотов О.Г., Гуськов А.В.* Экспериментальное исследование особенностей горения монолитных частиц титана // *Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии // Тезисы докладов XII Всероссийской конференции молодых ученых / под ред. В.В. Козлова.* 2018. С. 14–15.

References

1. *Zubkov L.B.* Space metal. All about the titan. M.: Science, 1987. 129 p.
2. *Shidlovsky A.A.* Basics of pyrotechnics. Moscow: Mechanical Engineering, 1973. 280 p.
3. *Merzhanov A.G., Sychev A.E.* On self-propagating high-temperature synthesis. <http://www.ism.ac.ru/handbook/shsfr.htm>
4. *Evgeny Shafirovich, Soon Kay Teoh, Arvind Varma.* Combustion of levitated titanium particles in air // *Combustion and Flame*. 2008. Vol. 152. Pp. 262–271.
5. *Belousova N.S., Glotov O.G., Guskov A.V.* Experimental study of the characteristics of the combustion of monolithic titanium particles // *Problems of Mechanics: Theory, Experiment and New Technologies Abstracts of reports of the XII All-Russian Conference of Young Scientists / Edited by V.V. Kozlov.* 2018. Pp. 14–15.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ЗАЩИТНЫХ СТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

А.Ю. Будаев, А.И. Дульнев

ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Россия
alexandrbugdaev21@gmail.com

Ключевые слова: сферический ударник, баллистическая стойкость, керамика, сверхвысокомолекулярный полиэтилен.

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных оценок баллистической стойкости защитных структур, в составе которых использовался сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ). Дана оценка стойкости образцов с СВМПЭ по сравнению с другими защитными структурами, применяемыми в кораблестроении. Показано, что применение СВМПЭ в составе конструкций защиты, может обеспечить существенное повышение их баллистической эффективности.

EXPERIMENTAL BALLISTIC RESISTANCE EVALUATION OF PROTECTIVE STRUCTURES USING ULTRA HIGH MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE

Alexander Yu. Budaev and Andrei Iv. Dulnev

Krylov State Research Centre, Russia
alexandrbudaev21@gmail.com

Keywords: spherical striker, ballistic resistance, ceramics, ultra high molecular weight polyethylene.

Abstract. The paper presents results of experimental ballistic resistance evaluations of protective structures using ultra high molecular weight polyethylene (UHMW-PE). Ballistic resistance of UHMW-PE samples is compared with other protective structures used in ship-building. It is shown that UHMW-PE can significantly increase the efficiency of ballistic protection structures.

Одним из направлений повышения баллистических характеристик защитных структур является применение новых современных материалов, в том числе в составе композитов. К таким материалам, в частности, относятся сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ). Для оценки баллистической эффективности СВМПЭ в составе композитов проведены испытания образцов на воздействие ударников сферической формы в диапазоне скоростей 1200÷2000 м/с. Испытания проводились на баллистическом стенде ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Пластины СВМПЭ были изготовлены из импортных перекрестно-армированных материалов (плотность СВМПЭ – 900 кг/м³).

Испытаниям были подвергнуты керамикосодержащие образцы с опорным слоем из СВМПЭ и образцы, состоящие из СВМПЭ и стали 10ХСНД в различных сочетаниях. Пластины СВМПЭ в различных сочетаниях со сталью испытывались в двух вариантах. В одном варианте пластины СВМПЭ использовались в качестве тыльного слоя, в другом – как средний слой, плотно зафиксированный между двумя стальными пластинами. Испытанные образцы имели следующие характеристики:

1. Образцы типа керамика + СВМПЭ.

Толщина керамической плитки – 10 мм. Поверхностная плотность – 38,7 кг/м². Толщина опорного слоя из СВМПЭ – 22 мм. Поверхностная плотность 19,8 кг/м². Суммарная поверхностная плотность образцов – 58,5 кг/м².

2. Образцы типа сталь+СВМПЭ:

а) толщина стального слоя – 4 мм, СВМПЭ – 21 мм, суммарная поверхностная плотность – 50 кг/м²;

б) толщина стального слоя – 4 мм, СВМПЭ – 42 мм (2×21 мм), суммарная поверхностная плотность – 69 кг/м²;

в) толщина стального слоя – 7,5 мм, СВМПЭ – 42 мм (2×21 мм), суммарная поверхностная плотность – 97 кг/м².

3. Образцы типа сталь+СВМПЭ+сталь:

а) толщина лицевого и тыльного слоя стали – 4 мм, средний слой СВМПЭ – 21 мм, суммарная поверхностная плотность образцов – 82 кг/м²;

б) толщина лицевого и тыльного слоя стали – 4 мм, средний слой СВМПЭ – 42 мм (2×21 мм), суммарная поверхностная плотность образцов – 101 кг/м².

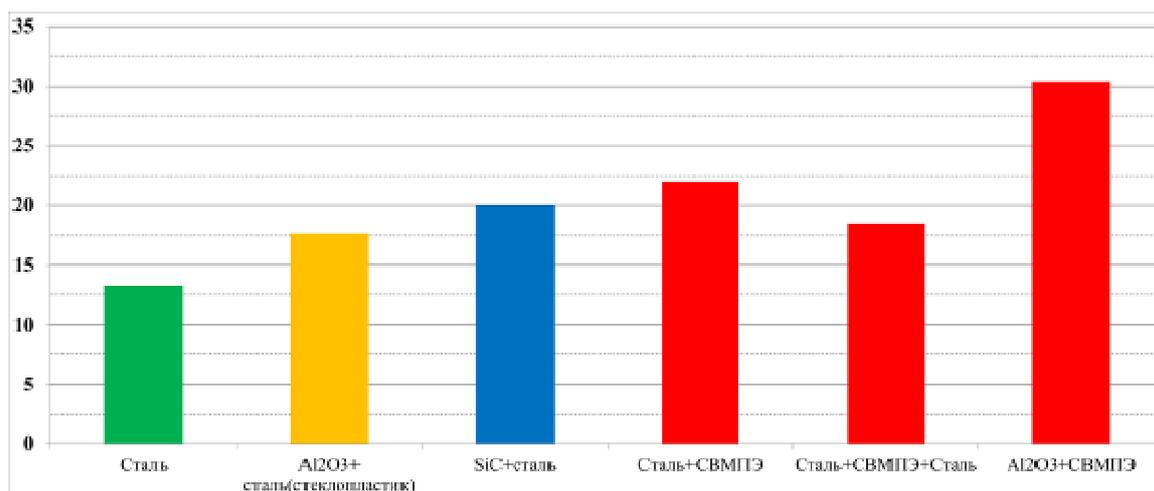


Рис 1. Сравнение результатов испытаний образцов с СВМПЭ и других защитных структур, применяемых в кораблестроении

В качестве показателя для сравнительной оценки эффективности (по баллистической стойкости) образцов с СВМПЭ по сравнению с традиционными структурами защиты, применяемыми в кораблестроении, использовалось отношение предельной скорости пробития V_{50} к поверхностной плотности образца M_{surf} ($B_{eff} = V_{50}/M_{surf}$).

На рис. 1 представлена сравнительная диаграмма эффективности образцов с применением СВМПЭ и традиционных защитных структур, для которых приведены осредненные по результатам многочисленных опытов значения показателя B_{eff} .

Анализ результатов испытаний показал следующее:

Применение СВМПЭ в качестве опорного слоя для керамических плиток значительно повышает эффективность защитной структуры по сравнению с аналогичными образцами с опорным слоем из стали и стеклопластика.

В сочетании со сталью наибольшей эффективностью обладают образцы, в которых пластины СВМПЭ располагаются с тыльной стороны. При этом показатель эффективности B_{eff} этих образцов получился выше, чем для керамикосодержащих структур с традиционным опорным слоем из стали или стеклопластика. Однако этот результат, возможно, обусловлен условиями

испытаний, при которых в процессе деформирования (выпучивания) пластин СВМПЭ имело место значительная утяжка их краев.

Проведенные испытания показали, что применение СВМПЭ в составе конструкций защиты, может обеспечить существенное повышение их баллистической эффективности.

ВЗРЫВНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ PETN, СЕНСИБИЛИЗИРОВАННОГО НАНОЧАСТИЦАМИ МЕДИ И ОКСИДА МЕДИ

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

Кемеровский государственный университет, Россия
grimm_veragalkina@inbox.ru

Ключевые слова: оптические характеристики, наночастицы, кобальт, композитные материалы.

Аннотация. В работе проведено сравнительное исследование взрывной чувствительности композита на основе вторичного взрывчатого вещества (прозрачная матрица) и наночастиц меди и оксида меди. Микроочаговая модель инициирования взрывного разложения композитов на основе PETN адаптирована для исследования образцов с наночастицами двухвалентного оксида меди. Рассмотрены оптические свойства наночастиц меди и ее оксида, рассчитаны зависимости факторов эффективности поглощения наночастиц от радиуса вблизи длины волны второй гармоники неодимового лазера. Рассчитаны критические плотности энергии инициирования взрывного разложения исследуемых композитов импульсом лазера длительностью на полувысоте 20 нс. Показано, что в рамках базовой микроочаговой модели теплового взрыва без учета особенностей поглощения света наночастицами, критические плотности энергии практически совпадают. Сделан вывод о перспективности использования композитов на основе PETN с наночастицами оксида меди для создания капсулей оптических детонаторов на второй гармонике неодимового лазера.

EXPLOSIVE DECOMPOSITION OF PETN, SENSITIZED BY NANOPARTICLES OF COPPER OR COPPER OXIDE

V.V. Galkina, N.V. Gasenaur, M.V. Ananyeva

Kemerovo State University, Russia,
grimm_veragalkina@inbox.ru

Keywords: optical properties, nanoparticles, cobalt, composite materials.

Abstract. A comparative study of the explosive sensitivity of the composite based on a secondary explosive (transparent matrix) and copper and copper oxide nanoparticles was carried out. The micro-focal model of initiation of explosive decomposition of composites based on PETN is adapted for the study of samples with nanoparticles of bivalent copper oxide. The

optical properties of copper and its oxide nanoparticles are considered, and the dependences of the absorption efficiency of nanoparticles on the radius near the wavelength of the second harmonic of the neodymium laser are calculated. The critical energy densities of initiation of explosive decomposition of the studied composites by a laser pulse with a duration of 20 NS at half-height are calculated. It is shown that within the framework of the basic micro-focal model of thermal explosion without taking into account the features of light absorption by nanoparticles, the critical energy densities practically coincide. The conclusion about the prospects of using composites on the basis of PETN with nanoparticles of copper oxide to create the caps of the optical detonators on the second harmonic of a neodymium laser.

Разработка новых составов капсулей оптических детонаторов с оптимизацией комплекса его параметров необходима для создания конкурентоспособного оптического детонатора, способного вытеснить традиционно используемые для инициирования взрывного разложения электродетонаторы. Использование в детонаторе вторичного взрывчатого вещества (ВВ), например PETN, позволяет существенно уменьшить опасность несанкционированного взрыва, а сенсбилизация ВВ наночастицами металлов делает полученный композит чувствительным к лазерному импульсу на уровне 1 Дж/см^2 . В качестве сенсбилизующих наночастиц уже рассмотрены такие металлы, как алюминий, никель, кобальт и медь [1–3]. Наночастицы первых трех металлов хорошо поглощают излучение основной гармоники неодимового лазера (1064 нм) и могут использоваться для создания капсуля оптического детонатора на этой длине волны. Наночастицы меди в матрице PETN на длине волны второй гармоники неодимового лазера (532 нм) интенсивно поглощают свет по механизму плазмонного поглощения. Первичные эксперименты по инициированию взрывного разложения композитов PETN – наночастицы меди импульсом второй гармоники неодимового лазера показали низкие пороги инициирования взрывного разложения. Использование наночастиц меди в качестве светопоглощающих наночастиц существенно ограничивается их повышенной активностью к окислению, поэтому необходимо рассмотреть возможность использования инертных наночастиц оксидов меди.

Целью настоящей работы является выяснение перспектив использования наночастиц меди и его оксидов для очувствления PETN.

Актуальность работы определяется возможностью снижения вероятности техногенных катастроф при проведении взрывных работ путем внедрения оптических детонаторов на основе вторичных взрывчатых веществ, сенсбилизированных наночастицами оксида меди.

Основным параметром, определяющим оптические свойства наночастиц, является комплексный показатель преломления. На второй гармонике неодимового лазера он составил: для наночастиц меди $0.8644 - 2.4076i$ и оксида меди $2.5653 - 0.6222i$ [4]. Расчет факторов эффективности поглощения (Q_{abs}) наночастиц радиуса R в матрице PETN (показатель преломления 1.54) проведем в рамках теории Ми по методике [5]. Для длины вол-

ны 532 нм рассчитаны зависимости $Q_{abs}(R)$ наночастиц меди и ее оксида. При небольших радиусах наночастиц фактор эффективности поглощения увеличивается в соответствии с законом Рэлея, далее при радиусе R_{max} наблюдается максимальное значение Q_{abs} (Q_{abs_max}). Максимальные значения факторов эффективности составили: для наночастиц меди – 3.27 при радиусе 30.1 нм, наночастиц оксида меди – 1.5 при радиусе 160.8 нм.

На эффективность разогрева наночастиц и окружающей матрицы влияет не только значение фактора эффективности поглощения, но и значение освещенности внутри образца. Отражение от стенок образца и наночастиц приводит к повышению освещенности и результирующей температуры разогрева наночастиц. Методика оценки коэффициента повышения освещенности как отношения мощности энергии, проходящей через единичное сечение внутри образца, к мощности энергии иницирующего импульса на поверхности образца приведена в [5]. С произведением полученной величины и Q_{abs} связана эффективность взаимодействия света с наночастицей, приводящей к нагреванию как поглощающего включения, так и окружающей прозрачной матрицы.

Для расчета критических плотностей энергии адаптируем микроочаговую модель теплового взрыва для расчета композитов PETN с наночастицами оксида меди. Основные процессы, учитываемые в микроочаговой модели иницирования взрывного разложения: повышение температуры наночастицы и матрицы за счет поглощения лазерного импульса, остывание очага реакции за счет теплопроводности и выделение энергии в результате протекания химической реакции. Значение объемной теплоемкости оксида меди составило значение 3.4×10^6 Дж/(см³*К), незначительно отличаясь от параметра металла (меди). В то же время значения коэффициентов температуропроводности оксида меди и меди отличаются почти в пятьсот раз (0.003 см²/с и 1.28 см²/с). Апробация полученной программы осуществлялась на примере моделирования иницирования взрывного разложения композитов PETN – оксид меди с радиусом наночастицы 100 нм и длительностью импульса 20 нс. Значение критической плотности энергии иницирования композитов PETN – оксид меди составило 79.702 мДж/см². При значениях фактора эффективности поглощения равных 1 критические плотности энергии PETN с наночастицами меди и оксида меди практически совпадают. Построена зависимость распределения температуры в образце PETN – оксид меди при плотности энергии импульса 79.702 мДж/см² в разные моменты времени. Формирование очага реакции взрывного разложения начинается через 12 нс после максимума интенсивности импульса. При плотности энергии импульса 79.701 мДж/см² начальные зависимости распределения температуры в образце PETN – оксид меди совпадают с предыдущим случаем, но уменьшение температуры заканчивается остыванием очага до комнатной температуры без взрывного разложения. Оксиды меди могут являться перспектив-

ными добавками для создания состава капсуля оптического детонатора с не регрессирующими взрывными характеристиками.

Литература

1. *Medvedev V.V., Forat E.V., Tsipilev V.P., Yakovlev A.N.* The effect of aluminum particles dispersity on characteristics of ammonium perchlorate – aluminum composition laser ignition // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Т. 830. № 1. С. 012146.
2. *Aluker E.D., Krechetov A.G., Mitrofanov A.Y., Tupitsyn A.V., Aluker N.L., Belokurov G.M., Nurmukhametov D.R.* Laser initiation of PETN / *Energetic Materials: Chemistry, Hazards and Environmental Aspects*, 2011. Pp. 213–227.
3. *Myasnichenko V.S., Razavi M., Outokesh M., Sdobnyakov N.Y., Starostenkov M.D.* Molecular dynamic investigation of size-dependent surface energy of icosahedral copper nanoparticles at different temperature // *Letters on Materials*. 2016, Vol. 6. Issue 4. Pp. 266–270.
4. *Palik E.D.* Handbook of Optical Constants of Solids II // Academic Press, 1998. P. 1096.
5. *Каленский А.В., Звекон А.А., Никитин А.П., Ананьева М.В., Адуев Б.П.* Особенности плазмонного резонанса в наночастицах различных металлов // *Оптика и спектроскопия*. 2015. Т. 118, № 6. С. 1012–1021.

References

1. *Medvedev V.V., Forat E.V., Tsipilev V.P., Yakovlev A.N.* The effect of aluminum particles dispersity on characteristics of ammonium perchlorate – aluminum composition laser ignition // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Т. 830. № 1. С. 012146.
2. *Aluker E.D., Krechetov A.G., Mitrofanov A.Y., Tupitsyn A.V., Aluker N.L., Belokurov G.M., Nurmukhametov D.R.* Laser initiation of PETN / *Energetic Materials: Chemistry, Hazards and Environmental Aspects*, 2011. Pp. 213–227.
3. *Myasnichenko V.S., Razavi M., Outokesh M., Sdobnyakov N.Y., Starostenkov M.D.* Molecular dynamic investigation of size-dependent surface energy of icosahedral copper nanoparticles at different temperature // *Letters on Materials*. 2016, Vol. 6. Issue 4. Pp. 266–270.
4. *Palik E.D.* Handbook of Optical Constants of Solids II // Academic Press, 1998. P. 1096.
5. *Kalenskii A.V., Zvekov A.A., Nikitin A.P., Anan'eva M.V., Aduiev B.P.* Specific Features of Plasmon Resonance in Nanoparticles of Different Metals // *Optics and Spectroscopy*, 2015. Vol. 118, No. 6. Pp. 978–987.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПРОЗРАЧНОЙ МАТРИЦЫ И НАНОЧАСТИЦ КОБАЛЬТА

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

Кемеровский государственный университет, Россия
grimm_veragalkina@inbox.ru

Ключевые слова: наночастицы, кобальт, композитные материалы, моделирование.

Аннотация. В работе проведено моделирование и сравнение с экспериментом спектральных зависимостей оптических свойств композитов на основе бромида калия (прозрачная матрица) и наночастиц кобальта. Коэффициенты пропускания и отражения в спектральном диапазоне длин волн 400÷1200 нм определяются толщиной образца, радиусом наночастиц, их массовой концентрацией. Радиус наночастиц, соответствующий максимальному значению коэффициента эффективности поглощения, зависит от длины волны падающего излучения и в значительной степени определяет оптические свойства композитов с наночастицами кобальта. Полученные результаты позволяют прогнозировать спектральные зависимости оптических свойств композитов на основе прозрачной матрицы и наночастиц кобальта.

SIMULATION OF THE SPECTRAL REGULARITIES OF THE OPTICAL PROPERTIES OF COMPOSITES BASED ON TRANSPARENT MATRIX AND COBALT NANOPARTICLES

V.V. Galkina, N.V. Gazenaur, M.V. Ananyeva

Kemerovo State University, Russia,
grimm_veragalkina@inbox.ru

Keywords: nanoparticles, cobalt, composite materials, modeling.

Abstract. Mathematical simulation of the spectral regularities of the optical properties of composites based on potassium bromide (transparent matrix) and cobalt nanoparticles was made. The results were compared with the experimental data. Transmission and reflection factors in the spectral range 400÷1200 nm depend on the sample's thickness, nanoparticles' radii, and mass concentration. The radius of the nanoparticles corresponding to the maximum value of the absorption efficiency coefficient depends on the wavelength of the incident radiation and largely determines the optical properties of composites with cobalt nanoparticles. The obtained results allow to predict spectral regularities of the optical prosperities of the composites based on transparent matrix and cobalt nanoparticles.

Процесс взаимодействия металлических наночастиц с электромагнитным излучением описывается с помощью факторов эффективности поглощения (Q_{abs}) и рассеяния (Q_{sca}) света. В случае сферической частицы радиуса R Q_{abs} можно рассчитать в рамках теории Ми, как разность коэф-

фициентов эффективности экстинкции (Q_e) и рассеяния (Q_{sca}). В работе [1] предложен метод расчета оптических свойств композита на основе PЕТN и наночастиц кобальта и проведена его апробация на основной гармонике неодимового лазера.

Целью работы является моделирование спектральных зависимостей оптических свойств композитов на основе прозрачной матрицы и наночастиц кобальта в диапазоне длин волн от 4000 до 1200 нм, с определением влияния дисперсии среды на спектральные зависимости оптических свойств наночастиц металлов. Основными параметрами расчета являются: комплексный показатель преломления (m_i) металла, который существенно зависит от длины волны света (λ), и показатель преломления среды (m_0), зависимость которого от λ менее выражена, и ею в ряде случаев пренебрегают. Интерполяция литературных данных [2] позволила определить спектральные зависимости действительной и мнимой частей показателя преломления кобальта в диапазоне 381÷1216 нм. В качестве матрицы в работе использован бромид калия, поскольку на длине волны основной гармоники неодимового лазера показатели преломления бромида калия и PЕТN совпадают, а закон дисперсии в бромиде калия известен. Показатель преломления бромида калия медленно убывает от значения 1.59 при 400 нм до 1.54 при 1200 нм, изменяясь на 3%.

Проведен расчет оптических характеристик [3] наночастиц кобальта в матрице бромида калия в двух приближениях: при постоянном значении показателя преломления, не зависящем от длины волны (1.54), и при экспериментальной зависимости $m_0(\lambda)$. Зависимости $Q_{abs}(R)$ для каждой длины волны в спектральном диапазоне от 400 до 1200 нм имеют ярко выраженный максимум Q_{abs} . Обе зависимости $Q_{abs} \max(\lambda)$ являются нисходящими и достаточно близкими. Максимальное отличие Q_{abs} наблюдается при 400 нм и составляет менее 3%, что значительно меньше возможных погрешностей эксперимента [4, 5]. Еще ближе зависимости оптимального радиуса, соответствующего максимальному значению коэффициента эффективности поглощения, которые отличаются не более чем на 1% во всем исследованном диапазоне.

Рассчитаны спектральные зависимости показателей поглощения и рассеяния и фактора анизотропии рассеяния для композитов бромид калия – наночастицы кобальта с радиусами 30, 50, 70 и 120 нм. Увеличение радиуса приводит к батохромному сдвигу длины волны света в точке максимума на спектральной зависимости. В случае показателя поглощения при увеличении радиуса от 30 до 50 нм полоса сдвигается с 390 до 500 нм и становится виден второй резонанс при 350 нм. Максимумы на зависимостях показателя поглощения, рассчитанных при больших радиусах, не проявляются в исследованной области спектра. Аналогичный батохромный сдвиг наблюдается и на зависимости показателя рассеяния от длины волны: дли-

ны волн в точках максимума для наночастиц с радиусами 30, 50 и 70 нм составляют 370, 500 и 670 нм соответственно.

Альбеде однократного рассеяния в случае наночастиц с радиусом 30 нм монотонно уменьшается при росте длины волны во всем исследованном спектральном диапазоне от 0.373 до 0.135. Альбеде однократного рассеяния света наночастицами с радиусом 50 нм максимально при длине волны 470 нм, амплитуда максимума 0.548, для сравнения на красной и синей границах рассматриваемого спектрального диапазона значения альбеде равны 0.386 и 0.479. Увеличение радиуса наночастиц до 70 нм приводит к смещению максимума к длине волны 670 нм, при этом общий интервал изменения альбеде составляет 0.527–0.622. Для наночастиц с радиусом 120 нм альбеде однократного рассеяния возрастает почти монотонно от 0.584 до 0.672 при увеличении длины волны в исследуемой области. Увеличение радиуса наночастиц делает рассеяние более анизотропным с отрицательным фактором анизотропии [5]. Выполнены расчеты коэффициентов полного пропускания и отражения для композитов бромид калия – наночастицы кобальта. Оптические свойства композита воспроизводят во многом оптические свойства индивидуальных наночастиц. Чем больше радиус наночастицы, тем выше альбеде однократного рассеяния, тем больше коэффициент отражения за счет диффузной составляющей. Локальные максимумы коэффициента отражения для наночастиц с радиусами 50 и 70 нм при 450 и 600 нм коррелируют с соответствующими максимумами альбеде однократного рассеяния. Следует отметить, что локальный максимум коэффициента отражения при 440 нм для композита, содержащего наночастицы с радиусом 120 нм, коррелирует с локальным минимумом фактора анизотропии рассеяния, а величина альбеде однократного рассеяния в данном случае слабо зависит от длины волны. Достаточно небольшое изменение альбеде для наночастиц с радиусами 50, 70 и 120 нм в пределах 0.1 приводит к тому, что коэффициент полного пропускания определяется, в данном случае, показателем ослабления образца. Данный тренд соблюдается для всех исследованных композитов.

Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными [4], сделан вывод о согласовании полученной расчетной зависимости с экспериментальной.

Литература

1. Звеков А.А., Каленский А.В., Адуев Б.П., Ананьева М.В. Расчет оптических свойств композитов пентаэритрит тетранитрат – наночастицы кобальта // Журнал прикладной спектроскопии. 2015. Т. 82, № 2. С. 219–226.
2. Palik E.D. Handbook of Optical Constants of Solids II // Academic Press. 1998, p. 1096.
3. Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Звеков А.А., Никитин А.П., Нелюбина Н.В., Белокуров Г.М., Каленский А.В. Определение оптических свойств светорассеивающих си-

стем с помощью фотометрического шара // Приборы и техника эксперимента, 2015, № 6. С. 60–66.

4. *Ершов Б.Г.* Наночастицы металлов в водных растворах: электронные, оптические и каталитические свойства // Российский химический журнал. 2001. Т. 45, № 3. С. 20–30.

5. *Лебедев Д.В., Зиганшина С.А., Нургазизов Н.И., Чукланов А.П., Бухараев А.А.* Формирование наночастиц кобальта на поверхности пиролитического графита в сверхвысоком вакууме // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2012, № 6. С. 85–89.

References

1. *Zvekov A.A., Kalenskii A.V., Aduiev B.P., Ananyeva M.V.* Calculation of the optical properties of pentaerythritol tetranitrate–cobalt nanoparticle composites // Journal of Applied Spectroscopy. 2015. Т. 82. № 2. Pp. 213–220.

2. *Palik E.D.* Handbook of Optical Constants of Solids II // Academic Press. 1998, p. 1096.

3. *Aduiev B.P., Nurmukhametov D.R., Zvekov A.A., Nikitin A.P., Nelyubina N.V., Belokurov G.M., Kalenskii A.V.* Determining the optical properties of light-diffusing systems using a photometric sphere // Instruments and Experimental Techniques, 2015, Vol. 58, No. 6. Pp. 765–770.

4. *Ershov B.G.* Nanochastitsi metallov v vodnih rastvorah: elektronnyy, opticheskie i kataliticheskie svoistva // Rossiiskii himicheskii jurnal. 2001. Т. 45. №3. С. 20–30.

5. *Lebedev D.V., Ziganshina S.A., Nurgazizov N.I., Chuklanov A.P., Buharaev A.A.* Formirovanie nanochastits kobalta na poverhnosti piroliticheskogo grafita v sverhvysokom vakume // Poverhnost rentgenovskie sinhrotronnye i nejtronnye issledovaniya, 2012, № 6. С. 85–89.

МОДЕЛЬ МИКРООЧАГОВОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

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

Кемеровский государственный университет, Россия
santanik123@gmail.com

Ключевые слова: модель теплового взрыва, уравнение переноса излучения, наночастицы, взрывчатые вещества, теория Ми.

Аннотация. В статье рассматриваются варианты модернизации микроочаговой модели лазерного инициирования теплового взрыва композитов состава прозрачное взрывчатое вещество – наночастицы металлов. Оптические свойства матрицы и включений можно учитывать в модели, как изменяющиеся коэффициенты вследствие быстрого установления квазистационарного состояния при переносе излучения. Учет индивидуальных оптических свойств наночастиц объясняет экстремальную зависимость порога лазерного инициирования от размера наночастиц и длины волны импульса.

HOT-SPOT MODEL OF LASER INITIATION OF CONDENSED EXPLOSIVES

N.V. Gazenaur, M.V. Ananyeva, V.V. Galkina

Kemerovo State University, Russia,
santanik123@gmail.com

Keywords: hot-spot model, radiative transfer equation, nanoparticles, explosives, Mie theory.

Abstract. Different options of modernization of hot-spot model of initiation of composites based on transparent explosive-metal nanoparticles were studied. The optical properties of matrix and inclusion might be taken into account as the changing coefficients due to the rapid establishment of the quasi-stationary state during the radiation transfer. Individual optical properties of nanoparticles explain the extreme dependence of the laser initiation threshold on the size of nanoparticles and the pulse wavelength.

Бесконтактные методы возбуждения самоускоряющихся физико-химических процессов в настоящее время рассматриваются как замена иным способам возбуждения. Такой интерес обусловлен использованием локального лазерного излучения. Экономичным механизмом поглощения энергии лазерного излучения при взаимодействии с веществом является поглощение наночастицей. В результате образуется первичный очаг химической реакции, развитие которого может приводить к инициированию взрывного разложения. Микроочаговая концепция теплового взрыва идеально подходит для пентаэритрита-тетранитрата (PETN), содержащего светопоглощающие наночастицы металлов, при добавлении которых чувствительность PETN повышается более чем в 100 раз [1].

В рамках теории Ми проводился расчет факторов эффективности поглощения и рассеяния света наночастицами металлов в матрице PETN, оценивались их зависимости от радиуса наночастицы металла и длины волны инициирующего импульса [2]. Рассмотрено влияние факторов эффективности поглощения, количественно выражающих индивидуальные оптические свойства наночастиц, на зависимости критической плотности энергии инициирования от радиуса наночастицы и длины волны [3].

Критическая плотность энергии H может быть представлена в виде

$$H_c(R, \lambda) = H_t(R) / Q_{abs}(R, \lambda) [4],$$

где $H_t(R)$ – критическая плотность энергии, рассчитанная по теплофизической части микроочаговой модели лазерного инициирования теплового взрыва; $Q_{abs}(R, \lambda)$ – зависимость коэффициента эффективности поглощения излучения с длиной волны λ от радиуса наночастицы R .

Показано, что в данных условиях зависимость $Q_{abs}(R, \lambda)$ выражена сильнее, чем $H_t(R)$, поэтому минимум на зависимости $H_c(R, \lambda)$ лежит ближе к абсциссе максимума функции $Q_{abs}(R, \lambda)$.

В исследуемой области радиусов (50–150 нм) зависимость Q_{abs} имеет вид кривой с максимумом, координаты которого зависят от материалов матрицы, наночастицы и длины волны. Например, для наночастиц никеля в PETN на длине волны основной гармоники неодимового лазера максимальное значение фактора эффективности поглощения $Q_{abs_m} = 1.09$ при радиусе наночастицы $R_m = 96.1$ нм.

Расчет критической плотности энергии выполнялся в рамках модернизированной микроочаговой модели теплового взрыва при длительности импульса на полувысоте 12 нс, физико-химические параметры матрицы и наночастиц взяты из [3]. На зависимости критической плотности энергии от радиуса наночастиц наблюдается минимум при значении радиуса 90.9 нм. Заметна близость максимума $Q_{abs}(R) = 96.1$ и минимума $H_c(R) = 90.9$ нм, что говорит о преобладающей роли оптических свойств наночастиц в формировании минимума $H_c(R)$. Можно сделать вывод, что оптические свойства наночастиц одна из основных причин появления зависимости критической плотности энергии от радиуса наночастиц.

Процесс инициирования взрывного разложения ВВ включает в себя перенос энергии лазерного излучения от источника до поглощающей наночастицы, и эффект многократного рассеяния на неоднородностях образца и наночастицах металлов. Такие эффекты приводят к повышению освещенности в образце и снижению критической плотности энергии [5]. Стандартная толщина образца составляет 1 мм, показатель преломления энергетического материала равен 1.54, такой путь электромагнитная волна проходит за 5 пс, и, даже, если полагать, что электромагнитное излучение подвергается ряду актов рассеяния с закономерным увеличением оптического пути в 5–10 раз, данная величина все равно в тысячу раз меньше длительности лазерного импульса. Это приводит к усложнению исследования механизма взрывного разложения, однако представляется возможным выделить относительно быструю подсистему элементарных процессов взаимодействия излучения с взрывчатым веществом.

Для моделирования оптических свойств нанокompозита используется одномерное уравнение переноса излучения с Френелевскими граничными условиями [2]. Оптические свойства наночастиц металлов, считающихся сферическими, вычислялись в рамках теории Ми. Для рассчитываемых значений проверялось выполнение уравнения баланса, заключающееся в равенстве суммы коэффициентов поглощения, отражения и пропускания единице. Полученные значения отклонения левой части уравнения баланса от правой не превышали 0.01%. Проверка метода на сходимость результатов показала, что при $N=15$ результаты отклоняются от полученных при $N=50$ – не более чем на 0.5%, а при $N=30$ – на 0.1%.

Перейдем к рассмотрению влияния многократного рассеяния в микроочаговой модели лазерного инициирования теплового взрыва на примере композитов PETN – наночастицы алюминия. В рамках модели сечение поглощения излучения принимается равным геометрической величине πR^2 , а для учета индивидуальных и коллективных оптических свойств наночастиц необходимо ввести «действующее» сечение, равное произведению площади сечения наночастицы, фактора эффективности поглощения и коэффициента усиления освещенности. Согласно результатам расчетов для наночастиц, находящихся на глубине 0.1 мм, максимальный поправочный коэффициент изменяется от 0.030 до 0.882 при изменении радиуса наночастицы от 20 до 200 нм. Проведя расчет зависимостей критической плотности энергии лазерного инициирования взрыва PETN излучением основной и второй гармоник неодимового лазера, мы пришли к выводу, что отношение значений критических плотностей энергии на второй и основной гармониках неодимового лазера составляет 0.45. С учетом многократного рассеяния света (коэффициенте усиления освещенности), отношение значений критической плотности энергии в точках минимума составляет уже 0.55, что гораздо лучше согласуется с экспериментальной величиной – 0.61 [1]. Таким образом, учет многократного рассеяния света позволяет улучшить согласие с экспериментом для отношения критических плотностей энергии лазерного инициирования излучением первой и второй гармоник неодимового лазера.

Литература

1. Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Звеков А.А., Никитин А.П., Каленский А.В. Особенности лазерного инициирования композитов на основе ТЭНа с включениями ультрадисперсных частиц алюминия // Физика горения и взрыва. 2016. Т. 52, № 6. С. 104–110.
2. Звеков А.А., Каленский А.В., Адуев Б.П., Ананьева М.В. Расчет оптических свойств композитов пентаэритрит тетранитрат – наночастицы кобальта // Журнал прикладной спектроскопии. 2015. Т. 82, № 2. С. 219–226.
3. Каленский А.В., Звеков А.А., Зыков И.Ю., Никитин А.П. Зависимость критической плотности энергии инициирования взрывного разложения PETN-Co от длительности лазерного импульса // Химия в интересах устойчивого развития. 2016. Т. 24, № 2. С. 245–249.
4. Каленский А.В., Звеков А.А., Никитин А.П. Микроочаговая модель с учетом зависимости коэффициента эффективности поглощения лазерного импульса от температуры // Химическая физика. 2017. Т. 36. № 4. С. 43–49.
5. Александров Е.И., Цитилев В.П. Особенности светового режима в объеме полубесконечного слоя ДРС при освещении направленным пучком конечной апертуры // Известия высших учебных заведений. Физика. 1988. Т. 52, № 10. С. 23–29.

References

1. *Aduev B.P., Nurmukhametov D.R., Zvekov A.A., Nikitin P.A., Kalenskii A.V.* Peculiarities of laser initiation of composites on the basis of PETN with inclusions of ultrafine particles of aluminum // *Physics of combustion and explosion*. 2016. Vol. 52, No. 6. Pp. 104–110.
2. *Zvekov A.A., Kalenskii A.V., Aduev B.P., Ananyeva M.V.* Calculation of the optical properties of the composites pentaerythritol tetranitrate – cobalt nanoparticles // *Journal of applied spectroscopy*. 2015. Vol. 82, No. 2. Pp. 219–226.
3. *Kalenskii A.V., Zvekov A.A., Zykov I.Yu., Nikitin A.P.* The dependence of the critical density of initiation energy of explosive decomposition of PETN With the duration of the laser pulse // *Chemistry for sustainable development*. 2016. Vol. 24. No. 2. Pp. 245–249.
4. *Kalenskii A.V., Zvekov A.A., Nikitin A.P.* The hot-spot model taking into account the dependence of the coefficient of efficiency of absorption of laser pulse on temperature // *Chemical physics*. 2017. Vol. 36. No. 4. Pp. 43–49.
5. *Alexandrov E.I., Tsipilev V.P.* Peculiarities of the light regime in the volume of a semi-infinite layer of DRS in the coverage of the directional beam of finite aperture // *news of higher educational institutions. Physics*. 1988. Vol. 52. No. 10. Pp. 23–29.

КУМУЛЯТИВНЫЙ ЗАРЯД КОЛЬЦЕВОЙ ФОРМЫ ОБЛИЦОВКИ

Е.М. Гриф, А.В. Гуськов, К.Е. Милевский

Новосибирский государственный технический университет, Россия
grifkatia@gmail.com

Ключевые слова: кумулятивный заряд, повышение диаметра пробития, кольцевая кумулятивная облицовка, кольцевая кумулятивная струя.

Аннотация. Исследуется вариант кумулятивного заряда с облицовкой кольцевой формы. Анализируются возможности применения подобных зарядов с целью получения отверстий большого диаметра пробития. Численно моделируется функционирование кумулятивного заряда с облицовкой кольцевой формы в среде высокоскоростных нелинейных динамических процессов ANSYS Autodyn. На основании анализа проведенных расчетов обосновывается теоретическая работоспособность заряда с предлагаемой вариацией облицовки и оцениваются перспективы применения зарядов подобного типа.

CUMULATIVE CHARGE WITH A RING-SHAPED LINER

E.M. Grif, A.V. Guskov and K.M. Milevskij

Novosibirsk State Technical University, Russian Federation
grifkatia@gmail.com

Keywords: cumulative charge, increase in penetration diameter, ring-shaped cumulative lining, ring-shaped cumulative jet.

Abstract. This paper investigates a variant of a shaped charge with a ring-shaped lining. Analyzed the possibility of using such charges in order to obtain holes of a large diameter penetration. The operation of a shaped charge with a ring-shaped lining is numerically simulated in the software of high-speed non-linear dynamic processes ANSYS Autodyn. Based on the analysis of the calculations, the theoretical performance of the charge with the proposed lining variation is substantiated and the prospects for the use of charges of this type are assessed.

С расширением спектра применения кумулятивных зарядов в добывающих промышленных отраслях возникают задачи, связанные не только с увеличением глубины, но и повышением диаметра пробития.

Исследования по данному вопросу проводятся по следующим направлениям: за счет оптимизации размеров и формы кумулятивного заряда, формы, геометрии и материала кумулятивной облицовки, качества, энергосодержания, плотности и скорости детонации взрывчатого вещества (ВВ), наличия линзового узла, правильного подбора фокусного расстояния для заряда и точности изготовления деталей заряда и их сборки [1]. Однако, на данном этапе развития науки и технологий, возможности указанных направлений ограничены.

Во-первых, несмотря прямую закономерность между углом раствора кумулятивной облицовки и толщиной формируемой кумулятивной струи [2], возможности достижения максимального диаметра кумулятивной струи и, следовательно, пробития изначально ограничены физикой процесса.

Во-вторых, в силу особенностей конструкции кумулятивных облицовок традиционных форм, сам металл, участвующий в процессе струеобразования и (или) пестообразования, независимо от его физических характеристик при деформировании концентрируется по оси заряда. Следовательно, целесообразно развитие направления создания и совершенствования кумулятивных зарядов со сложной формой кумулятивных облицовок [3], при функционировании которых кумулятивный элемент формируются не в центральной части корпуса заряда, а в его периферийных областях.

Для оценки эффективности и целесообразности реализации подобной конструкции проведены расчеты функционирования двух вариантов схем кумулятивных зарядов: тестовой (кумулятивного заряда с кумулятивной облицовкой конической формы) и, соответственно, кольцевой (кумулятивного заряда с коническо-кольцевой кумулятивной облицовкой). При выполнении расчетов использовался инструмент численного моделирования Ansys Autodyn. Результаты тестового расчета использовались в сравнении для дальнейшей оценки эффективности работы кольцевой схемы кумулятивного заряда.

При построении кольцевой расчетной схемы, несмотря на существование специальных устройств, для получения кольцевых кумулятивных струй, например, содержащих W-образные кумулятивные облицовки [4],

или устройства, особенностью конструкции которого является наличие специального формователя [5], интерес представляла конструкция, не оснащенная специальными приспособлениями. Расчет схемы кумулятивного заряда с коническо-кольцевой кумулятивной облицовкой представлен на рис. 1.

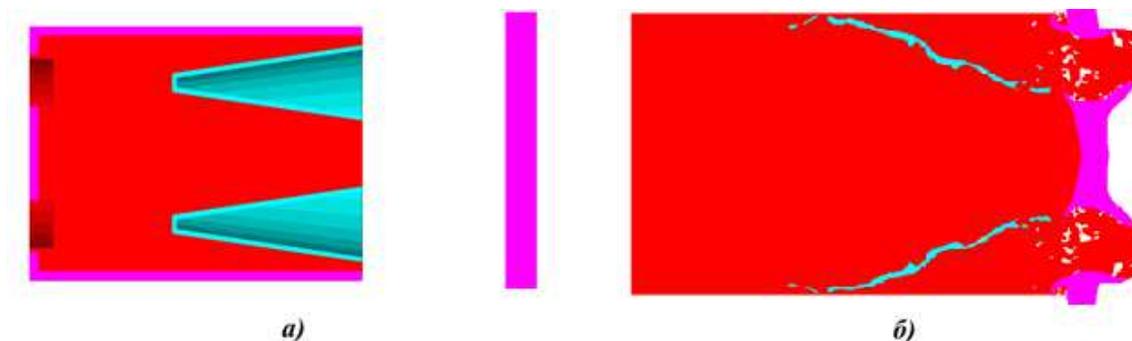


Рис. 1. Расчет функционирования кольцевой схемы кумулятивного заряда в моменты времени: *a* – 0 мкс; *б* – 32 мкс

Так как конструкция, представленная на рис. 1, *a* не снабжена специальным приспособлением, которое обеспечило бы симметричность распространения детонации в ВВ относительно кольцевой оси облицовки, расчетная картина, полученная в результате численного моделирования функционирования заряда, отражает образование низкоскоростного кольцевого кумулятивного песта, а не кольцевой кумулятивной струи. Однако, несмотря на низкую плотность энергии ударника, пробитие преграды происходит.

Результаты расчета можно рассматривать для двух случаев: если преграда жестко связана с материалом, в ней формируется сквозной кольцевой канал, а если материал запреградного пространства не препятствует внедрению выбитой из преграды «пробки», в преграде образуется круговое отверстие диаметра, равного внешнему диаметру кольцевого пробития. Для случая, когда преграда жестко связана с запреградным пространством, данный подход, по сравнению с тестовым зарядом, позволил увеличить величину поперечного сечения пробития на 33%, площадь поперечного сечения пробития – на 344%. В случае, сопровождающемся выбиванием «пробки», диаметр пробития увеличился на 133%, площадь пробития при этом увеличилась на 445%.

Численные исследования составных кумулятивных облицовок, включающих элементы коническо-кольцевой формы, открывают более широкие перспективы для получения отверстий больших величин поперечного пробития преграды, превышающего тестовые результаты в 1,3–2,3 раза, и, соответственно, площади пробития, превышающей данные тестового расчета в 4,4–5,4 раз (в зависимости от вида связи преграды и запреградного материала).

Литература

1. Физика взрыва / под ред. Л.П. Орленко. 3-е изд., испр.: в 2 т. Т. 2. М.: Физматлит, 2004. 656 с.
2. Гриф Е.М., Гуськов А.В., Милевский К.Е., Чайка Н.Ф. Перспективы развития кумулятивной скважинной перфорации // Интерэкспо Гео-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр., 23–27 апреля 2018 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Наука. Оборона. Безопасность-2018»: сб. материалов. Новосибирск: СГУГиТ, 2018. 306 с.
3. Минин И.Вл., Минин О.Вл. Перспективы развития кумулятивных снарядов, стабилизируемых вращением // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2014. №2.
4. Ситников В.И., Ведерников Ю.А., Селезнев А.И. О некотором механизме струеобразования в кумулятивных зарядах // Химическая физика. 2001. Т. 20, № 10. С. 35–37.
5. Патент 2478904С1 Россия. МПК F42B1/02 / Маляров Д.В., Жданов И.В., Тарасов И.Б.)

References

1. Physics of the explosion / Ed. L.P. Orlenko / Ed. 3rd, rev. In 2 tons. T. 2. M.: Fizmatlit, 2004. 656 p.
2. Grif E.M., Guskov A.V., Milevskij K.E., Chaika N.F. Prospects for the development of cumulative well perforation // Interexpo Geo-Siberia. XIV Intern. scientific Kongr., April 23–27, 2018, Novosibirsk: Intern. scientific conf. "The science. Defense. Security-2018": Sat. materials. Novosibirsk: SSUGiT, 2018. 306 p.
3. Minin I.Vl., Minin O.Vl. Prospects for the development of cumulative shells, stabilized by rotation // Interexpo Geo-Siberia. 2014. №2.
4. Sitnikov V.I., Vedernikov Yu.A., Seleznev A.I. On some mechanism of stream formation in shaped charges // Chemical Physics. 2001. Vol. 20, № 10. p. 35–37: ill. Bibliogr: p. 37 (3 titles.).
5. Patent 2478904C1 Russia. IPC F42B1 / 02 (Authors Malyarov D.V., Zhdanov I.V., Tarasov I.B.)

ОБЗОР МЕТОДОВ ЛИКВИДАЦИИ СНЕЖНЫХ ЛАВИН

Д.В. Гынгазов, А.К. Абдразаков, К.Е. Милевский

Новосибирский государственный технический университет, Россия
dmitrygyngazov@yandex.ru

Ключевые слова: лавина, горный массив, система, безопасность.

Аннотация. В данной работе рассматриваются проблемы образования лавин в горных массивах, причины их возникновения, способы борьбы с ними, а также рассматривается метод усовершенствования существующей системы.

REVIEW OF METHODS FOR THE ELIMINATION OF SNOW AVALANCHES

D.V. Gyngazov, A.K. Abdrazakov, K.E. Milevsky

Novosibirsk State Technical University, Russian Federation
dmitrygyngazov@yandex.ru

Keywords: Avalanche, mountain range, system, security.

Abstract. This paper discusses the problems of avalanches in mountain ranges, the causes of their occurrence, ways to deal with them and the method of improving the existing system.

Ежегодно, огромное количество людей отправляется на отдых в горные районы, где располагается значительное количество курортов, санаториев и баз, вблизи которых множество заснеженных сопок и склонов. Ежегодно, только в России, на курортах погибает около 40 человек по причине схода лавины. Лавина формируется за счет следующих составляющих: снег, лёд и естественные горные породы, начинающие скольжение вниз по крутым горным склонам, захватывая новые порции снега и льда, наращивая свой объём. Учитывая, что сила удара стихии нередко исчисляется десятками тонн на квадратный метр, лавина разрушает всё на своём пути. Останавливается она лишь внизу, достигнув пологих участков склона или оказавшись на дне долины. В связи с этим встает вопрос безопасности нахождения в горах и долинах.

Падение лавины на первый взгляд кажется совершенно неожиданным. На самом деле это происходит неслучайно. Одновременно с нарастанием снежного покрова в верхних слоях, происходит понижение температуры в интервале от $-10...-20$ °C за счет атмосферного воздуха, а в прилегающих слоях к склону горной поверхности, сохраняются температуры, близкие к 0° (в интервале от $0...-2$ °C).

Таким образом, в снежном покрове толщиной даже в 40–50 см возникает разница в температурах между верхними слоями снега и слоями, расположенными у земной поверхности. Вследствие возникновения температурного градиента в нижних слоях снежного покрова начинается испарение снега и формирование водяных паров. Постепенно нижний слой снега разрыхляется, теряет устойчивость и превращается в лавиноопасный слой.

Лавины возникают только в том случае, если накопление снега происходит на крутых склонах (от 15 °C и выше), где снег не может удержаться. Для обеспечения безопасности людей от действия снежных лавин были разработаны различные конструкции защитных сооружений. Лавиноопасные склоны застраиваются снегоудерживающими стенками, направляющими дамбами и лавинорезами. Над горными дорогами строят железобетонные противолавинные галереи, но этот метод является затратным как по

времени, так и по финансам. Другим направлением борьбы с лавинами, является преднамеренный минометный обстрел лавиноопасных склонов. Этим способом удастся искусственно вызвать падение лавин небольших размеров, постепенно разгружая от больших скоплений снега лавиноопасные склоны гор. Взрывчатое вещество воздействует на снежный покров следующим образом:

1) избыточное давление ломает поверхность снежного покрова, что приводит к повреждению или дезагломерированию кристаллов в зависимости от типа снега;

2) отрицательное давление, создаваемое над снежным покровом, позволяет воздуху, содержащемуся в покрове, расшириться и поднять верхнюю его часть;

3) сдвиг снежного покрова под действием гравитации вызывает ответный сдвиг на склоне областей, соседних с той частью, которая испытала воздействие.

Наиболее распространенным методом борьбы является использования артиллерийских систем для борьбы с лавинами, но у использования подобных систем есть минусы, такие, как:

1) использование в качестве взрывчатого вещества пороховых зарядов, в обращении порох требует к себе большей аккуратности использования и бережной транспортировки к месту применения;

2) при использовании снарядов, начиненных порохом, вследствие подрыва образуется мощная звуковая волна, которая может вызвать непреднамеренный спуск лавины в незапланированных для схода местах.

Однако существуют системы, в основе которых лежит действие сжатого азота для запуска снаряда из орудия, в состав которого входит жидкое взрывчатое вещество, что является более безопасным в использовании. Примером, использующим преднамеренный обстрел лавиноопасных склонов, является система «Снежная стрела». Она представляет собой пневматическую пусковую установку с длиной ствола 4 или 6 м для запуска снаряда, содержащего ВВ в виде взрывчатой жидкой смеси. Система позволяет осуществлять предупредительный спуск снежных лавин в определённый момент, достаточно близкий к критической ситуации, отвечающей лавинообразованию в естественных условиях; дает возможность обработать лавиноопасные склоны при любой погоде и в отсутствии видимости; обеспечивает высокую мобильность и точность обработки склонов, так как взрывчатая смесь доставляется непосредственно в требуемую зону.

Система «Снежная стрела» устанавливается на вращающуюся базу. Вращение базы обеспечивает возможность кругового обстрела лавиноопасных склонов и его отдельных участков из одной и той же точки даже при отсутствии прямой видимости зоны воздействия. Дальность действия системы зависит от давления в резервуаре системы в момент выстрела и может достигать 2 км.

Для увеличения потенциала воздействия на снежный массив, авторы предлагают в конструкцию заряда ввести детонационную линзу, которая обеспечит схождение двух детонационных волн в центральной части заряда, и продукты детонации будут направлены вниз на объект поражения, тем самым сконцентрирует действие детонационной волны. Для обеспечения одновременного инициирования взрывчатого вещества с противоположных сторон заряда, необходимо ввести в конструкцию заряда два капсуль-детонатора, которые соединены между собой ударно-волновой трубкой, являющейся безопасной в обращении.

УСТРОЙСТВО КОМБИНИРОВАННОГО ТИПА ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ПОРАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ ДЕТОНАЦИИ КОНДЕНСИРОВАННОГО ВЕЩЕСТВА

А.С. Капралова, С.А. Матвеев, М.В. Чернышов

Балтийский государственный технический университет
«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия
kapralovaa@yahoo.com

Ключевые слова: подавление взрывной волны, многофазная среда.

Аннотация. Предложена концепция нового взрывозащитного устройства комбинированного типа. Принцип действия этого устройства состоит в совмещении геометрического фактора (концентрации действия взрывной волны по одному выделенному направлению) и поглощения энергии взрыва многофазными материалами с подавлением разрушительного действия взрывных ударных волн. В данной работе приводятся и анализируются результаты испытаний первых моделей перспективного локализатора взрыва.

COMBINED DEVICE FOR SUPPRESSION OF DAMAGING EFFECTS OF DETONATION OF THE CONDENSED MEDIA

Anna S. Kapralova, Stanislav A. Matveev and Mikhail V. Chernyshov

Baltic State Technical University “VOENMEH”, Russian Federation
kapralovaa@yahoo.com

Keywords: blast wave suppression, multiphase media.

Abstract. A concept of new blast-protective device of the combined type is proposed. The principle of combination of that device is combination of the geometrical factor (concentration of blast wave action to the only assigned direction) with shock energy absorption by multiphase destructible materials with corresponding suppression of blast-wave damaging effects.

At this study, results of field tests of the first models of the prospective blast inhibitor are shown and analyzed.

Обеспечение безопасности работы двигателей аэрокосмической техники, в том числе основанных на новых физических принципах, требует разработки и внедрения новых защитных устройств, способных поглощать энергию возможного аварийного взрыва и подавлять его поражающее действие.

От современных взрывозащитных средств, действующих в непосредственной близости от взрывоопасного предмета (ВОП), требуется максимальное ослабление основных поражающих факторов взрыва: осколочно-фугасного и термического действия. Подавление осколочного действия взрыва состоит в торможении осколочного потока ВУ и недопущении образования вторичного потока из элементов взрывозащитного устройства и прочих обломков.

В настоящее время разработано множество взрывозащитных устройств разной степени эффективности для обеспечения безопасности в чрезвычайной ситуации, связанной с попыткой криминального или террористического взрыва. Одним из самых распространенных видов таких устройств является взрывозащитная урна – жёсткий контейнер открытого типа, принцип работы которого заключается в формировании выделенного направления распространения взрывной волны. Предполагается, что при взрыве в открытом контейнере ударная волна и поражающие осколки распространяются вверх, в результате чего воздействие взрыва на окружающие объекты сводится к минимуму.

В частности, распространенные зарубежные локализаторы взрыва, выпускаемые в США, Франции, Нидерландах и других странах, представляют собой открытые сверху цилиндры, внутри которых размещается подзорный предмет. В целом, успешно справляясь с задачей торможения осколочного потока, эти устройства претендуют также на подавление разрушительного воздействия ударной волны, возникающей при срабатывании ВОП.

Численное моделирование распространения взрывных волн внутри цилиндрических емкостей, рефракции этих волн на краях локализатора, их последующего распространения с регулярным и маховским отражением от горизонтальной поверхности показывает, что ударная волна, обогнув края типичного зарубежного взрывозащитного устройства, в дальнейшем распространяется практически во всех направлениях с незначительной потерей своей разрушительной силы. В частности, избыточное давление ударной волны на критически важной для человеческого организма высоте 1,0–2,0 м уменьшается не более чем в 1,5–2,0 раза, а импульс давления – в 1,2–1,5 раза при срабатывании взрывоопасного предмета умеренной мощности. Эти результаты явно неудовлетворительны: минимальные требования к

взрывозащитным устройствам заключаются в снижении избыточного давления в 5–7 раз с соответствующим уменьшением импульса положительной фазы. Удвоение и даже утроение (до 1,5 м) высоты взрывозащитного устройства не приводит к желаемому перераспределению энергии взрывной волны в вертикальном направлении, и задача подавления фугасного действия зарубежными цилиндрическими локализаторами остаётся нерешённой.

Для повышения эффективности взрывоподавления необходимо использование и других физических механизмов. К числу таких механизмов относится, например, поглощение энергии взрыва специальной многофазной средой, используемой в разрушаемых закрытых устройствах семейства «Фонтан» производства Санкт-Петербургского НПО Специальных материалов. Применение многофазных взрывопоглощающих веществ, основанное на эффекте Гельфанда–Сильникова, приводит к быстрому затуханию, размытию и выполаживанию фронта взрывной волны при диссипации энергии многофазной средой (диспергентом).

В данной работе рассматриваются конструкции и результаты испытаний новых прототипов взрывозащитной урны с использованием специальных взрывопоглощающих элементов из многофазной релаксационной среды аномально высокой сжимаемости. Эффективность подавления фугасного действия взрыва для данного устройства определяется экспериментальным путем с последующим сравнением полученных результатов с аналогичными эмпирически полученными характеристиками открытых (нелокализованных) взрывов.

Экспериментально и численно показано, что модифицирование конструкции взрывозащитной урны путем размещения защитной прослойки позволяет существенно повысить ее эффективность и уменьшить величину избыточного давления до безопасного уровня уже в непосредственной окрестности устройства.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОДРЫВА ЗАСНЕЖЕННОГО ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ЭМУЛЬСИОННОЙ ВЗРЫВЧАТКОЙ

Ю.Н. Орлова

Томский политехнический университет, Россия
orlovaun@mail.ru

Ключевые слова: лед, взрыв, полынья, разрушение, натурный эксперимент.

Аннотация: в работе исследован процесс подводного взрыва заснеженного ледяного покрова эмульсионной взрывчаткой. Объектом исследования является тонкий «игольчатый» лед. В качестве взрывчатки – эмульсионное ВВ (3.25 кг в ТНТ эквива-

ленте). Изучена морфология разрушения льда и установлено, что осколков льда средних (50 см) и больших (100 см) размеров практически не было. Средний диаметр полыньи был не более 500 см. Результаты являются прогнозируемыми и соответствуют прошлогодним и позапрошлогодним.

SNOW COVERED ICE SUBJECTED EXPLOSIVE LOADING. UNDEX RESULTS 2019

Yu.N. Orlova

Tomsk Polytechnic University, Russian Federation
orlovaun@mail.ru

Keywords: ice, explosion, polynya, destruction, underwater explosive (UNDEX).

Abstract. In paper, the process of underwater explosion of snow-covered ice under emulsion explosives was investigated. The object of the study is thin "needle" ice. Emulsion explosives are explosives (3.25 kg in TNT equivalent in terms of explosion heat). The morphology of the destruction of ice was studied and it was established that there were practically no ice fragments of medium (50 cm) and large (100 cm) sizes. The average diameter of the polynya was no more than 500 cm. The results are predictable and correspond to last year's.

В настоящее время актуальной и сложной научной задачей является изучение поведения льда при динамических нагрузках. Актуальность объясняется необходимостью развития северных территорий, борьбой с ледяными заторами на сибирских реках, увеличением добычи природных ископаемых в районах вечной мерзлоты и Крайнего Севера, созданием защит от микрометеоритов, некоторыми военными задачами [1]. Основная сложность заключается в том, что лед является малоизученным природным материалом, концепции разрушения льда еще только разрабатываются [2]. Согласно аналитическому обзору [3] в открытых источниках литературы содержится крайне мало экспериментальных результатов по взрывному нагружению льда. Скорее всего, они уже стали библиографической редкостью.

Цель работы заключается в изучении поведения пресноводного льда при подрыве эмульсионной взрывчатки. Объект исследования заснеженный ледяной покров средней толщины. Возраст льда около 125 дней. Толщина льда 65 см. Толщина снега не более 20 см. Предмет исследования – состояние льда после подрыва 4 кг эмульсионной взрывчатки, а именно: диаметр полыньи (майны) во льду, состояние ее кромки, морфология разрушения и т.п. ВВ – эмульсионная взрывчатка Эмуласт АС-ФП 90 массой 4 кг.

В НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета постоянно ведутся поисковые научные исследования, предметом которых является лед (пресноводный, морской, искусственный). Несколько лет назад была организована мобильная лаборатория «Взрыв-

ное разрушение природных материалов». В настоящий момент лаборатория имеет статус инициативного проекта. Основная цель – экспресс анализ поведения природных материалов при взрывных нагрузках, в том числе определение диаметра и глубины взрывного кратера, состояние его кромки, морфология разрушения и т.д.

Постоянными партнерами мобильной лаборатории являются ООО КузбасСпецВзрыв и МЧС по ТО. С 2012 по 2019 г. в рамках ежегодных противопожарных мероприятий проводятся натурные эксперименты по подводному взрыву заснеженного ледяного покрова на р. Томь. Основная цель – создание физико-математической модели разрушения льда при динамических нагрузках. Результаты экспериментов необходимы как количественные тесты.

На рис. 1 показана майна (полынья), полученная после подрыва одного эмульсионного заряда ВВ. Внутри майны видны осколки льда различных размеров, снежные комки (остатки снежного покрова). Приблизительный диаметр майны составляет 450–500 см. Качественно оценена высота облака осколков, которые образовались в результате действия продуктов детонации.



Рис. 1. Результаты UNDEX-эксперимента 2019.
Фото Орлов М.Ю. Взрыв – ООО КузбасСпецВзрыв

Анализируя результаты эксперимента, можно заключить следующее. Результаты экспериментов текущего года отличаются от результатов прошлогодних экспериментов в пределах (15%). При изучении морфологии разрушения льда установлено, что средних осколков льда (≈ 50 см) было немного. Точное количество определить не удалось, так как осколки разрушались при ударе об лед и воду. Радиальных трещин отрыва в ледяном покрове обнаружено не было.

Литература

1. Бочаров Л.Ю., Корчак В.Ю., Тужиков Е.З. Научные исследования США в Арктике: организационный подход и военные программы // Арктика: экология и экономика. 2015. № 3 (19). С. 48–53.
2. Богородский В.В., Гаврило В.П. Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 383 с.
3. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлова Ю.Н. Компьютерное моделирование процесса внедрения крупногабаритного ударника в ледово-водные среды // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики Сер. физико-математическая. 2012. С. 329–334.

References

1. Bocharov, L. Yu. et al., US Scientific Research in the Arctic: Organizational Approach and Military (in Russian), *Arctic: Ecology and Economy*, 3 (2015), 19. Pp. 48–53.
2. Bogorodsky, V.V., Gavrilov, V.P. *Led. Fizicheskaya Svoystva Sovremennyye Metody Glyatsiologii*, (Ice. Physical Property. Modern Methods of Glaciology – in Russian), Gidrometeoizdat Press, Leningrad, USSR, 1980.
3. Glazyrin V.P., Orlov M.Yu., Orlova Yu.N. Numerical simulation of the penetrating a large-sized projectile into ice-water barriers // Works of Tomsk State University / Physical and mathematical series 2012. Pp. 329–334.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ СТАЛИ ГАДФИЛЬДА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS

М.И. Уванов, А.В. Гуськов

Новосибирский государственный технический университет, Россия
a.guskov@corp.nstu.ru

Ключевые слова: взрывное нагружение, напряжения, деформации, сталь Гадфильда.

Аннотация. Поднимается проблема изучения изменения механических свойств стали Гадфильда после нагружения взрывным воздействием. Этот вопрос является довольно актуальным в связи с тем, что данная сталь при динамическом воздействии ещё больше упрочняется. Поэтому существует большой интерес в том, чтобы определить, как и при каких нагрузках изменяются механические свойства стали. В данной статье приведена оценка деформированного состояния и распределения напряжений по результатам численного моделирования образца из стали Гадфильда при различных величинах нагружения в программном комплексе Ansys.

MODELING OF EXPLOSIVE LOADING OF GADFILLE STEEL IN ANSYS PROGRAM COMPLEX

Mikhail I. Uvanov and Anatoliy V. Guskov

Novosibirsk State Technical University, Russian Federation
a.guskov@corp.nstu.ru

Keywords: explosive loading, stress, deformations, Hadfield steel.

Abstract. In this article raises the problem of studying changes in the mechanical properties of Hadfield steel after loading with an explosive effect. This question is quite relevant due to the fact that this steel under the dynamic impact is further strengthened. Therefore there is a great interest in defining as well as at what loadings mechanical properties of steel change. In this article assessment of the deformed state and distribution of tension by results of numerical modeling of a sample from Hadfield steel at various sizes of loading is given in the program complex Ansys.

Сталь Гадфильда с высоким сопротивлением износу при больших давлениях или ударных нагрузках характеризуется высокой пластичностью. Способность стали Гадфильда упрочняться при воздействии динамических нагрузок делает её в некоторых случаях практически незаменимой для изготовления деталей и узлов машин и механизмов, работающих при интенсивных динамических нагрузках. В данной работе мы рассмотрели взрывное упрочнение стали.

Данный способ упрочнения представляет собой следующее: на планируемую поверхность упрочнения изделия из стали наносится пластическое взрывчатое вещество (ВВ). Во время взрыва возникает высокое давление на фронте ударной волны, высокая скорость движения волны в металле, превышающая скорость звука в нём. В таких условиях можно значительно изменять механические свойства металла, практически не изменяя его формы без существенного нагрева изделия.

Проводились некоторые исследования влияния взрывного нагружения на поверхность изделий из стали Гадфильда, представленные в [1–5]. В указанных статьях изучалось влияние взрывного нагружения на микроструктуру и механические свойства, а также на срок службы изделий из стали Гадфильда. В работах отмечается, что на результат упрочнения стали взрывом влияют количество и свойства взрывчатого вещества, величина заряда, способ нанесения взрывчатого вещества на упрочняемую поверхность, направление распространения ударной волны, число взрывов.

В качестве первого этапа работы был проведен расчет двумерной модели в программе Autodyn Ansys. Расчетная модель включала в себя образец из стали и взрывчатое вещество (ВВ).

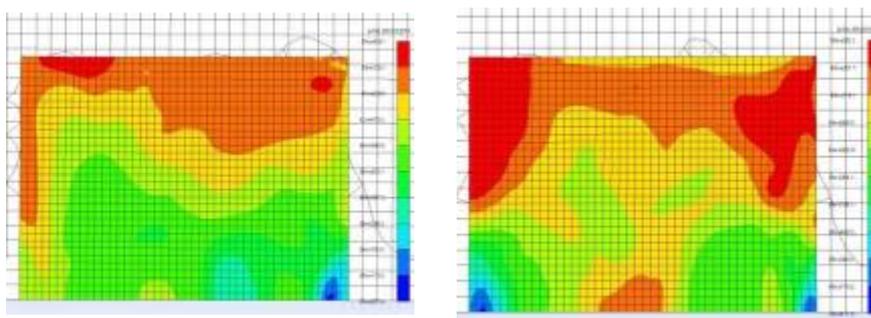


Рис. 1. Распределение давления взрыва ($h=3\text{мм}$ слева, $h=4\text{мм}$ справа), МПа

Результаты расчёта дают представления о том, что глубины упрочняемого слоя зависит от толщины пластины ВВ (рис. 1). При этом деформации образца малы.

Литература

1. Гуськов А.В. Изменение микроструктуры стали Гадфильда, под действием высокоскоростной энергии продуктов взрывчатого вещества / А.В. Гуськов, Л.И. Тушинский, К.Е. Милевский, А.Ф. Петров // Вычислительная механика деформируемого твердого тела: сб. докл. междунар. науч.-техн. конф., Москва, 31 января – 2 февраля, 2006. Т. 2. М.: Изд-во МИИТ, 2006. С. 134–137.

2. Chen Chen. Low-cycle fatigue behaviors of pre-hardening Hadfield steel. *Materials Science and Engineering* / Chen Chen, Bo Lv, Fei Wang, Fucheng Zhang // *Materials Science and Engineering: A* 695, 2017. Pp. 144–153.

3. Chen C., Zhang F.C., Wang F., Liu H., Yu B.D. Effect of N+Cr alloying on the microstructures and tensile properties of Hadfield steel / C. Chen, F.C. Zhang, F. Wang, H. Liu, B.D. Yu // *Materials Science and Engineering: A* 679, 2017. Pp. 95–103.

4. Гуськов А.В. Механические свойства стали Гадфильда после низкоскоростных методов обработки и обработки взрывом = Mechanical properties of Hadfield steel after low-speed method for processing and handling explosion pressure / А.В. Гуськов, А.С. Долматов, К.Е. Милевский, Ю.П. Яковлева // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики: 6 междунар. молодеж. науч. конф., Томск, 16–18 нояб. 2016 г. // Труды Томского государственного университета. Т. 300. Серия физико-математическая. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2017. С. 42–48.

5. Zhang F.C. Explosion hardening of Hadfield steel crossing / F.C. Zhang, T.S. Wang, C.L. Zheng, M. Zhang, H.H. Luo, H. Liu & A.Y. Xu // *Material Science and Technology*, 2010. Vol. 26, №2. Pp. 223–229.

References

1. Guskov A.V. Change of microstructure of Hadfield steel under the action of high-speed energy of explosive products / A.V. Guskov, L.I. Tushinsky, K.E. Milevsky, A.F. Petrov // *Computational mechanics of a deformed solid body: Sat report international scientific and technical Conf.*, Moscow, January 31 – February 2, 2006. Vol. 2. M.: Publishing house MIIT, 2006. Pp. 134–137.

2. Chen Chen. Low-cycle fatigue behaviors of pre-hardening Hadfield steel. *Materials Science and Engineering* / Chen Chen, Bo Lv, Fei Wang, Fucheng Zhang // *Materials Science and Engineering: A* 695, 2017. Pp. 144–153.

3. Chen C., Zhang F.C., Wang F., Liu H., Yu B.D. Effect of N+Cr alloying on the microstructures and tensile properties of Hadfield steel / C. Chen, F.C. Zhang, F. Wang, H. Liu, B.D. Yu // *Materials Science and Engineering: A* 679, 2017. Pp. 95–103.

4. Guskov A.V. Mechanical properties of Hadfield steel after low-speed methods of processing and blasting / A.V. Guskov, A.S. Dolmatov, K.E. Milevsky, Yu. P. Yakovlev // *Actual problems of modern mechanics of continuum and celestial mechanics: 6th Intern. youth scientific Conf., Tomsk, 16–18 Nov. 2016 / Proceedings of Tomsk State University*. T. 300. A series of physical and mathematical. Tomsk: TSU Publishing House, 2017. Pp. 42–48.

5. Zhang F.C. Explosion hardening of Hadfield steel crossing / F.C. Zhang, T.S. Wang, C.L. Zheng, M. Zhang, H.H. Luo, H. Liu & A.Y. Xu // *Material Science and Technology*, 2010. Vol. 26, №2. Pp. 223–229.

ПРОБИТИЕ ПРОБОЙНИКОМ ГОМОГЕННОЙ БРОНИ

В.П. Халеменчук, К.Е. Милевский

Новосибирский государственный технический университет, Россия
slava.khalemenchuk@mail.ru

Ключевые слова: бронебойно-оперенный подкалиберный снаряд, снаряд, кумулятивный эффект, кумулятивная струя, броня, глубина пробития брони, эллипсоидная полость.

Аннотация. Проанализированы существующие способы увеличения глубины пробития преграды и выделены подходы для повышения могущества кинетических снарядов: повышение массы метательного заряда, увеличение энергетических характеристик метательного заряда и увеличение тактико-технических характеристик снаряда.

PUNCH HOMOGENEOUS ARMOR

Viacheslav Khalemenchuk, Konstantin Milevsky

Novosibirsk State Technical University, Russian Federation
slava.khalemenchuk@mail.ru

Keywords: Feathered armor-piercing projectile, the projectile, the cumulative effect, cumulative jet, armor, depth of penetration of armor, the ellipsoidal cavity.

Abstract. The article analyzes the existing methods of increasing the depth of penetration of the barrier. And the approaches for increasing the power of kinetic energy projectiles are identified: increasing the mass of the propellant charge, increasing the energy characteristics of the propellant charge and increasing the tactical and technical characteristics of the projectile.

В современных армиях весь танковый парк техники имеет динамическую защиту и комбинированную броню, которая оказывает достаточное влияние на глубину пробития брони. В связи с этим кумулятивные бое-

припасы снизили свою эффективность по сравнению с бронебойно подкалиберными снарядами (БОПС), на которые оказывается незначительное влияние. И основную часть боекомплекта танка составляют БОПС и являются наиболее перспективным видом боеприпасов, требующих постоянное совершенствование.

Основными техническими характеристиками БОПС являются параметр: глубина пробития и за броневого воздействия снаряда.

Цель данной работы определить наиболее перспективные способы увеличения основных характеристик БОПС и оценить эффективность их применения.

БОПС относится к кинетическому оружию. В таких типах боеприпасов пробитие происходит за счет кинетической энергии.

Способы увеличения кинетической энергии: повышение начальной скорости метания снаряда, увеличение скорости взаимодействия снаряда с преградой за счет снижения потери скорости полета снаряда на траектории или дополнительного разгона снаряда (его элементов) до встречи с преградой, увеличение поперечной нагрузки (отношение массы активной части снаряда к площади поперечного сечения) активной части снаряда, конструктивные приемы [1].

Повышение начальной скоростей метания снаряда может достигаться двумя способами: увеличение массы метательного заряда, за счет увеличения объема камеры, и увеличением его энергетических характеристик, создание новых метательных зарядов. Но все эти способы приводят к уменьшению износостойкости ствола, что крайне нежелательно.

Увеличение скорости взаимодействия снаряда с преградой достигается совершенствованием аэродинамических качеств его полетной части, что приводит к понижению прочностных характеристик снаряда и уменьшению глубины пробития брони [1].

Увеличение поперечной нагрузки активной части снаряда на сегодня является одним из наиболее эффективных способов. Такой способ может быть осуществлен с помощью увеличения длины бронебойного сердечника (L) по отношению к диаметру ($2R$), $L/2R$ оно составляет 20–25, а в перспективе до 40, или использование высокоплотных материалов для изготовления бронебойных сердечников и корпусов БОПС. Используют сплавы вольфрама и обедненного урана с плотностью 19 000–19 300 г/см³. Основная проблема реализации указанного решения является возможность метания снаряда большого удлинения без потери устойчивости траектории и прочностных характеристик [1].

Конструктивные приемы, которыми можно обеспечить увеличение бронепробиваемости, прочность и ударостойкость при взаимодействии с броней, что является наиболее перспективным способом увеличения характеристик и глубины пробития снаряда [1]. Например: патент США4044679 (корпус выполнен в виде концентрических оболочек из прочных волокон

карбида вольфрама, гафния или из прочной ленты, намотанной на броневой сердечник, что влияет на поперечные нагрузки активной части снаряда при пробитии преграды).

В снаряде ЗБМ-42 «МАНГО» [1] для увеличения глубины пробития броневые стержни были выполнены из высокопрочного сплава вольфрама, благодаря чему увеличивается глубина пробития брони.

В момент израсходования кинетической энергии броневое стержня, при пробитии брони, происходит застревание броневое стержня в броне, что приводит к закупориванию отверстия проделанного броневым стержнем в броне, или частичное пробитие, в результате которого осколки, образованные от броневое стержня и разрушения брони, имеют минимальную массу, скорость и количество, что не может обеспечить высокую вероятность поражения цели заброневом пространстве.

Проблему можно решить введением в головную часть снаряда броневое сердечника эллипсоидную полость облицованную медью (рис. 1), влияющую на увеличение глубины пробития брони.

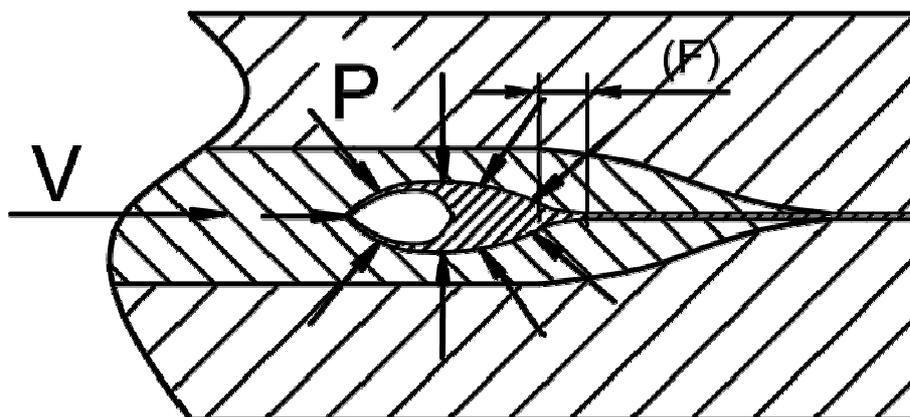


Рис. 1. БОПС с эллипсоидной полостью облицованной медью

При прохождении такого броневое сердечника БОПС происходит его обжатие материалом брони в зоне всестороннего сжатия. Вследствие этого по броневому сердечнику пробегает упруго-пластичная волна сжатия, которая схлопывает эллипсоидную полость, облицованную медью, благодаря чему формируется, на некотором фокусном расстоянии (F) кумулятивная струя из медной облицовки и имеющая скорость выше 5 000 м/с, обеспечивающая дополнительное пробитие брони и повышающая вероятность поражения цели.

В статье были выделены физические процессы, влияющие на повышение эффективности БОПС, и предложен новый подход для проектирования БОПС (для пробития преграды используется кинетическая и кумулятивная энергия).

Литература

1. Боеприпасы: учебник: в 2 т. / под ред. В.В. Селиванова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.
2. Заявка №2018125161 «Бронебойный оперенный подкалиберный снаряд» / А.В. Гуськов, К.Е. Милевский, В.П. Халеменчук.
3. Патент 168767, МКИ F42B 14/06(2006/01) Российская Федерация. Бронебойный оперенный подкалиберный снаряд Осколочно-фугасный снаряд / А.В. Гуськов, К.Е. Милевский, А.С. Долматов, Е.А. Кузнецов № 2016129950; заявл. 2016-07-20; опубл. 2017-02-17, Бюл. №5.
4. Патент 157003, МКП F42B 12/10(2006/01) Российская Федерация. Кумулятивный боеприпас / А.В. Гуськов, К.Е. Милевский, А.С. Долматов, Е.А. Корнаков. № 2015125879/03; заявл. 2015-06-29; опубл. 2016-11-20, Бюл. №32.
5. Эксплозивные вещества: учебник / В.В. Андреев, А.В. Гуськов, К.Е. Милевский. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2001.

References

1. Ammunition: textbook: 2 tons / under the General ed. V.V. Selivanov. B75 Moscow: IZDATEL'stvo MGTU im. N.Eh. Bauman, 2016.
2. Application No. 2018125161 "feathered Armor-piercing projectile" / A. Guskov, K.E. Milevsky, V.P. Halemanu.
3. Patent 168767, MКИ F42B 14/06(2006/01) Russian Federation. Feathered armor-piercing projectile high-explosive shells / A.V. Guskov, E.K. Bogdanov, A.S. Dolmatov, E.A. Kuznetsov) No. 2016129950; Appl. 2016-07-20; publ. 2017-02-17, bul. No. 5.
4. Patent 157003, Inc F42B 12/10(2006/01) Russian Federation. Cumulative ammunition / A.V. Guskov, E.K. Bogdanov, A.S. Dolmatov, E.A. Kornakov) No. 2015125879/03; Appl. 2015-06-29; publ. 2016-11-20, Byul. No. 32.
5. Explosive substances: textbook: V.V. Andreev, A.V. Guskov, K.E. Milevsky Novosibirsk: Publishing House of NSTU 20.

Секция 2

Численные методы, алгоритмы, программы и точные решения задач механики сплошных сред

Председатель
к.ф.-м.н., Борзенко Е.И.

Математическое моделирование,
Алгоритмы,
Пакеты прикладных программ,
Напряженно-деформированное состояние,
Сложные модели механики сплошных сред,

Session 2

Numerical methods, algorithms, programs and exact solutions of contin- uum mechanics problems

Chair

Ph.D. Evgeny Borzenko

Mathematical modeling,
The algorithms,
Computer programs,
Stress-strain state,
Complex models of continuum mechanics

ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПОТЕРЬ НА ТРЕНИЕ И РАССЕЯНИЕ В СОПЛАХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

К.Л. Алигасанова, К.В. Костюшин, Р.Ю. Бургомистренко

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
aligasanova@gmail.com

Ключевые слова: газовая динамика, сопло Лавалья, течение идеального газа, потери на трение и рассеивание.

Аннотация. Разработана программа расчета, которая позволяет визуализировать контур сопла и построить графики зависимостей параметров течения идеального газа по всей длине сопла. Графический интерфейс программного комплекса разработан с использованием технологии Windows Presentation Foundation (WPF). Программа позволяет проводить расчеты по определению коэффициентов потерь из-за трения газа о стенки и рассеяние вследствие непараллельности вектора скорости в выходном сечении оси сопла на выходе из сопла. Для этого используется инженерный метод Добровольского. Верификация программы проведена путем сравнения с известными решениями.

THE PROGRAM OF CALCULATION OF FRICTION LOSSES AND SCATTERING IN THE NOZZLES OF ROCKET MOTORS

K.L. Aligasanova, K.V. Kostyushin, R.Yu. Burgomistrenko

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

Keywords: gas dynamics, Laval nozzle, ideal gas flow, friction losses and dispersion.

Abstract. The program of calculation is developed, which allows to visualize the nozzle contour and to plot the dependence of the parameters of the ideal gas flow along the entire length of the nozzle. Graphical interface of the software is used WPF technologies. The program allows you to carry out calculations to determine the coefficients of losses and expenses, as well as immeasurably depending on how it happens. For this purpose, the engineering method of Dobrovolsky is used. Verification of the program is carried out by comparison with known solutions.

Исследование течений в соплах и газовых трактах двигателей проводят с целью проектирования сопел и определения параметров потока, расчета потерь тяги, процессов тепло- и массообмена. На основе этого профилируются эффективные сопла современных ракетных двигателей.

Цель работы заключается в разработке программы расчета газодинамических характеристик течения и потерь тяги на трение и рассеяние в сопле. Методика расчета идеального течения в сопле основана на определении параметров потока с использованием газодинамических функций.

Решение нелинейного уравнения для определения коэффициента приведенной скорости осуществляется с помощью метода Ньютона. Для расчета газодинамических потерь на рассеяния, вследствие непараллельности вектора скорости в выходном сечении оси сопла, используется инженерный метод Добровольского. Значения определяются на срезе сопла. Потери на трение газа о стенки сопла рассчитаны с помощью полуэмпирической методики, изложенной в [1].

Программа расчета позволяет визуализировать контур сопла и построить графики зависимости температуры, давления, скорости, плотности газового потока, числа Маха вдоль оси сопла. Графический интерфейс программного комплекса разработан с использованием технологии WPF.

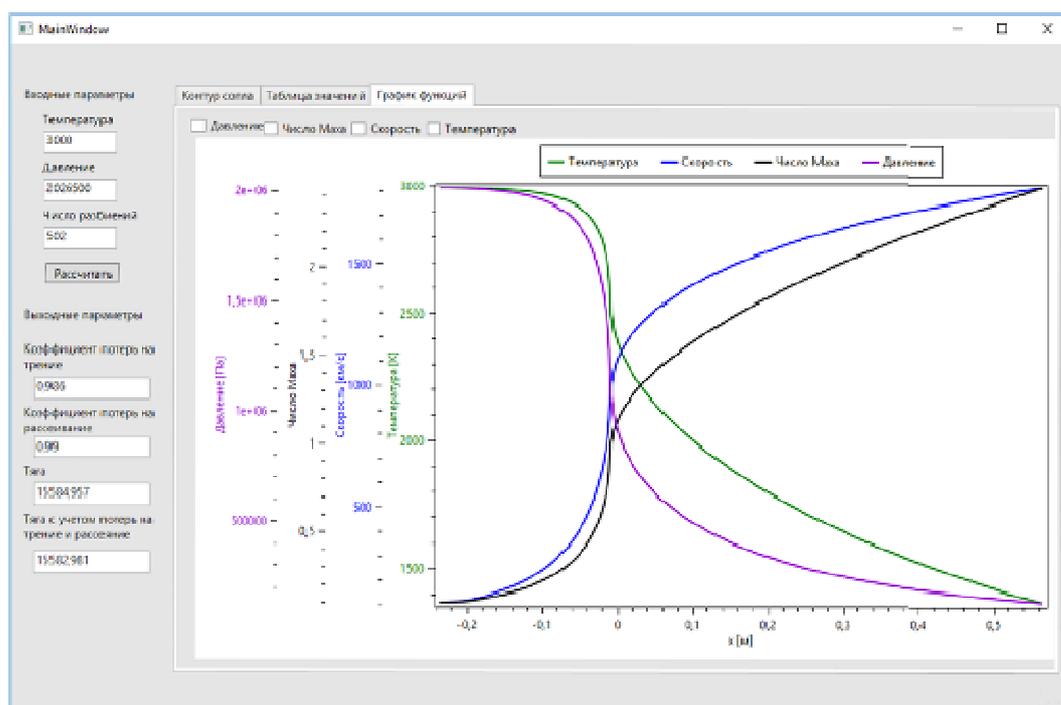


Рис. 1. Интерфейс приложения

В результате работы реализована программа расчета газодинамических параметров течения в сопле Лавала и визуализация формы сопла. Проведены расчеты тяги камеры, коэффициентов потерь из-за трения газа о стенки и рассеивания скорости на выходе из сопла. Результаты расчетов для сопла JPL (Jet Propulsion Laboratory) [2], полностью подтвердили работоспособность разработанной программы и методики.

Литература

1. *Добровольский М.В.* Жидкостные ракетные двигатели / М.В. Добровольский. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 474 с.

2. *Костюшин К.В., Шуварилов В.А.* Сравнение схем типа «MUSCL» для расчета течений идеального газа в соплах Лавалья // Вестн. Томск. гос. ун-та. Матем. и мех., 2018, №54. С. 79–87.

3. *Алемасов В.Е.* Теория ракетных двигателей / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин. М.: Машиностроение, 1989. 462 с.

4. *Дорофеев А.А.* Основы теории тепловых ракетных двигателей / Теория, расчет и проектирование: учебник / А.А. Дорофеев. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана Н.Э., 2014. 571 с.

References

1. *Dobrovolsky M.V.* Liquid rocket engines / M.V. Dobrovolsky-Moscow: MGTU im. N.Uh. Bauman, 2016. 474 p.

2. *Kostyushin K.V., Shuvarikov V.A.* Comparison of “MUSCL” type schemes for calculating ideal gas flows in Laval nozzles, Vestn. Tomsk. state un-that. Mat and fur., 2018, number 54, 79–87.

3. *Alemasov V.E.* The Theory of rocket engines / V.E. Alemasov, A.F. Dregalin, A.P. Tishin. Moscow: Mechanical Engineering, 1989. 462 p.

4. *Dorofeev A.A.* Fundamentals of the theory of thermal rocket engines / Theory, calculation and design: textbook / A.A. Dorofeev. 3rd edition, revised and enhanced. M.: Publisher MSTU it Bauman N.E., 2014. 571 p.

УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОЧНОСТЬ ТОЛСТОСТЕННОЙ ТРУБЫ ПРИ ДЕЙСТВИИ ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ

В.Н. Барашков, М.Ю. Шевченко

Томский государственный архитектурно-строительный университет, Россия
umibozu1207@yandex.ru

Ключевые слова: толстостенная труба, несжимаемый материал, диаграмма Прандтля, упругопластическая деформация, напряжения, прочность.

Аннотация. В работе представлены результаты расчёта аналитическим методом напряжённно-деформированного состояния и прочности цилиндрических труб различной геометрии. Материал конструкции считается идеальным упругопластическим, для которого зависимость между интенсивностями напряжений и деформаций описывается диаграммой Прандтля. Исчерпание несущей способности трубы происходит тогда, когда с увеличением давления зона упругопластических деформаций, распространяясь от внутренней поверхности трубы и уменьшая упругую зону деформирования, доходит до наружной поверхности. Из условия прочности получены значения расчётного давления, сохраняющие наличие упругих зон и не приводящие к разрушению конструкции.

$p_{calc} = 160,08$ МПа. Труба № 2: $b/a = 1,071$, $a = 1,40$ м, $b = 1,50$ м, $h = 0,10$ м, $c = 1,422$ м, $q = 0,058\sigma_T = 13,34$ МПа, $p_{calc} = 17,598$ МПа. Результаты для напряжений представлены на рис. 1 и 2, соответствующих номерам труб. Для трубы № 1 с увеличением расчётного давления до 204,487 МПа толщина упругопластической зоны увеличивается с 25 до 35% толщины конструкции.

Достоверность результатов для труб различной геометрии подтверждается результатами тестовых расчётов; выполнением граничных условий для радиальных напряжений σ_r ; отсутствием скачков напряжений на границе зон деформирования $r=c$; выполнением условия пластичности Губера–Мизеса и диаграммы Прандтля в упругопластической зоне; одинаковой величиной осевого напряжения σ_z в упругой зоне; равенством абсолютной величины напряжений σ_r и q на границе зон; линейным законом распределения радиального перемещения по толщине конструкции.

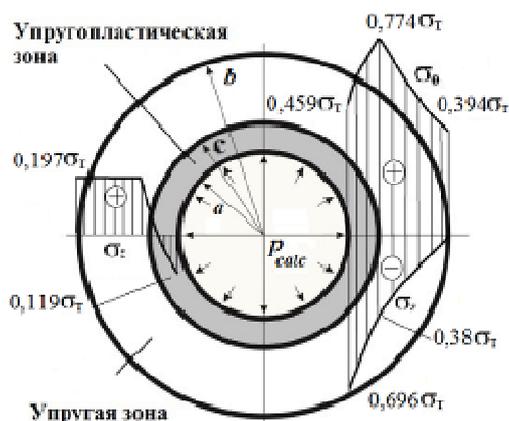


Рис. 1. Напряжения в трубе № 1

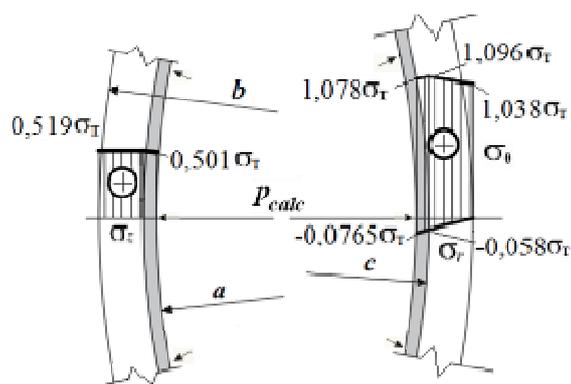


Рис. 2. Напряжения в трубе № 2

Разработанный метод позволяет проводить оценку напряжённо-деформированного состояния и расчёт прочности толстостенных труб различной геометрии с позиций осесимметричной плоской задачи теории упругости и пластичности. Для более полной реализации свойств материала при расчёте прочности трубы следует выбирать величину расчётного внутреннего давления p_{calc} ближе к значению предельного давления $p_a = p_{apr}$, при котором упругопластические деформации распространяются на всю толщину трубы.

Литература

1. Киликовская О.А., Овчинникова Н.В., Пендюрина М.Н. О влиянии упругой сжимаемости и упрочнения материала на решение упругопластической задачи для

толстостенной трубы под действием внутреннего или внешнего давления // Вестник Тул. гос. ун-та. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2010. Т. 16. Вып. 1. С. 72–87.

2. Александров С.Е., Гольдштейн Р.В. Расчет толщины стенки трубопровода под внутренним давлением при произвольном законе упрочнения // Деформация и разрушение материалов. 2011. № 9. С. 15–25.

3. Артемов М.А., Ларин И.А., Потанов Н.С. Распределение напряжений и деформаций в цилиндрической трубе при выборе кусочно-линейного условия пластичности // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. 2010. Т. 6. № 9. С. 117–119.

4. Барашков В.Н., Шевченко М.Ю. Анализ упругопластического напряжённого состояния цилиндрической трубы, нагруженной внутренним давлением // Вестник Том. гос. архитектурно-строительного ун-та. 2018. Т. 20. № 3. С. 100–111.

References

1. *Kilikovskaya O.A., Ovchinnikova N.V. Pendyurina M.N.* On the effect of elastic compressibility and hardening of the material on the solution of the elasticplastic problem for a thick-walled pipe under the action of internal or external pressure. Vestnik Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematika. Mekhanika. Informatika. 2010. Vol. 16. No. 1. Pp. 72–87. (rus)

2. *Alexandrov S.E., Goldstein R.V.* Wall thickness calculation of pipeline under internal pressure and arbitrary law of hardening. Deformatsiya i razrushenie materialov. 2011. No. 9. Pp. 15–25. (rus)

3. *Artemov M.A., Larin I.A., Potapov N.S.* Distribution of stresses and strains in a cylindrical pipe when choosing a piecewise linear plasticity condition. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2010. Vol. 6. No. 9. Pp. 117–119. (rus)

4. *Barashkov V.N., Shevchenko M.Yu.* Elastoplastic stress state of cylindrical pipe under internal pressure. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta // Journal of Construction and Architecture. 2018. Vol. 20. No. 3. Pp. 100–111. (rus)

РЕШЕНИЕ БИГАРМОНИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ В НЕРЕГУЛЯРНЫХ ОБЛАСТЯХ МЕТОДОМ КОЛЛОКАЦИИ И НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

В.А. Беляев

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
Россия
belyaevasily@mail.ru

Ключевые слова: метод коллокации и наименьших квадратов, неоднородные бигармонические уравнения, повышенный порядок аппроксимации, нерегулярные области, двойные сплайны.

Аннотация. В работе предложен и реализован вариант метода коллокации и наименьших квадратов повышенной точности для численного решения неоднородного бигармонического уравнения. Реализованный алгоритм применяется в нерегулярных областях, границы которых заданы аналитическими кривыми, в частности сплайнами.

Приведено сравнение полученных результатов с известными результатами других авторов, которые использовали конечно-разностный метод повышенного порядка аппроксимации. В качестве приложения решение неоднородного бигармонического уравнения использовано для моделирования напряженно-деформированного состояния изотропных тонких пластин нерегулярных форм.

SOLVING THE BIHARMONIC EQUATION IN IRREGULAR DOMAINS BY THE LEAST SQUARES COLLOCATION METHOD

Vasily Belyev

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Russian Federation
belyaevasily@mail.ru

Keywords: least squares collocation method, nonhomogeneous biharmonic equations, high order approximation, irregular domains, double splines.

Abstract. This paper addresses a new version of the least squares collocation method of high order accuracy proposed and implemented for the numerical solution of the nonhomogeneous biharmonic equation. The algorithm implemented is applied in irregular domains. The boundaries of these domains are given by analytical curves, in particular, by splines. The numerical results are compared with those found by other authors who used a high order finite difference method. The nonhomogeneous biharmonic equation is used to model the stress-strain state of isotropic thin irregular plates as an application.

Предложен и реализован новый вариант метода коллокации и наименьших квадратов (КНК) повышенной точности [1] для численного решения неоднородного бигармонического уравнения. Дифференциальная задача методом КНК проектируется в пространство полиномов четвертой и восьмой степеней. Реализованный алгоритм применяется в нерегулярных областях, границы которых заданы аналитическими кривыми, в частности сплайнами. Для приближенного и однозначного восполнения границы области по ее дискретным данным в прямоугольной системе координат строится параметрический двойной сплайн, в качестве компонент которого взяты два кубических сплайна. Исходная нерегулярная область включается в прямоугольник, который покрывается регулярной сеткой с прямоугольными ячейками. На границе области используется “одинарный” слой нерегулярных ячеек (н-ячеек), отсеченных границей от прямоугольных граничных ячеек начальной регулярной сетки. Все н-ячейки разбиваются на два класса: самостоятельные, в которых находится центр содержащих их граничных ячеек, и несамостоятельные, центр содержащих их граничных ячеек которых расположен вне области.

Вытянутые несамостоятельные граничные н-ячейки присоединяются к соседним самостоятельным ячейкам, и в объединенных ячейках строится свой отдельный кусок аналитического решения. При этом в граничных

ячейках, которые пересекла граница, для аппроксимации дифференциальных уравнений использованы “законтурные” (расположенные вне расчетной области) точки коллокации и точки согласования решения задачи. Эти два приема позволили существенно уменьшить обусловленность системы линейных алгебраических уравнений приближенной задачи по сравнению со случаем, когда несамостоятельные n -ячейки использовались как самостоятельные для построения приближенного решения задачи, и не была использована “законтурная” часть граничных ячеек. В численных экспериментах по сходимости приближенного решения различных задач на последовательности сеток установлено, что решение сходится с повышенным порядком и с высокой точностью совпадает с аналитическим решением задачи в случае, когда решение известно. Приведено сравнение полученных результатов (например, см. табл. 1, где $N_1 \times N_2$ – размер сетки, E_{N_1, N_2} – значение абсолютной погрешности) с известными результатами других авторов, которые использовали конечно-разностный метод повышенного порядка аппроксимации [2–5]. В качестве приложения решение неоднородного бигармонического уравнения использовано для моделирования напряженно-деформированного состояния изотропных тонких пластин нерегулярных форм.

Таблица 1

Результат численного эксперимента с тестовым решением $u(x_1, x_2) = e^{x_1 + x_2}$ в единичном круге $x_1^2 + x_2^2 \leq 1$							
$N_1 \times N_2$	Работа [3]		$N_1 \times N_2$	Метод КНК		Работа [5]	
	E_{N_1, N_2}	$\log_2 \frac{E_{N_1/2, N_2/2}}{E_{N_1, N_2}}$		E_{N_1, N_2}	$\log_2 \frac{E_{N_1/2, N_2/2}}{E_{N_1, N_2}}$	E_{N_1, N_2}	$\log_2 \frac{E_{N_1/2, N_2/2}}{E_{N_1, N_2}}$
64×3	3.2 (-4)	–	8×8	4.0 (-4)	–	8.4 (-6)	–
64×6	8.1 (-5)	1.98	16×16	5.1 (-6)	2.98	1.4 (-6)	2.6
64×11	2.0 (-5)	1.99	32×32	3.4 (-7)	3.91	1.4 (-8)	6.6
64×2	5.1 (-6)	1.99	64×64	1.5 (-8)	4.46	–	–

Литература

1. Belyaev V.A., Shapeev V.P. Solving the Biharmonic Equation in Irregular Domains by the Least Squares Collocation Method // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 19. No 5. Pp. 0300094-1–0300094-9. DOI: 10.1063/1.5007560.
2. Altas I., Dym J., Gupta M.M., Manohar R.P. Mutigrid solution of automatically generated high-order discretizations for the biharmonic equation // SIAM J. Sci. Comput. 1998. Vol. 19. No 5. Pp. 1575–1585. DOI: 10.1137/S1464827596296970.

3. *Lai M.C., Liu H.C.* Fast direct solver for the biharmonic equation on a disk and its application to incompressible flows // *Applied Mathematics and Computation*. 2005. Vol. 164. No 3. Pp. 679–695. DOI: 10.1016/j.amc.2004.04.064.

4. *Chen G., Li Z., Lin P.* A fast finite difference method for biharmonic equations on irregular domains and its application to an incompressible Stokes flow // *Advances in Computational Mathematics*. 2007. Vol. 29. No 2. Pp. 113–133. DOI: 10.1007/s10444-007-9043-6.

5. *Ben-Artzi M., Chorev I., Croisille J.P., Fishelov D.* A Compact Difference Scheme for the Biharmonic Equation in Planar Irregular Domains // *SIAM J. Numer. Anal.* 2009. Vol. 47. No 4. Pp. 3087–3108. DOI: 10.1137/080718784.

References

1. *Belyaev V.A., Shapeev V.P.* Solving the Biharmonic Equation in Irregular Domains by the Least Squares Collocation Method // *AIP Conference Proceedings*. 2018. Vol. 19. No 5. Pp. 0300094-1–0300094-9. DOI: 10.1063/1.5007560.

2. *Altas I., Dym J., Gupta M.M., Manohar R.P.* Mutigrid solution of automatically generated high-order discretizations for the biharmonic equation // *SIAM J. Sci. Comput.* 1998. Vol. 19. No 5. Pp. 1575-1585. DOI: 10.1137/S1464827596296970.

3. *Lai M.C., Liu H.C.* Fast direct solver for the biharmonic equation on a disk and its application to incompressible flows // *Applied Mathematics and Computation*. 2005. Vol. 164. No 3. Pp. 679–695. DOI: 10.1016/j.amc.2004.04.064.

4. *Chen G., Li Z., Lin P.* A fast finite difference method for biharmonic equations on irregular domains and its application to an incompressible Stokes flow // *Advances in Computational Mathematics*. 2007. Vol. 29. No 2. Pp. 113–133. DOI: 10.1007/s10444-007-9043-6.

5. *Ben-Artzi M., Chorev I., Croisille J.P., Fishelov D.* A Compact Difference Scheme for the Biharmonic Equation in Planar Irregular Domains // *SIAM J. Numer. Anal.* 2009. Vol. 47. No 4. Pp. 3087–3108. DOI: 10.1137/080718784.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛА В МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАСТИНАХ

Р.Ю. Бургомистренко, К.Л. Алигасанова, И.В. Еремин

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
roman.kripton@gmail.com

Ключевые слова: многослойные пластины, уравнение теплопроводности, метод прогонки.

Аннотация. Разработана методика и программа расчета для численного моделирования распределения тепла в многослойных тонких пластинах на основе решения одномерного не стационарного уравнения теплопроводности. Предполагается, что между пластинами осуществляется идеальный контакт. В программе расчета реализована возможность задания произвольного числа пластин, их толщины и теплофизических характеристик. Результаты проведенных тестовых исследований не противоречат известным решениям.

THE DEVELOPMENT OF A PROGRAM OF CALCULATION TO DETERMINE THE HEAT DISTRIBUTION IN MULTILAYERED PLATES

R.Yu. Burgomistrenko, K.L. Aligasanova, I.V. Eremin

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

Keywords: thermal conductivity, method of running, multilayer plate.

Abstract. A method and a calculation program have been developed for numerical modeling of heat distribution in multilayer thin plates based on the solution of a one-dimensional non-stationary heat equation. It is assumed that perfect contact is made between the plates. In the calculation program, the ability to specify an arbitrary number of plates, their thickness and thermal characteristics is implemented. The results of the conducted test studies do not contradict the known solutions.

Многослойные пластины находят широкое применение в различных областях техники, строительстве, самолетостроении, судостроении, электротехнике и т.д.

Цель настоящей работы заключается в разработке методики и программы расчета распределения тепла в многослойных пластинах.

Методика расчета основана на решении дифференциального уравнения теплопроводности с учетом изменения теплофизических свойств материалов. При решении уравнения используется метод конечных разностей (МКР) [1]. Идея данного метода заключается в замене производных их конечноразностной аппроксимацией. Полученная СЛАУ решается методом прогонки с учетом начальных и граничных условий. Предполагается, что между пластинами осуществляется идеальный контакт, поэтому на поверхности контакта слоев задаются граничные условия четвертого рода [2].

Разработаны алгоритм, методика и программа расчета. Графический интерфейс программного комплекса разработан в среде Microsoft Visual Studio на языке программирования C#. Графический интерфейс программы разработан с использованием технологии WPF. Пользовательский интерфейс позволяет задавать произвольное количество пластин, их толщину и теплофизические характеристики, время, формировать задание начальных и граничных условий (1–4 родов). Наиболее часто используемые материалы занесены в базу данных с возможностью дополнения ее пользователем. Результаты расчетов представляются в графическом и текстовом виде. На рис. 1 приведено распределение температуры по толщине двухслойной (сталь–медь) пластины. На левой и правой границе заданы условия первого рода.

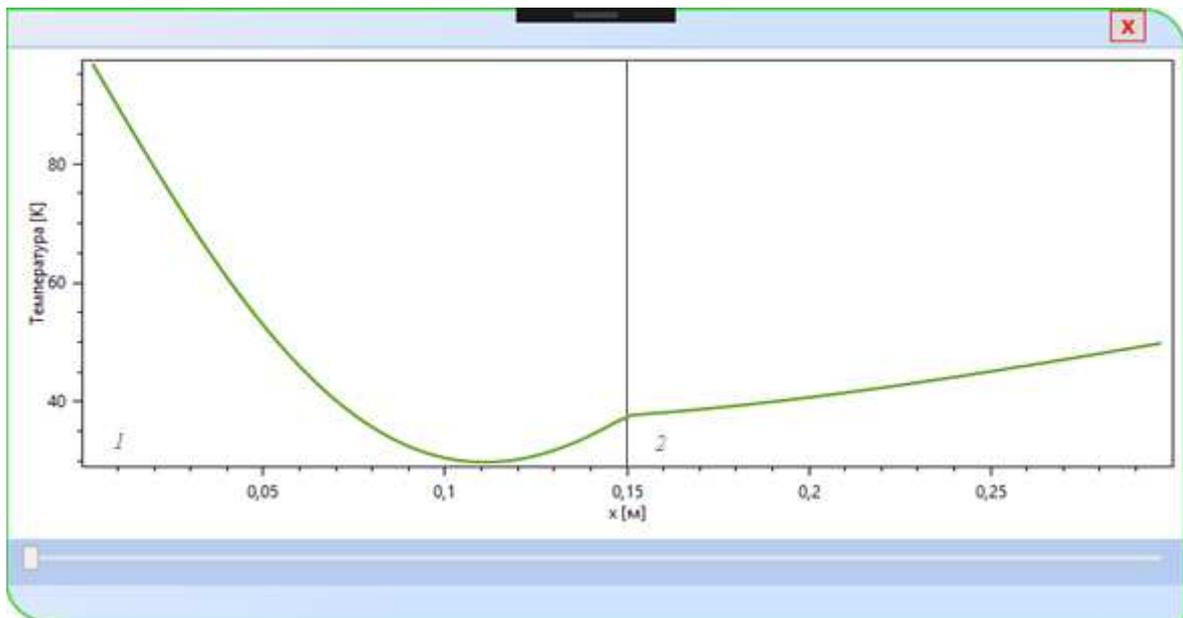


Рис. 1. Распределение температуры по толщине на примере двухслойной пластины за $t=180$ с (1 – сталь; 2 – медь)

В результате работы реализована методика и программа расчета распределения тепла в многослойных пластинах. Интерфейс пользователя позволяет формировать исходные данные, включая граничные условия и характеристики материалов, а также визуализировать результаты расчетов. Методика и программа расчета апробирована путем сравнения с аналитическим решением [3], и может быть использована для решения практических инженерных задач.

Литература

1. Крайнов А.Ю., Миньков Л.Л. Численные методы решения задач тепло- и массопереноса: учеб. пособие. Томск: STT, 2016. 92 с.
2. Коновалов В.И., Пахомов А.Н., Гатапова Н.Ц., Колиух А.Н. Методы решения задач теплопереноса. Теплопроводность и диффузия в неподвижной среде: учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. 80 с.
3. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности: учеб. пособие / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 172 с.

References

1. Kraynov A.Yu., Minkov L.L. Numerical methods for solving problems of heat and mass transfer: studies allowance. Tomsk: STT, 2016. 92 p.
2. Konovalov V.I., Pakhomov A.N., Gatapova N.Ts., Koliukh A.N. M54 Methods for solving problems of heat and mass transfer. Thermal conductivity and diffusion in a stationary medium: Proc. allowance. Tambov: Publishing House Tamb. state tech. University, 2005. 80 p.
3. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Difference methods of solving problems of thermal conductivity: textbook/ G.V. Kuznetsov, M.A. Sheremet. Tomsk: TPU publishing House, 2007. 172 p.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.С. Васильев, В.П. Назарова

Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Россия
vasil-grunt@mail.ru

Ключевые слова: математическая модель, прочность, материал, методика, конструкция.

Аннотация. В работе разработана методика исследования конструкций из композитных материалов в области предельной прочности, с учетом изменения механических характеристик этих материалов в результате нагружения конструкции. По данной методике, для конструкции из композитного материала, смоделированной объемными конечными элементами, при простых напряженных состояниях, расчетным путем можно определить напряженно-деформированное состояние на различных этапах нагружения, вплоть до предельного. При этом можно учитывать любое количество составляющих в пределах конечного элемента. Эти составляющие характеризуются своими объемами, и данную методику можно применить для композитов, имеющих в своем составе инородные включения, газовые пузыри, технологические отверстия. Проведены анализ и систематизация критериев прочности материалов. Для реализации полученной методики разработаны следующие программы: «Composit», «Strength», «Ultimate State», «Программа для расчета конструкций из композитных материалов». Результаты расчетов конструкций из железобетона с применением данных программных продуктов сопоставлялись с результатами расчетов в программных комплексах ЛИРА и ANSYS.

DEVELOPMENT OF METHODS OF CALCULATION OF STRUCTURES MADE OF COMPOSITE MATERIALS

A. Vasilyev, V. Nasarova

Priamursky State University named after Sholom Aleichem, Russian Federation
vasil-grunt@mail.ru

Keywords: mathematical model, strength, material, method, construction.

Abstract. In this paper, a method of study of structures made of composite materials in the field of ultimate strength, taking into account changes in the mechanical characteristics of these materials as a result of loading the structure. According to this method, for a structure made of composite material modeled by three-dimensional finite elements, at simple stress States, it is possible to determine h at various stages of loading, up to the limit. Any number of components within a finite element can be taken into account. These components are characterized by their volumes, and this technique can be used for composites that have in their composition foreign inclusions, gas bubbles, technological holes. The analysis and systematization of criteria of strength of materials are carried out. To implement the obtained method, the following programs were developed: " composite", " Strength", " Ultimate State", program

for calculation of structures made of composite materials". The results of calculations of reinforced concrete structures with the use of these software products were compared with the results of calculations in the LIRA and ANSYS software systems.

Компонентами композитов являются самые разнообразные материалы: металлы, керамика, стекла, пластмассы. В наше время распространены полимерные композитные материалы: стеклопластики, углепластики, органические композиты. Традиционным композитом является железобетон, сочетающий в себе совместную работу бетона и стальной арматуры, активно используемый в строительстве зданий и сооружений. Существуют различные подходы и методики для расчета строительных конструкций из железобетона. При этом, исходя из действующих нормативных документов, расчет ведется по двум группам предельных состояний: по несущей способности и по пригодности к нормальной эксплуатации. М.Т. Suidan и W.C. Schnobrich [1] одними из первых применили пространственные изопараметрические конечные элементы для расчетов балок.

Первые нелинейные методики расчета железобетонных конструкций с использованием шагового итерационных методов расчета использовали в своих трудах А. Nilson [2], Н.А. Franklin [3], V. Cervenka [4].

Композитные материалы активно используют в различных современных отраслях промышленности: строительстве, автомобилестроении и кораблестроении. Большая распространенность композитов требует изучения их свойств, влияющих на жесткость и несущую способность конструкций на разных этапах их работы под нагрузкой. Расчет таких конструкций можно выполнять методом конечных элементов с использованием шагово-итерационных процедур на базе математических моделей и общих принципов механики деформируемого твердого тела, а также численных методов решения физически нелинейных задач. Это позволяет проследить за характером напряженно-деформированного состояния конструкций на различных этапах нагружения, включая предельные.

Следует отметить, что существуют различные подходы для учета совместной работы нескольких материалов в составе одного, при изменении механических характеристик этих материалов под нагрузкой. Однако единой, общей методики для этого на настоящий момент нет.

Разработанная авторами математическая модель и матрица жесткости представлена в работах [5, 6].

Цель работы: разработать математическую модель и методику расчета линейных и физически нелинейных задач численного исследования композитных материалов и конструкций в области их предельных состояний.

Для достижения поставленной цели, были определены следующие задачи:

1. Провести анализ и систематизацию критериев прочности материалов и конструкций.

2. На основе выбранного критерия построить математическую модель для исследования прочности композитных материалов на основе метода конечных элементов.

3. Разработать численные процедуры и спроектировать программный комплекс, для численного исследования композитов в области предельной прочности.

4. Разработать методику для численного исследования напряженно-деформированное состояние конструкций из композитных материалов на различных этапах статического нагружения, включая предельные.

5. Выполнить тестирование и практическую апробацию математической модели и программного комплекса.

6. Выполнить сопоставление и анализ полученных результатов.

7. Сделать выводы и рекомендации по применению данной математической модели, методики и программного комплекса

Заключение.

Сформулированы рекомендации по применению данной методики для расчетов конструкций из композитных материалов.

Разработанная методика расчета может применяться:

– для установления разрушающей нагрузки и максимальных перемещений и деформаций при разрушении конструкций из композитных материалов при простых напряженных состояниях. Данные предельные состояния рассматриваемых в работе конструкций (балок и рам) возникают в результате превышения предела текучести армирующих элементов (арматуры) в растянутой зоне;

– для исследования напряженно-деформированного состояния, установления перемещений, напряжений и деформаций на каждом этапе нагружения конструкции;

– для определенных видов конструкций, в зависимости от их назначения, при ограничении деформаций эстетико-психологическими, технологическими и конструктивными требованиями;

– для установления опасных зон и зон разрушения конструкции на различных этапах нагружения, включая предельные. Предельное состояние конструкции может наступать при разрушении связующего в поперечном сечении конструкции;

– для расчетов композитов, имеющих в своем составе инородные включения, газовые пузыри, технологические отверстия. При этом можно учитывать любое количество составляющих внутри композита в пределах конечного элемента.

Аппроксимированные функциональные зависимости диаграмм деформирования материалов, используемые в методике, могут быть применены как для расчетов конструкций, так и для построения более общих математических моделей и поверхностей прочности, относящихся к сложным напряженным состояниям.

Литература

1. *Suidan M.T.* Finite element analysis of reinforced concrete / M.T. Suidan, W.C. Schnobrich // Journal of the structural division. ASCE, 1973. Vol. 99. Pp. 2109–2122.
2. *Nilson A.* Internal Measurement of Bond Slip / A. Nilson // Journal of ACI, 1972. Vol. 69. Title № 7. Pp. 439–441.
3. *Franklin H.A.* Non-Linear Analysis of Reinforced Concrete Frames and Panels / H.A. Franklin // Division of Structural Engineering and Structural Mechanics: University of California. Berkley, 1970. 140 p.
4. *Cervenka V.* Inelastic Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Panels / V. Cervenka // University of Colorado: Boulder, 1970. 210 p.
5. Разработка конечного элемента для конструкций из гетерогенной среды с металлической составляющей / А.С. Васильев, Н.А. Тарануха // Вестник Приамурского гос. ун-та им. Шолом-Алейхема. 2016. № 4 (25). С. 19–31.
6. *Тарануха Н.А., Васильев А.С.* Численное исследование конструкций из гетерогенных сред на основе метода конечных элементов // Вестник Приамурского гос. ун-та им. Шолом-Алейхема. 2017. № 1 (26). С. 90–102.

References

1. *Suidan M.T.* Finite element analysis of reinforced concrete / M.T. Suidan, W.C. Schnobrich // Journal of the structural division. ASCE, 1973. Vol. 99. Pp. 2109–2122.
2. *Nilson A.* Internal Measurement of Bond Slip / A. Nilson // Journal of ACI, 1972. Vol. 69. Title № 7. Pp. 439–441.
3. *Franklin H.A.* Non-Linear Analysis of Reinforced Concrete Frames and Panels / H.A. Franklin // Division of Structural Engineering and Structural Mechanics: University of California. Berkley, 1970. 140 p.
4. *Cervenka V.* Inelastic Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Panels / V. Cervenka // University of Colorado: Boulder, 1970. 210 p.
5. Development of a finite element for structures made of heterogeneous medium with a metal component / A.S. Vasiliev, N. Taranukha // A Vestnik of the Amur state University. Sholom-Aleichem. 2016. № 4 (25). Pp. 19–31.
6. *Taranukha N.A., Vasiliev A.S.* Numerical study of structures of heterogeneous media on the basis of the finite element method Bulletin of Priamursky state University. Sholom-Aleichem. 2017. № 1 (26). Pp. 90–102.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КЛАССИФИКАЦИИ ПОРОШКОВ НИТРИДОВ МЕТАЛЛОВ

Н.С. Евсеев

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
evseevns@gmail.com

Ключевые слова: классификация микропорошков, нитрид алюминия, нитрид титана, нитрид хрома, закрученное турбулентное течение.

Аннотация. В работе проводится численное исследование аэродинамики и процесса классификации порошков нитридов металлов в воздушно-центробежном класси-

каторе. Проводится исследование влияния режимных параметров на процесс классификации следующих нитридов: нитрида алюминия, нитрида титана и нитрида хрома. Представлены поля компонент вектора скорости несущего газового потока, траектории движения твердых частиц нитридов металлов с учетом турбулентных пульсаций газа, построены кривые, характеризующие эффективность процесса классификации.

MODELING THE PROCESS OF CLASSIFICATION OF POWDERS OF METAL NITRIDES

Nikolay Evseev

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

Keywords: classification of micropowders, aluminum nitride, titanium nitride, chromium nitride, swirling turbulent flow.

Abstract. The paper conducts a numerical study of aerodynamics and the process of classification of powders of metal nitrides in the air-centrifugal classifier. The influence of regime parameters on the classification process of the following nitrides: aluminum nitride, titanium nitride and chromium nitride is being studied. The fields of the components of the velocity vector of the carrier gas stream, the trajectories of the motion of solid particles of metal nitrides, taking into account the turbulent pulsations of the gas, are presented.

Широкое применение нитридов металлов обусловлено их уникальными физико-химическими свойствами, например жаропрочность, коррозионная стойкость, износостойкость. Благодаря своим уникальным свойствам, нитриды металлов применяют в качестве абразивных материалов, износостойких и декоративных покрытий, сырья для получения нитридной керамики, легирующих материалов. Например, нитрид хрома обладает высокой стойкостью к окислению. Кроме того, покрытия на его основе являются износостойкими. Нитрид алюминия широко применяется в качестве материала для высокотеплопроводной керамики при производстве подложек для микроэлектроники. Нитрид титана используется в качестве жаропрочного материала (на его основе производят тигли для плавки металлов), создания износостойких покрытий, в качестве различных легирующих добавок.

Одновременно с развитием технологий возрастают и требования, предъявляемые к качеству порошков. Одним из основных требований является получение порошков заданного гранулометрического состава и одновременно высокой эффективностью разделения на заданные фракции по размеру. Как показывает мировая практика, пневматические центробежные методы позволяют решить данную проблему наиболее эффективно.

В работе проводится математическое моделирование аэродинамики и процесса классификации мелкодисперсных частиц нитрида алюминия, нитрида титана и нитрида хрома по размерам в воздушно-центробежном классификаторе. Моделирование закрученного турбулентного течения в

ВЦК основывается на численном решении системы уравнений Рейнольдса [1], которая замыкается моделью турбулентности Уилкокса [2]. Решение системы осуществляется в переменных «скорость – давление» на разнесённой разностной сетке методом физического расщепления полей скорости и давления. Диффузионные и конвективные члены уравнений переноса определяются известной экспоненциальной схемой [3]. Расчёт процессов классификации твёрдой фазы основан на массовом расчёте одиночных частиц с учётом влияния на них турбулентных пульсаций несущей среды. Достоверность полученных результатов подтверждается тестовыми расчётами, сравнением результатов с экспериментальными данными. В результате расчётов получены поля компонент вектора скорости несущей среды, представлены траектории движения частиц нитрида алюминия, нитрида титана и нитрида хрома с учетом турбулентных пульсаций несущего потока, построены кривые Тромпа, характеризующие эффективность процесса классификации частиц [4].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям в рамках выполнения программы «УМНИК», договор №11781ГУ/2017 от 03.07.2017

Литература

1. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. 840 с.
2. *Wilcox D.C.* Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models. // *AIAA J.* 1988. Vol. 26, is. 11. Pp. 1299–1310.
3. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
4. *Шваб А.В.* Моделирование процесса фракционного разделения частиц в пневматическом центробежном аппарате / А.В. Шваб, Н.С. Евсеев // *Инженерно-физический журнал.* 2016. Т. 89, № 4. С. 826–836

References

1. *Loitsyansky L.G.* Fluid and gas mechanics. M.: Science, 1987. 840 p.
2. *Wilcox D.C.* Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models. // *AIAA J.* 1988. Vol. 26, is. 11. Pp. 1299–1310.
3. *Patankar S.* Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics. M.: Energoatomizdat, 1984. 152 p.
4. *Shvab A.V.* Modeling the process of particle fractionation in a pneumatic centrifugal apparatus / A.V. Shvab, N.S. Evseev // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics.* 2016. Vol. 89, is. 4. Pp. 829–839. DOI: 10.1007/s10891-016-1443-3.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТОНКОГО ПОКРЫТИЯ НА МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ СИСТЕМЫ «ПОКРЫТИЕ–ПОДЛОЖКА» ПРИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ ИНДЕНТИРОВАНИИ

Г.М. Еремина, Д.И. Парпура

Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН,
Россия
anikeeva@ispms.ru

Ключевые слова: покрытие, индентирование, моделирование, метод подвижных клеточных автоматов.

Аннотация. Износ в паре трения составных элементов конструкции эндопротеза оказывает значительное влияние на эксплуатационный ресурс эндопротеза. В первую очередь это относится к протезам тазобедренного и коленного суставов. Структура поверхностных слоев контактирующих элементов играет ключевую роль в процессе изнашивания. Для улучшения трибологических характеристик металлических эндопротезов применяют упрочняющие наноструктурные покрытия. При этом в качестве металлической основы, как правило, используется титан, а в качестве покрытия – нитрид титана (TiN). Самым распространенным является нанесение покрытия PVD способом. Структура покрытия и его прочностные характеристики определяются режимами его нанесения. Для исследования механических свойств такой системы применяют измерительное индентирование. В данной работе с помощью численного моделирования исследуется влияние дисперсии прочностных характеристик покрытия на механический отклик системы «покрытие-подложка». По результатам моделирования было установлено, что наибольшее значение твердости имеет система, с покрытием, не имеющего разброса прочностных характеристик.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF PARAMETERS OF THIN COATING ON MECHANICAL BEHAVIOR OF THE SYSTEM "COATING-SUBSTRATE" IN INSTRUMENTED INDENTATION

Galina Eremina, Dmitriy Parpura

Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of RAS,
Russian Federation
anikeeva@ispms.ru

Keywords: coating, indentation, simulation, movable cellular automaton method.

Abstract. The wear and tear in the friction pair of the components of the endoprosthesis design has a significant impact on the endoprosthesis operational life. First of all it refers to the prostheses of the hip and knee joints. The structure of the surface layers of the contacting elements plays a key role in the wear process. To improve the tribological characteristics of metal endoprostheses, hardening nanostructured coatings are used. In this case, titanium is usually used as a metal, and titanium nitride (TiN) is used as a coating. The most common is

coating PVD. The structure of the coating and its strength characteristics are determined by the modes of its application. To study the mechanical properties of such a system used instrumented indentation. In this paper, using the numerical simulation, we study the influence of the dispersion of the strength characteristics of the coating on the mechanical response of the coating – substrate system. According to the simulation results, it was found that the system has the highest hardness value, with a coating that does not have a variation in strength characteristics.

Для лечения патологий тазобедренного сустава (ТБС) в современном мире широко применяют эндопротезирование. Износ в паре трения составных элементов конструкции эндопротеза оказывает значительное влияние на эксплуатационный ресурс эндопротеза. В первую очередь это относится к протезам тазобедренного и коленного суставов. Структура поверхностных слоев контактирующих элементов играет ключевую роль в процессе изнашивания. Для улучшения трибологических характеристик металлических эндопротезов, применяют упрочняющие наноструктурные покрытия. При этом в качестве металла, как правило, используется титан, а в качестве покрытия – нитрид титана (TiN). Структура покрытия определяется режимами его нанесения. Самым распространенным является нанесение покрытия PVD способом. Покрытие, полученное этим способом, отличается отсутствием широкой переходной зоны между материалом покрытия и подложкой. Кроме того, покрытия TiN демонстрируют дисперсию прочностных свойств, характеризующуюся распределением Вейбулла [1]. Как показано, например, в [2], процесс разрушения подчиняется модели Вейбулла, которая описывается следующей функцией распределения.

Испытания эндопротезов имеет несколько этапов: доклинические и клинические испытания. Клинические испытания проходят посредством установления эндопротеза в живой организм человека. С помощью данного испытания также определяется конечный результат. Однако при проведении клинических испытаний существует опасность, что некачественный или неправильно подобранный эндопротез может негативно отразиться на здоровье пациента, поэтому большое внимание при разработке эндопротезов уделяют доклиническим испытаниям. Доклинические исследования механического поведения эндопротеза можно разделить на экспериментальные и теоретические. Экспериментальные исследования представляют собой испытания с помощью технологической установки, имитирующей динамическое нагружение, испытываемое эндопротезом, а также стандартные методики определения трибологических свойств поверхностных слоев материалов, в частности измерительное индентирование. Теоретические исследования механического поведения эндопротеза с помощью компьютерного моделирования позволяют изучать механическое поведение эндопротезов с учетом влияния на него различных факторов, в том числе разброс прочностных характеристик

Целью данной работы является разработка численной модели процесса измерительного индентирования покрытия TiN, расположенного на титановой подложке и проведение численных расчетов с целью определения влияния разброса прочностных характеристик покрытия на механическое поведение системы «покрытие-подложка» в целом.

Для исследования влияния разброса прочностных свойств покрытия на механическое поведение системы при измерительном индентировании применялся метод подвижных клеточных автоматов. Метод подвижных клеточных автоматов является эффективным численным методом, основанным на концепции дискретных частиц, которая имеет существенные отличия от концепции численных методов, основанных на решении уравнений классической механики сплошных сред [3]. В МСА моделируемый материал рассматривается как ансамбль дискретных элементов (клеточных автоматов), взаимодействующих между собой по определённым правилам, позволяющим в рамках дискретного подхода описывать его деформационное поведение как изотропного упругопластического тела. Движение ансамбля элементов описывается уравнениями Ньютона–Эйлера. Силы и моменты, действующие между элементами, определяются функциями отклика. Для описания упругопластического поведения в рамках метода МСА в функциях отклика используется теория пластического течения, а именно модель идеальной пластичности с критерием Мизеса. Для этого к методу МСА был адаптирован известный алгоритм Уилкинса. Главным преимуществом метода для решения поставленных задач является возможность явного учета несплошностей материала и моделирование разрушения. В качестве критерия разрушения выступало предельное значение интенсивности напряжений.

Моделировался процесс измерительного индентирования. Модельный образец представлял собой параллелепипед, состоящий из титановой подложки и покрытия. Индентор задавался, как жесткий, недеформируемый из алмаза. Движение индентора задавалось через скорость в вертикальном направлении.

По данным из литературных источников [4] для тестовых расчётов образцов наноструктурного титана были выбраны следующие значения параметров: $\rho = 4500 \text{ кг/м}^3$, $G = 41 \text{ ГПа}$, $K = 100 \text{ ГПа}$, $\sigma_y = 1.0 \text{ ГПа}$, $\sigma_B = 1.25 \text{ ГПа}$ и $\varepsilon = 0/15$. Для тестовых расчётов образцов материала покрытия [5] были выбраны следующие значения параметров: $\rho = 5220 \text{ кг/м}^3$, $G = 104 \text{ ГПа}$, $K = 173 \text{ ГПа}$, $\sigma_y = 1,5 \text{ ГПа}$, $\sigma_B = 5.5 \text{ ГПа}$ и $\varepsilon = 0.075$. Исследовалось влияние параметра Вейбулла разброса прочностных характеристик системы в диапазоне от 0–15.

По результатам моделирования были построены зависимости силы вдавливания от глубины внедрения индентора. При обработке результатов моделирования с помощью методики Оливера – Фарра были определены значения твердости и модуля упругости систем. Было установлено, что

наибольшую твердость $H = 34,72$ ГПа имели системы с параметром разброса прочностных свойств материала покрытия $\beta = 0$ и $\beta = 15$. В случае с параметром распределения прочностных характеристик системы $\beta = 7.5$ и $\beta = 10$ существенной разницы в определении твердости не наблюдалось, и ее значение составила $H = 33.5$ ГПа и $H = 33,7$ ГПа соответственно. Самое низкое значение твердости $H = 33$ ГПа системы наблюдалось при $\beta = 5$. На характер разрушения системы при измерительном индентировании влияние параметра распределений прочных свойств не оказывает.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00323 (разработка численной модели и проведения расчетов) и Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг., приоритетное направление III.23 (определение модельных параметров материалов).

Литература/References

1. Borrero-López O., Hoffman M., Bendavid A., Martin P.J. Acta Mater. 56 (7) 1633–1641 (2008).
2. Rinne H. The Weibull Distribution. A Handbook (CRC Press, 2009), p. 762.
3. Shilko E.V., Psakhie S.G., Schmauder S., Popov V.L., Astafurov S.V., Smolin A.Yu. Comput. Mater. Sci. 102, 267–285 (2015).
4. Material Datasheet: TIMETAL 6-4s, Titanium Metals Corporation, Denver, Colorado, United States of America, 2000.
5. McEntire B.J., Balab B.S., Rahamanc M.N., Chevalier J., Pezzottie G., Eur J. Ceram. Soc. 35, 4327–4369 (2015)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПЬЕЗОПРИВОДОВ

Н.Н. Марицкий, Н.В. Малюга, С.В. Пономарев

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики
Томского государственного университета, Россия
nnmar@niipmm.tsu.ru

Ключевые слова: пьезопривод, двухконтурный усилитель перемещений, НДС.

Аннотация. В работе представлена перспективная конструкция пьезопривода. На основании результатов анализа существующих решений прецизионных микроприводов разработана конструкция силовой рамы пьезопривода с двухконтурным мультипликационным усилителем перемещений. Проведены оптимизация конструкции и рабочих характеристик пьезопривода, а также численный анализ напряженно-деформированного состояния силовой конструкции пьезопривода.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE ELEMENTS OF PIEZOACTUATORS

Nickolay N. Maritsky, Nikolay V. Malyuga, Sergey V. Ponomarev

Research Institute of Mathematics and Mechanics
of Tomsk State University Russian Federation
nnmar@niipmm.tsu.ru

Keywords: piezoactuator, two-frame displacement multiplier, stress-strain state.

Abstract. The paper presents a promising design of a piezoactuator. The design of the power frame of the piezoactuator on the basis of a two-frame displacement multiplier was developed, based on the results of analyzes the existing solutions of precision microdrives. The design and performance characteristics of the piezoactuator are optimized. A numerical analysis of the stress-strain state of the power structure of the piezoactuator is carried out.

В аэрокосмической отрасли одной из существенных проблем является уменьшение массогабаритных параметров систем и механизмов. Одним из решений является использование пьезоэлектрических механизмов. Пьезоэлектрические механизмы включают активные элементы из пьезоматериала и усилителя перемещений.

Применение пьезоэлектрических материалов обусловлено высокими эксплуатационными характеристиками данных материалов: высокой точностью позиционирования, большой выходной мощностью, быстрой динамической реакцией без износа, люфта и трения. Основная особенность данных материалов заключается в малых перемещениях при высоких силовых характеристиках (выходное усилие до 1 кН изменение длины на 0.1%, т.е. 2 мкм при толщине пластины 2.5 мм). При этом выходное перемещение, как правило, должно составлять несколько сантиметров. Таким образом, задача усилителя перемещений состоит в том, чтобы микроперемещения пьезоэлектрического материала превратить в макроперемещения пьезопривода при сохранении приемлемых для конкретной задачи выходных силовых характеристик. В связи с развитием данного направления разработки пьезоэлектрических приводов требования к конструкциям значительно выросли и требуют более тщательного подбора параметров с целью уменьшения массы устройств, но в тоже время сохранении силовых характеристик. В данной работе представлен многоступенчатый механизм, а именно: рамочная конструкция пьезопривода червячного типа, которая будет использоваться в качестве усилителя перемещений.

По результатам анализа публикаций ведущих компаний по тематике пьезодвигателей и пьезоактуаторов была выявлена проблематика данного направления, которая заключается в необходимости при малых габаритах и малой массе конструкции усилителя перемещений не выйти за границы параметров, обеспечивающих стабильность работы пьезоактуатора. По-

этому была поставлена и решена задача оптимизации конструкции с целью подбора оптимальных параметров геометрии для уменьшения массы и увеличения выходных перемещений конструкции. В задаче оптимизации определена целевая функция, выходным параметром которой является передаточный коэффициент K (отношение выходного к входному перемещению).

$$f(x)=K, \quad K \max \quad (1)$$

В качестве входных параметров целевой функции конструкции (x) использовались геометрические параметры конструкции и масса пьезопривода. В расчете учитывались начальные условия и ограничения на массогабаритные характеристики и геометрические размеры конструкции пьезопривода, прочность материала, входные и выходные значения усилий и перемещений.

Анализ результатов моделирования показал различие коэффициентов преобразования по перемещениям и по силе, что объясняется затратами части полезной работы пьезопакета на упругое деформирование силовой рамы. Оптимизация конструкции преобразователя направлена на увеличение эффективности преобразователя и достигается как путем варьирования геометрических параметров, так и выбором материалов для изготовления силовой рамы пьезопривода.

Инструментами для оптимизации геометрии, численного анализа НДС конструкции и оценки основных характеристик пьезопривода были выбраны программные комплексы конечноэлементного анализа ANSYS и Siemens NX.

Результатом работы является оригинальная конструкция пьезопривода. По результатам численного анализа и оптимизации был получен набор параметров пьезопривода, удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к преобразователю перемещений и полностью определяющих геометрию и кинематику работы силовой рамы пьезопривода, предложенная конструкция силовой рамы пьезопривода при выполнении предъявляемых требований обладает малой массой, простотой и технологичностью изготовления.

Данное исследование и разработка конструкции поможет оптимизировать применение пьезоприводов и пьезоактуаторов не только для аэрокосмической области, но и в других областях науки и техники, где требуется прецизионное позиционирование и точная настройка приборов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, уникальный идентификатор RFMEFI57817X0257.

Литература

1. Рейтман М.И., Шапиро Г.С. Методы оптимального проектирования деформируемых тел. М.: Наука, 1976.

2. Прагер В. Основы теории оптимального проектирования конструкций. М.: Мир. 1977.
3. Mingxiang Ling, Junyi Cao, Zhou Jiang, Jing Lin. Theoretical modeling of attenuated displacement amplification formultistage compliant mechanism and its application // Journal Sensors and Actuators A: Physical. 2016.
4. Ragonet M., Petiniot J.-L., Fournier M., Porchez T., Sosnicki O., Bouchet C. Potentialities of APA Composite Shell Actuators and SA75D Amplifier for New Dynamic Applications // ACTUATOR 2016, 15th International Conference on New Actuators, Bremen, Germany, 13–15 June 2016.
5. Kras A., Brahim M., Porchez T., Bouchet C., Claeysen F. Compact, Lightweight, and Efficient Piezo-Actuation Chain for Aeronautical Applications // ACTUATOR 2014, 14th International Conference on New Actuators, Bremen, Germany, 23–25 June 2014.

References

1. Kras A., Brahim M., Porchez T., Bouchet C., Claeysen F. Compact, Lightweight, and Efficient Piezo-Actuation Chain for Aeronautical Applications. ACTUATOR 2014, 14th International Conference on New Actuators, Bremen, Germany, 23–25 June 2014.
2. Mingxiang Ling, Junyi Cao, Zhou Jiang, Jing Lin. Theoretical modeling of attenuated displacement amplification formultistage compliant mechanism and its application // Journal Sensors and Actuators A: Physical. 2016.
3. Prager V. Basics of the theory of optimal structural design. Moscow, Mir publ., 1977. (In Russian).
4. Ragonet M., Petiniot J.-L., Fournier M., Porchez T., Sosnicki O., Bouchet C. Potentialities of APA Composite Shell Actuators and SA75D Amplifier for New Dynamic Applications. ACTUATOR 2016, 15th International Conference on New Actuators, Bremen, Germany, 13–15 June 2016.
5. Reitman M.I., Shapiro G.S. Methods for optimal design of solid bodies. Moscow, Nauka publ., 1976. (In Russian).

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОРИСТОСТИ И МОРФОЛОГИИ ПОР НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРИСТЫХ КЕРАМИК МЕТОДАМИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

К.С. Матыко, И.Ю. Смолин

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
matyko.ks@gmail.com

Ключевые слова: пористая керамика, морфология пор, пористость, эффективные механические характеристики, компьютерное моделирование.

Аннотация. Целью работы является проведение численных экспериментов и анализ полученных результатов по выявлению влияния формы пор и общей пористости на деформацию, эффективные упругие характеристики хрупких пористых твердых тел. С помощью численного моделирования методом конечных разностей в трехмерной постановке исследовано влияние пористости и формы пор на деформацию и разрушение пористой керамики на основе оксидов алюминия и циркония. Особое внима-

ние уделено влиянию параметров организации поровой структуры на эффективные характеристики материалов при одноосном сжатии и простом сдвиге.

STUDY OF THE EFFECT OF POROSITY AND PORE MORPHOLOGY ON THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF POROUS CERAMICS USING NUMERICAL SIMULATION METHODS

K.S. Matyko, I.Yu. Smolin

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

Keywords: porous ceramics, pore morphology, porosity, effective mechanical characteristics, computer simulation.

Abstract. The objective of the paper is the analysis of the influence of bulk porosity and pore morphology on the effective elastic properties of porous brittle materials based on numerical simulation of their deformation and fracture. The effect of porosity and pore shape on the deformation and fracture of porous alumina and zirconia ceramics was investigated by 3D numerical modeling based on the finite difference method. The features of pore structure morphology were of special interest with respect to their impact on changing the effective mechanical properties of materials in uniaxial compression and simple shear.

Пористые материалы широко применяются в различных областях техники и медицины. В последние 20 лет пористые проницаемые конструкции используются для имплантации в организм человека, в травматологии, ортопедии, хирургии, стоматологии, урологии и других областях медицины. В данной работе рассмотрены механические свойства оксидов алюминия и циркония, так как это наиболее популярные материалы, используемые в медицине.

Большое влияние на механические свойства оказывает не только значение общей пористости, но и морфология пор (форма и характер распределения пор в материале). Поэтому одной из актуальных задач является изучение влияния размера и формы пор на механические свойства пористых керамик как экспериментальными, так и численными методами. Известно, что хрупкие керамические материалы по-разному ведут себя при разных видах нагружения, например, при сжатии и растяжении. Этому вопросу уделено особое внимание. Представляет интерес изучение влияния размера и форм пор на их механическое поведение при одноосном сжатии и простом сдвиге.

Целью данной работы является проведение численных экспериментов и анализ полученных результатов по выявлению влияния формы пор и общей пористости на деформацию и эффективные механические характеристики хрупких пористых твердых тел.

В работе численно изучено влияния общей пористости, размера и форм пор на эффективные упругие и прочностные свойства модельных пористых материалов. Рассмотрено два типа морфологии модельных пористых структур: перекрывающиеся сферические поры (ПСП) и перекрывающиеся сферические тела (ПСТ) [1, 2]. Для моделирования механического поведения материалов применен эволюционный подход, описанный в работах [2–5]. Численная реализация в трехмерной постановке выполнена на основе конечно-разностного метода [6]. Размер изучаемого объема составил $9 \times 9 \times 9$ мкм³, а размер расчетной сетки – $150 \times 150 \times 150$ узлов. Расчеты механического поведения мезообъемов модельных пористых структур разного типа проведены в диапазоне общей пористости от 10 до 50 %. Усредненная диаграмма нагружения имеет ниспадающий участок и является чувствительной не только к значению пористости, но и к морфологии пор. По рассчитанным диаграммам были определены эффективные значения упругих модулей и предела прочности. Полученные в расчетах зависимости от общей пористости для эффективных упругих модулей и предела прочности при одноосном сжатии и сдвиге лучше совпадают с экспериментальными данными для керамических пористых материалов на основе диоксида циркония и оксида алюминия в случае ПСТ-морфологии пор. Поскольку для разных случайных реализаций пористых структур при одной и той же пористости характерен довольно большой разброс, был проведен статистический анализ полученных результатов. Он показал, что при уменьшении размеров сферических элементов, значения эффективного упругого модуля для ПСП морфологии уменьшается, а для ПСТ – увеличивается. С уменьшением размера сферических элементов, разброс результатов уменьшается, причем не только при одинаковом размере всех элементов, но и если эти размеры варьировались.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

Модельные пористые структуры, построенные на основе перекрывающихся сферических тел, хорошо описывают морфологию пор керамических материалов, полученных спеканием нано-структурных порошков, а также позволяют воспроизвести зависимость эффективных упругих модулей от общей пористости.

На основе статистического анализа показано что, при уменьшении размеров материальных сфер, составляющих твердый каркас для ПСТ-структур, значения модуля Юнга и модуля сдвига оказываются ближе к экспериментальным данным.

Расчетные зависимости эффективных упругих модулей хорошо соответствуют экспериментальным данным.

Литература

1. Bruno G., Efremov A.M., Levandovskiy A.N., Clausen B. Connecting the macro- and microstrain responses in technical porous ceramics: modeling and experimental validations // J. Mater. Sci. 2011. Vol. 46. Pp. 161–173.
2. Смолин И.Ю., Еремин М.О., Макаров П.В., Буякова С.П., Кульков С.Н., Евтушенко Е.П. Численное моделирование механического поведения модельных хрупких пористых материалов на мезоуровне // Вестник Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2013. № 5(25). С. 78–90.
3. Микушина В.А., Смолин И.Ю. Моделирование деформации и разрушения пористой керамики с использованием разных критериев разрушения // Труды Томского государственного университета. Серия физико-математическая: Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики: VI Международная молодежная научная конференция. 27–29 ноября 2017 г., Томск / под ред. М.Ю. Орлова. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2018. Т. 302. С. 188–192.
4. Микушина В.А., Смолин И.Ю. Численное моделирование механического поведения и определение эффективных механических свойств керамических материалов с иерархической пористой структурой // Высокие технологии в современной науке и технике: сб. научных трудов VI международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов / под ред. А.Н. Яковлева. 2017. С. 366–367.
5. Eremin M.O. Numerical simulation of fracture of $ZrO_2-Al_2O_3$ ceramic composites // Physical Mesomechanics. 2016. Т. 19, № 4. С. 452–458.
6. Wilkins M.L. Computer Simulation of Dynamic Phenomena. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 246 p.

References

1. Bruno G., Efremov A.M., Levandovskiy A.N., Clausen B. Connecting the macro- and microstrain responses in technical porous ceramics: modeling and experimental validations // J. Mater. Sci. 2011. Vol. 46. Pp. 161–173.
2. Smolin I.Yu., Eremin M.O., Makarov P.V., Buyakova S.P., Kulkov S.N., Evtushenko E.P. Numerical modelling of mechanical behaviour of model brittle porous materials at mesoscale // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mehanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics. 2013. 5(25). Pp. 78–90.
3. Mikushina V.A., Smolin I.Yu. Simulation of deformation and failure of porous ceramics using different fracture criteria // Transactions of Tomsk State University. Physical and Mathematical Series. Vol. 302: Current Issues of Continuum Mechanics and Celestial Mechanics, ed. by M. Orlov. Tomsk: Tomsk University Publishing house, 2017. Pp. 188–192.
4. Mikushina V.A., Smolin I.Yu. Numerical modeling of mechanical behavior and effective mechanical properties determination for ceramic materials with hierarchical porous structure // High technologies in modern science and engineering. Collected papers of VI International scientific and technical conference of young scientists and students, ed. A.N. Yakovlev. 2017. Pp. 366–367.
5. Eremin M.O. Numerical simulation of fracture of $ZrO_2-Al_2O_3$ ceramic composites // Physical Mesomechanics. 2016. Т. 19, № 4. Pp. 452–458.
6. Wilkins M.L. Computer Simulation of Dynamic Phenomena. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 246 p.

ПРОГРАММА РАСЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНЫХ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ РДТТ

М.С. Серeda, А.В. Червакова, К.В. Костюшин

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
mihailsereda@mail.ru

Ключевые слова: камера сгорания РДТТ, кривая давления, закон скорости горения.

Аннотация. Разработана программа и методика расчета кривой давления в камере сгорания РДТТ на основе расчета уравнения Бори в каждый момент времени в зависимости от изменения поверхности горения. Программа разработана на языке С# с применением технологии WPF. Пользовательский интерфейс позволяет формировать исходные данные, проводить расчет и отображать результаты в графическом и табличном виде. Проведены расчеты для типового состава твердого топлива со степенным законом скорости горения в случае торцевого и цилиндрического зарядов.

PROGRAM FOR CALCULATION OF PERFORMANCE CHARACTERISTICS IN THE COMBUSTION CHAMBER OF SOLID FUEL ROCKET ENGINES

M. Sereda, A. Chervakova, K. Kostyushin

National Research Tomsk State University, Russia
mihailsereda@mail.ru

Keywords: the combustion chamber of the rocket engine solid fuel, pressure curve, the law of burning speed.

Abstract. The program and method of calculating the pressure curve in the combustion chamber of a solid fuel rocket engine based on the calculation of the Bori equation at each time depending on the change in the combustion surface. The program is developed in C# using WPF technology. The user interface allows you to generate source data, perform calculations and display the results in graphical and tabular form. The calculations for the typical composition of solid fuel with the power law of the combustion rate, in the case of end and cylindrical charges.

При разработке РДТТ на начальных этапах важно учитывать изменение рабочих характеристик от физико-химических характеристик топлива и геометрии заряда.

Целью работы являлось создание программного комплекса, позволяющего сократить время расчетов и получить внутрикамерные характеристики в камере сгорания РДТТ. Камера сгорания ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ) состоит из внешней оболочки и размещенного в ней заряда твердого топлива (ТТ). Главные требования к заряду ТТ выбираются из поставленных задач: максимальное заполнение камеры сгорания топ-

ливом; получение требуемого закона изменения давления и тяги во времени; защита корпуса от раскаленных продуктов сгорания топлива; обеспечение массовых, прочностных и газодинамических условий работы двигателя.

На изменение кривой давления в камере сгорания влияет форма заряда и химические характеристики топлива, которые в свою очередь влияют на скорость горения, секундный массовый расход и тяговые характеристики РДТТ. Расчет рабочих характеристик в камере сгорания РДТТ связан с большим количеством вычислений, в которых важна минимизация погрешности расчетов. Алгоритм расчета основан на определении давления в камере сгорания с использованием формулы Бори в фиксированные моменты времени:

$$P = \left(\frac{S \rho_T u_1}{A \sigma_{кр}} \right)^{\frac{1}{1-\nu}}, \quad (1)$$

Скорость горения определяется по степенному закону:

$$\frac{de}{dt} = u_1 P^\nu, \quad (2)$$

Массовый расход рабочего тела определяется как:

$$m = S u \rho_T, \quad (3)$$

Алгоритм работы программы:

1. Использование уравнения Бори (1) для стационарного процесса при реализации первой итерации.
2. Вычисление скорости горения по зависимости (2), используя давление предыдущего шага.
3. Расчет толщины сгоревшего свода на текущем шаге.
4. Вычисление изменения геометрии заряда.
5. Расчет новой площади горения.
6. Вычисление давления в настоящий момент времени.
7. Построение кривой зависимости давления от времени.

Программа написана на языке С# с использованием программной платформы NET.Framework имеет модульную структуру и состоит из блока расчета стационарного давления и блока расчета нестационарного давления. Программа позволяет проводить расчеты стационарного и нестационарного давления в камере сгорания, массового расхода и скорости истечения газа при горении заряда ТТ [4].

В расчетном блоке инженеру требуется выбрать тип расчета (стационарное или нестационарное давление), ввести геометрические, термодинамические характеристики заряда и задать критическое сечение сопла. Геометрическими характеристиками сопла является площадь горения заряда. Термодинамические характеристики представляются плотностью топлива, константой степенного закона горения, единичной скоростью горения, газовой постоянной и показателем адиабаты. В расчетном модуле выводятся: давление в камере сгорания, скорость горения заряда и секундный массовый расход, которые выстраивают картину осредненных по объему внутри-баллистических характеристиках РДТТ. Интерфейс пользователя позволяет визуализировать полученные данные в виде таблицы и графически.

Проведены расчеты для типового состава твердого топлива со степенным законом скорости горения, в случае торцевого и цилиндрического зарядов. Получены кривые давления, скорости и газопритока с поверхности горения. Результаты расчетов хорошо согласуются с данными полученными другими авторами [2, 3, 5]. Методика и программа расчета может быть использована для решения прикладных инженерных задач.

Литература

1. *Алемасов В.Е. и др.* Теория ракетных двигателей: учебник для студентов высших технических учебных заведений / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин; под ред. В.П. Глушко. М.: Машиностроение, 1980. 533 с.
2. *Яскин А.В.* Теория устройства ракетных двигателей: учеб. пособие / А.В. Яскин; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2013. 262 с.
3. *Орлов Б.В., Мазинг Г.Ю.* Термодинамические и баллистические основы проектирования ракетных двигателей на твердом топливе: учеб. пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1979. 392 с.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018666711 от 19.12.2018
5. *Костюшин К.В., Шуварики В.А.* Сравнение схем типа "MUSCL" для расчета течений идеального газа в соплах Лавала // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2018. № 54. С. 79–87.

References

1. *Alemasov V.E.* Theory of rocket engines: the textbook for students of higher technical educational establishments / V.E. Alemasov, A.F. Dregalin, A.P. Tishin; ed. by V.P. Glushko. M.: Mechanical Engineering, 1980. 533 p.
2. The theory of the device of rocket engines: the training manual of the Altai state technical University, the Biysk technological Institute. Biysk: Publishing house of Altai state technical University 2013. 262 p.
3. *Orlov B.V., Mazing G.Yu.* Thermodynamic and ballistic basics of designing rocket engines solid fuel/ Textbook for universities. M.: Engineering, 1979. 392 p.
4. Certificate of state registration of computer programs № 2018666711 from 19.12.2018.

5. *Kostyushin V.K., Starikov V.A.* Comparison of schemes such as "MUSCLE" for calculating ideal gas flows in Laval nozzles, *Vestn. Thom. state UN-TA. Mathematician and mechanic.* 2018. No. 54. Pp. 79–87.

РАСЧЕТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНЫХ ВОЛН СО СФЕРАМИ РАЗЛИЧНОГО ДИАМЕТРА В ВОДОРОДО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

В.М. Темербеков

Институт теоретической и прикладной механики им. Христиановича СО РАН,
Россия
tvm94@inbox.ru

Ключевые слова: ударная волна, горение, горючая смесь, численное моделирование.

Аннотация. Представлены результаты численного исследования взаимодействия ударной волны, проходящей по горючей смеси, со сферами различного диаметра. Используемая математическая модель основана на приведенной кинетической схеме для описания химических реакций. Проведена дополнительная верификация расчетного алгоритма и кинетической схемы химических реакций по экспериментальным данным. Получено согласование расчетных и экспериментальных картин течения для различных режимов горения. Проведен анализ полученных результатов.

CALCULATION OF SHOCK WAVES INTERACTION WITH VARIOUS-DIAMETER SPHERES IN A HYDROGEN-AIR MIXTURE

Valentin Temerbekov

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Russian Federation
tvm94@inbox.ru

Keywords: Shock wave, combustion, combustible mixture, numerical simulation.

Abstract. The results of numerical study of shock wave interaction with various diameter spheres in a combustible mixture were presented. A mathematical model based on the reduced kinetic scheme for describing chemical reactions was used. An additional verification of computational algorithm and reduced kinetic scheme of chemical reactions for experimental data was carried out. The agreement between the calculated and experimental flow patterns for various combustion regimes was obtained. The analysis of obtained results was carried out.

Исследование инициирования и стабилизации горения путем взаимодействия ударных волн со сферами различного диаметра важно как с научной, так и с технической точки зрения. Изучение развития и подавления горения и детонации охватывает широкую область науки, связанную с

взрывобезопасностью, а именно разработку методов подавления газовой детонации инертными частицами. Рассматриваемая проблема интересна для изучения на микроуровне задач инициирования и ре-инициирования детонации при взаимодействии ударной волны, распространяющейся вдоль горючей смеси с частицами.

В настоящей работе исследовано взаимодействие ударной волны со сферами различного диаметра. Математическая модель инициирования детонации снарядом небольшого диаметра была проверена для экспериментальных данных [1]. Это было сделано для подбора констант кинетической схемы, чтобы в дальнейшем использовать эту модель при численном моделировании горения и детонации. В исследованиях подобного рода необходимо обеспечить адекватность выбранной математической модели и кинетической схемы химических реакции.

Математическая модель включает в себя осредненные по Фавру уравнения Навье–Стокса для многокомпонентной газовой смеси с учетом химических реакций, дополненную SST-модификацией $k-\omega$ модели турбулентности. В моделируемых потоках с ударными и детонационными волнами, как и в любой задаче с химическими реакциями, необходимо выбрать кинетическую схему для адекватного описания процесса горения. В данной работе реакции моделировались путем использования приведенной кинетической схемы с одной реакцией для четырех компонент. В [2] эта кинетическая схема была верифицирована по экспериментальным данным о времени задержки воспламенения и скорости детонации при различных условиях. В качестве решателя использовался программный комплекс ANSYS Fluent. В случае нестационарного расчета для временной аппроксимации использовалась неявная схема второго порядка и метод расщепления вектора потока AUSM с противопотоковой схемой второго порядка для пространственной аппроксимации. Ударная волна с числом Маха 2.65–2.85 взаимодействует с фиксированной сферой в предварительно перемешанной стехиометрической водородо-воздушной смеси со статической температурой $T_{ст} = 300$ К и статическим давлением $P_{ст} = 100$ кПа. В результате численного исследования данной задачи, разработана математическая модель для расчета задачи об инициировании горения в реагирующей смеси путем взаимодействия ударной волны со сферой малого диаметра и математическая технология для ее реализации на основе пакета ANSYS Fluent. Найдены зависимости между диаметром сферы и интенсивностью горения. Построены зависимости времени и местоположения полного воспламенения от числа Маха.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 17-41-540918).

Литература/References

1. *Maeda S., Sumiya S., Kasahara J., and Matsuo A.* Scale effect of spherical projectiles for stabilization of oblique detonation waves // *Shock Waves* (2015) 25:141–150.
2. *Bedarev I.A., Rylova K.V., and Fedorov A.V.* Application of Detailed and Reduced Kinetic Schemes for the Description of Detonation of Diluted Hydrogen–Air Mixtures// *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2015. Vol. 51, No. 5. Pp. 528–539.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОУДАРЕНИЯ УДАРНИКА С ЖЕСТКОЙ СТЕНКОЙ ПРИ НИЗКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ

Т.В. Фазылов, А.М. Пристай

Томский государственный университет, Россия
talgat505@gmail.com

Ключевые слова: ударник, жесткая стенка, разрушение, расчет, эксперимент.

Аннотация. В работе теоретически и экспериментально исследован процесс низкоскоростного соударения ударника с жесткой стенкой. В лабораторном эксперименте жесткой стенкой служило основание из карбида вольфрама. Построена упрощенная конечно-элементная модель ударника. Установлено, что ударник полностью срабатывался, разрушаясь на отдельные фрагменты. Среди фрагментов наблюдался «сработанный» свинцовый сердечник и отделенные от него остатки стальной, плакированной томпаком, оболочки. Процесс укорочения ударника длился вплоть до 50 мкс. Результаты лабораторного эксперимента можно использовать как качественный тест при решении задач пробития и проникания.

NUMERICAL MODELING OF THE IMPACT OF PROJECTILE WITH A RIGID WALL UNDER LOW-VELOCITY IMPACT

Talgat Fazylov and Anastassiy Pristay

Tomsk State University, Russian Federation
talgat505@gmail.com

Keywords: projectile, rigid wall, destruction, computational, experiment.

Abstract. In the paper, the process of low-velocity impact of a projectile with a rigid wall was studied theoretically and experimentally. In a laboratory experiment, a rigid wall was tungsten carbide base. A simplified finite element model of a projectile is constructed. It was found that the projectile was fully activated, breaking down into separate fragments. Among the fragments, a “worked out” lead core and the remnants of a copper envelope separated from it were observed. The process of shortening the firing pin lasted up to 50 μ s. The results of a laboratory experiment can be used as a qualitative test in modeling problems of penetration and penetration.

Исследование процесса разрушения твердых тел при высокоскоростном соударении представляет огромный интерес с научной и практической точки зрения. С научной точки зрения процессы, сопутствующие удару, являются предметом фундаментальных исследований различных научных групп, с практической – существует необходимость повышения ударной стойкости современных защитных конструкций. Число монографий, где обсуждаются проблемы высокоскоростного взаимодействия ударников твердых тел, ограничено, например в [1]. В данном аспекте численное моделирование выступает удобным теоретическим инструментом, позволяющим без больших материальных и временных затрат выявлять основные механизмы и закономерности взаимодействующих тел.

Цель работы – исследование разрушения ударника со свинцовым сердечником в медной оболочке при ударе по жесткой стенке. Объект исследования – 9 мм оболочечная пуля патрона 57-Н-181 пистолета Макарова (ПМ). Масса пули – 6,1 г. Предмет исследования – состояние ударника в процессе взаимодействия с жесткой стенкой при скорости 315 м/с. Для достижения данной цели были решены следующие задачи: проведен лабораторный эксперимент (измерены размеры ударника после удара и т.п.), построена конечно-элементная модель взаимодействующих тел, и проанализированы результаты расчетов. По постановке эксперимента, целям и задачам работа является логическим продолжением исследований [2].

Работа состояла из экспериментальной и теоретической частей. Экспериментальная часть ограничивалась только лабораторным экспериментом на базе Томского стрелкового центра «Полигон» [3]. При описании экспериментальной части ограничимся тем, что жесткой стенкой служило высокопрочное основание из карбида вольфрама. Теоретическая часть заключалась в численном моделировании данного эксперимента с помощью программы расчета в 2D постановке для осесимметричного случая [4].

При описании поведения твердых тел при ударе используется модель механики сплошных сред, в основу которой положены фундаментальные законы сохранения. Определяющие соотношения задаются в форме Прандтля – Рейса при условии текучести Мизеса. В рамках данной модели материал считается сжимаемым, пористым, учитывающим свойства прочности, ударно-волновые явления и совместное образование нескольких типов разрушения. Уравнение состояния выбрано в форме Уолша.

В качестве основного инструмента исследований используется численный лагранжев метод, расчетная часть которого дополнена механизмами разрушения расчетных узлов и разрушения расчетных элементов, что позволяет моделировать глубокое проникание ударников сложной геометрии в структурно-неоднородные конструкции [5].

На рис. 1 приведены результаты лабораторного и вычислительного экспериментов. Отметим, что использована упрощенная конечно-элементная

модель ударника, где задано условие «слипания» на контактной границе «оболочка – сердечник».



Рис. 1. Результаты численного/лабораторного экспериментов.
Левая часть рисунка иллюстрирует 100 мкс; правая часть – 0 мкс

Показано состояние ударника после удара, где отчетливо виден «сработанный» свинцовый сердечник. Из графика скорости видно, что процесс укорочения ударника длился до 50 мкс и прекратился при остаточной длине 2.2 мм. Состояние ударника на 40 мкс также говорит о том, что он в значительной мере потерял свою первоначальную форму.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

При низкоскоростном ударе (315 м/с) по жесткой стенке свинцовый ударник в стальной оболочке полностью разрушается. Лабораторный эксперимент можно использовать как качественный тест, а результаты моделирования требуют уточнения путем доработки конечно-элементной модели.

Литература

1. *Gabi Ben-Dor, Anatoly Dubinsky and Tov Eyperin Engineering models in high-speed penetration mechanics and their applications World Scientific Publishing Company, Singapore, 2019, 1100 p.*
2. *Орлов М.Ю., Богомолов Г.Н. К пробитию однородных и двухслойных стальных пластин ударником с закругленной головной частью // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики. Международная молодежная научная конференция, 2018. С. 310–312.*
3. *Официальный сайт Общества Практической Пулевой Стрельбы г. Томска [Электронный ресурс]. <http://strelok.tomsk.ru/>*
4. *Орлов Ю.Н., Глазырин В.П., Орлов М.Ю. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010610911 от 28.01.2010 «Удар-ОС1. Ударно-волновое нагружение конструкций. Осесимметричная задача».*
5. *Герасимов А.В., Глазырин В.П., Барашков В.Н. и др. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел. Томск. Изд-во Том. ун-та, 2007, 572 с.*

References

1. *Gabi Ben-Dor, Anatoly Dubinsky and Tov Eyperin*. Engineering models in high-speed penetration mechanics and their applications World Scientific Publishing Company, Singapore, 2019, 1100 p.
2. *Orlov M.Yu., Bogomolov G.N.* By breaking through homogeneous and two-layer steel plates with an impactor with a rounded head // Conference Proceedings VII Current Issues of Continuum Mechanics and celestial mechanics, 2018. Pp. 310–312.
3. The official website of the Society of Practical Bullet Shooting in Tomsk, available at <http://strelok.tomsk.ru/>
4. *OrlovYu.N., Glazyrin V.P. and OrlovM.Yu.* Certificate of state registration of computer program, №2010610911 (October 2010).
5. *Teoreticheskiyeeksperimental'nyyeissledovaniyavysokoskorost-nogovzaimodeystviyatel*, edited by A. Gerasimov (Tomsk State University Press, Tomsk, 2007). pp. 572.

РАЗРАБОТКА ИНЖЕНЕРНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В СОПЛЕ ЛАВАЛЯ С УЧЕТОМ ПРОТИВОДАВЛЕНИЯ

А.В. Червакова, К.В. Костюшин, М.С. Середа

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
ch-nastya1997@mail.ru

Ключевые слова: сопло Лавалья, отрыв потока, газодинамические функции, методика Кудрявцева.

Аннотация. Разработано инженерное приложение, позволяющее проводить расчеты локальных и интегральных параметров течения газа в сопловом блоке ракетного двигателя с учетом противодавления на срезе сопла. Алгоритм расчета основан на использовании газодинамических функций. Расчет параметров сопла с учетом противодавления проводится по методике Кудрявцева. Проведены тестовые расчеты течений продуктов сгорания в конических соплах. Определены точки отрыва потока в зависимости от противодавления.

DEVELOPMENT OF ENGINEERING APPLICATION FOR CALCULATION OF BASIC PARAMETERS OF GAS FLOW IN A LAVAL NOZZLE TAKING INTO ACCOUNT BACKPRESSURE

A. Chervakova, K. Kostyushin, M. Sereda

National Research Tomsk State University, Russia
ch-nastya1997@mail.ru

Keywords: Laval nozzle, flow separation, gas-dynamic functions, Kudryavtsev method.

Abstract. An engineering application has been developed that allows calculations of local and integral parameters of the gas flow in the nozzle block of the rocket engine taking into account the backpressure on the nozzle section. The calculation algorithm is based on the use of gas-dynamic functions. Calculation of parameters of the nozzle taking into account the backpressure of the Kudryavtsev method. Test calculations of flows of combustion products in conical nozzles are carried out. The separation points of the flow depending on the backpressure are determined. Verification of calculation results is carried out by comparison with known solutions.

На начальном этапе проектирования сопел ракетных двигателей требуется проведение расчетов основных параметров течения продуктов сгорания. С этой целью широко используется подход, основанный на применении готовых таблиц газодинамических функций. Несмотря на то, что данный метод является общепринятым, в ряде случаев использование таблиц газодинамических функций является нерациональным. Их использование понижает точность расчета и влечет за собой необходимость интерполяции промежуточных значений, отсутствующих в таблицах. Для решения этих проблем разработано приложение, позволяющее проводить расчет основных параметров течения газа в сопловом блоке без использования готовых таблиц газодинамических функций.

Алгоритм программы расчета основан на определении коэффициента скорости из газодинамической функции (1).

$$q(\lambda) = \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right)^{\frac{1}{k+1}} \lambda = \frac{S}{S_{кр}}, \quad (1)$$

где λ – коэффициент скорости, k – показатель адиабаты, S – площадь критического сечения, $S_{кр}$ – площадь анализируемого сечения.

Уравнение (1) решается с использованием метода простых итераций. Затем по полученным значениям приведенной скорости рассчитываются остальные газодинамические параметры течения.

При эксплуатации ракетных двигательных установок возможны режимы работы, когда давление окружающей среды значительно превышает рассчитанное для безотрывного течения давление в выходном сечении сопла [2]. Например, при старте ракет из шахт или при наземных испытаниях двигателей, предназначенных для использования в верхних слоях атмосферы. Наличие в реальном течении пограничного слоя в расширяющейся части сопла обуславливает воздействие окружающей среды на течение сверхзвукового потока. Это воздействие происходит через область пограничного слоя с дозвуковой скоростью течения, в результате чего на режимах перерасширения может произойти отрыв потока от стенки сопла. В этом случае при определении характеристик течения требуется применение методик, учитывающих существенные особенности течения. В про-

грамме учитывается противодавление на срезе сопла по методике Кудрявцева [2].

$$\frac{p_0}{p_{атм}} = \frac{\left(1 + \frac{k-1}{2} M_{ск}^2\right)^{\frac{k}{k-1}}}{0.39 + 0.73 M_{ск}}, \quad (2)$$

где p_0 – давление заторможенного потока, $p_{атм}$ – атмосферное давление, $M_{ск}$ – значение числа Маха, при котором происходит скачок.

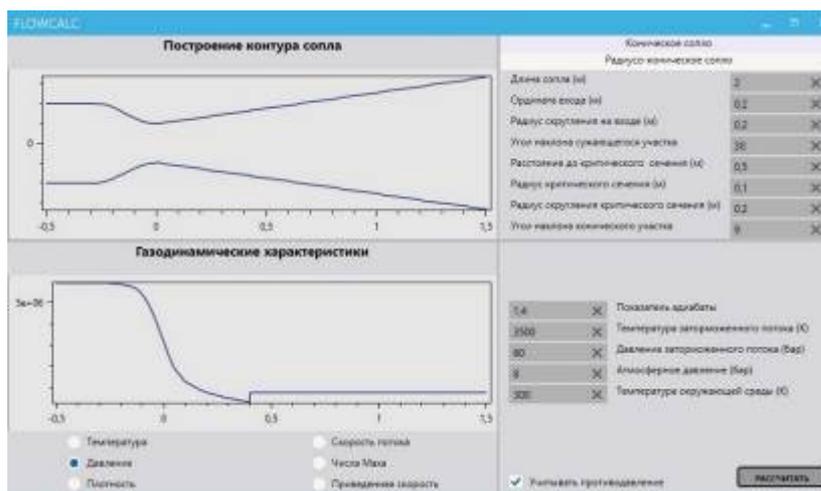


Рис. 1. Интерфейс приложения «FlowCalc»

Приложение «FlowCalc» имеет модульную структуру и состоит из двух функциональных частей: модуль построения геометрии сопла и модуль проведения расчетов. Первый модуль реализует построение двух видов геометрии сопел: конического и радиусо-конического. В качестве входных данных модуль принимает геометрические параметры выбранного сопла: радиус входного и критического сечений, длину сопла, длину суживающейся его части и др. На основании входных данных выполняется построение контура сопла Лаваля. Второй модуль программы в качестве входных данных использует термодинамические характеристики продуктов сгорания, параметры в камере сгорания, параметры торможения, температуру и давление окружающей среды. Этот модуль работает в двух режимах:

- первый режим реализует расчет основных газодинамических параметров течения газа, основываясь на газодинамических функциях, используя метод последовательных приближений;

- второй режим также рассчитывает основные газодинамические параметры, учитывая противодавление на срезе сопла, используя методику Кудрявцева, определяет положение сечения отрыва потока и производит перерасчет соответствующих газодинамических параметров.

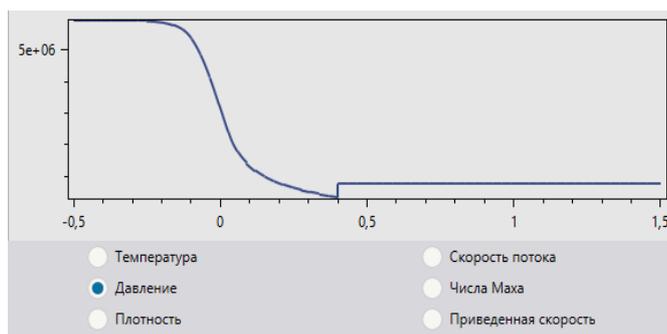


Рис. 2. Давление вдоль оси сопла с учетом противодавления

Разработано инженерное приложение для расчета основных параметров течения газа в сопле Лавала с учетом противодавления. Проведены тестовые расчеты течений продуктов сгорания в конических соплах. Определены точки отрыва потока в зависимости от противодавления (рис. 2). Верификация результатов расчета течений в соплах проведена путем сравнения с [3].

Литература

1. *Алемасов В.Е.* Теория ракетных двигателей: учеб. для студентов высших технических учебных заведений / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин; под ред. В.П. Глушко М.: Машиностроение, 1989. 464 с.
2. *Дорофеев А.А.* Основы теории тепловых ракетных двигателей / Теория, расчет и проектирование: учеб. / А.А. Дорофеев. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана Н.Э., 2014. 571 с.
3. *Иров Ю.Д., Кейль Э.В., Маслов Б.Н. и др.* Газодинамические функции. М.: Машиностроение, 1965. 398 с.
4. *Ворожейкина Д.А., Еремин И.В., Костюшин К.В.* Расчет квазиодномерного полидисперсного двухфазного течения в соплах // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 9(3). С. 46–48.

References

1. *Alemasov V.E.* Theory of rocket engines: Textbook for students of higher technical educational institutions / V.E. Alemasov, A.F. Dregalin, A.P. Tishin; under edition V.P. Glushko. M.: Engineering, 1989. 464 p.
2. *Dorofeev A.A.* Fundamentals of the theory of thermal rocket engines / Theory, calculation and design: textbook / A.A. Dorofeev. 3rd edition, revised and enhanced. M.: Publisher MSTU it Bauman N.E., 2014. 571 p.
3. *Irov Yu.D., Keil E.V., Maslov B.N. etc.* Gas-dynamic functions. M.: Engineering, 1965. 398 p.
4. *Vorozheykina D.A., Eremin I.V., Kostyushin K.V.* Calculation of quasi-one-dimensional polydisperse two-phase flow in nozzles // News universities. Physics. 2013. Vol. 56, № 9(3). Pp. 46–48.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ КОМБИНИРОВАННОГО ТИПА

М.В. Чернышов, С.А. Матвеев, К.Э. Мурзина

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, СПб., Россия
karinkamurz@yandex.ru

Ключевые слова: прямоточный воздушно-реактивный двигатель, детонационный двигатель, ударно-волновая структура.

Аннотация. Предложена концепция воздушно-реактивного двигателя комбинированного типа, совмещающего принципы действия детонационного двигателя и прямоточного воздушно-реактивного двигателя традиционной схемы. В воздухозаборнике этого устройства часть потока с наименьшими потерями полного давления на образующихся скачках уплотнения используется для сгорания в камере традиционного воздушно-реактивного двигателя. Другая часть потока, обладая небольшим давлением торможения, имеет при этом существенно более высокую температуру и благодаря этому может использоваться в детонационном двигателе.

THEORETICAL BASIS FOR AIR-BREATHING JET ENGINE OF THE COMBINED TYPE

Mikhail V. Chernyshov, Stanislav A. Matveev, Karina E. Murzina

Baltic State Technical University “VOENMEH”, St. Petersburg, Russian Federation
karinkamurz@yandex.ru

Keywords: ramjet engine, detonation engine, shock-wave structure.

Abstract. A concept of air-breathing jet engine of the combined type is proposed. It combines the principles of action of the detonation engine and the ramjet engine of traditional design. In air inlet of that device, the part of flow with the smallest losses of the full pressure at the forming shocks is used for the further combustion at the reaction chamber of the traditional ramjet. Another path of the stream has very small stagnation pressure, but crucially larger temperature, and, due to this phenomenon, can be applied to detonation engine.

В настоящее время реактивные двигатели традиционных схем, работающие на химическом топливе, практически достигли предела своей эффективности. Для существенного увеличения тяги и повышения КПД необходима разработка принципиально новых схем.

Идея прямоточного детонационного воздушно-реактивного двигателя обсуждается в научной литературе на протяжении десятилетий [1]. Несмотря на теоретическую простоту устройства, его практическое функционирование затруднено образованием сложных ударно-волновых структур с различными температурами топливно-воздушной смеси (ТВС) за их эле-

ментами. В результате детонирует только часть горючего за образующимися скачками уплотнения, имеющая наибольшую температуру. В частности, при маховском отражении температура потока за главным скачком заметно больше, чем за системой из падающего и отраженного скачков, в результате чего, как правило, детонирует только часть потока, расположенная за «маховской ножкой».

В свою очередь, как показывают исследования сверхзвуковых входных диффузоров воздушно-реактивных двигателей (ВРД), потери полного давления в потоке за падающим и отраженным скачками существенно меньше, чем за «маховским» скачком [2]. Эта часть потока предпочтительна для последующего поступления в камеру сгорания ВРД.

Существенное (в несколько раз, а иногда – на порядок) различие полных давлений и температур газа за тройными конфигурациями (ТК) различного вида (в частности, образующихся при маховском отражении) обсуждалось ранее в работах В.Н. Ускова, М.В. Чернышова, Тао Гана. Найденные экстремальные свойства ударно-волновых систем (последовательностей скачков уплотнения и волн разрежения) и структур (совокупностей скачков и волн, имеющих общую точку) использовались ранее для оптимизации формы обтекаемых тел, сверхзвуковых воздухозаборников, в струйных технологиях и других практических приложениях аэрогазодинамики.

Исходя из отмеченных особых свойств образующихся ударно-волновых структур, в данной работе предлагается концепция ВРД комбинированного типа – с детонацией ТВС за маховскими скачками тройных конфигураций и её «обычным» сгоранием в камере ВРД за системой из косых отраженных скачков.

В представленной работе анализируются соотношения температур и полных давлений за ударно-волновой структурой маховского отражения скачков уплотнения в сужающемся канале (например, на входе в сверхзвуковой воздухозаборник). Показано, что эти отношения могут достигать весьма высоких значений, что служит теоретическим обоснованием разрабатываемой схемы перспективного ВРД.

Аналитически и численно показано, что соотношения температур и полных давлений потоков за тройной точкой маховского отражения могут достигать весьма высоких значений. По этой причине применение высокотемпературного потока топливно-воздушной смеси за главным (маховским) скачком в детонационном цикле, а высоконапорного (обладающего большим давлением торможения) потока за системой косых скачков уплотнения – в камере сгорания обычного воздушно-реактивного двигателя представляется теоретически оправданным.

Для практической реализации предлагаемого смешанного (гибридного) двигателя необходимо разделение потоков за образующимися тройными точками маховского отражения, а, следовательно, разработка эффективно-

го алгоритма определения положения таких точек. Для этого могут быть адаптированы методы анализа ударно-волновой структуры сверхзвуковых потоков в перерасширенных струях и сужающихся каналах, разработанные Г. Бен-Дором, К. Такамой, В.Н. Усковым, А.В. Омельченко, М.В. Чернышовым и рядом других исследователей [3, 4].

Литература

1. *Dunlap R., Brehm R.L., Nicholls J.A.* Предварительное исследование применения стационарного детонационного горения в реакционном двигателе // Журнал реактивного движения. 1958. Vol. 28. № 7. С. 451–456.
2. *Герман Р.* Сверхзвуковые входные диффузоры. М.: Физматгиз, 1960. 290 с.
3. *Омельченко А.В., Усков В.Н., Чернышов М.В.* Об одной приближенной аналитической модели течения в первой бочке перерасширенной струи // Письма в журнал технической физики. 2003. Т. 29. Вып. 6. С. 56–62.
4. *Chanetz B., Chernyshev M.V., Durand A., Ivanov M.S., Khotyanovsky D.V., Kudryavtsev A.N., Omelchenko A.V., Uskov V.N.* Analytical, numerical, and experimental investigation of shock wave reflection transition induced by variation of distance between wedges // Proceedings of West East High Speed Flow Fields 2002 Conference (Marseille, France, April 22–26, 2002). Barcelona, Spain: CIMNE, 2003. Pp. 274–281.

References

1. *Dunlap R., Brehm R.L., Nicholls J.A.* A preliminary study of the application of steady-state detonative combustion to a reaction engine. *Jet Propulsion*. 1958. Vol. 28. № 7. Pp. 451–456.
2. *Hermann R.* Supersonic Inlet Diffusers and Introduction to Internal Aerodynamics. Minneapolis-Honeywell Regulator Company Limited, Minneapolis, 1956.
3. *Omel'chenko A.V., Uskov V.N., Chernyshev M.V.* An Approximate Analytical Model of Flow in the First Barrel of an Overexpanded Jet. *Technical Physics Letters*. 2003. Vol. 29. No. 3. Pp. 243–245.
4. *Chanetz B., Chernyshev M.V., Durand A., Ivanov M.S., Khotyanovsky D.V., Kudryavtsev A.N., Omelchenko A.V., Uskov V.N.* Analytical, numerical, and experimental investigation of shock wave reflection transition induced by variation of distance between wedges. Proceedings of West East High Speed Flow Fields 2002 Conference (Marseille, France, April 22–26, 2002). Barcelona, Spain: CIMNE, 2003. Pp. 274–281.

Секция 3

Исследования новых перспективных материалов в приложениях механики сплошных сред

Председатель
к.ф.-м.н., Козулин А.А.

Природные материалы,
Наноматериалы,
Механические свойства,
СВС-синтез,
Интенсивные пластические деформации,
Термодинамический анализ,
Высокоскоростной удар,

Session 3

New materials research in application to continuum mechanics

Chair

Ph.D. Alexander Kozulin

Natural materials
Nanomaterials,
Mechanical properties,
SHS synthesis,
Intense plastic deformations,
Thermodynamic analysis
High-speed impact

ВЛИЯНИЕ КУМУЛЯТИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ФОРМИРОВАНИИ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ С ГПУ РЕШЕТКОЙ

Л.Р. Ахметшин

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
this_is_patrik@mail.ru

Ключевые слова: конструкционные сплавы, структурное изменение, модификация структуры, интенсивные пластические деформации.

Аннотация. В работе исследовали явление эволюции зеренной структуры материалов с использованием методов интенсивных пластических деформаций. Рассматривали наиболее распространенные методы по измельчению структуры на поверхности материала, а также целиком в объеме. Были получены результаты о влиянии кумулятивных пластических деформаций на изменение зеренной структуры образцов. Результаты показали, что увеличение числа циклов прессования ведет к пропорциональному увеличению степени накопленной деформации. Большие степени деформации являются причиной измельчения внутренней структуры материала.

THE INFLUENCE OF CUMULATIVE PLASTIC DEFORMATION IN THE FORMATION OF METALS STRUCTURE WITH GPU LATTICE

Linar Akhmetshin

National research Tomsk State University, Russian Federation
this_is_patrik@mail.ru

Keywords: structural alloys, structural change, structure modification, severe plastic deformation.

Abstract. In this paper, an evolutionary phenomenon of grain material structure has been investigated using methods of intensive plastic deformation. The most common methods of structure grinding on the material surface and volume were considered. The results of the influence of cumulative plastic deformations on the change in the grain structure of the samples were obtained. Results show that the increasing the number of pressing cycles leads to a proportional increase in the degree of accumulated deformation. Large degrees of deformation cause grinding of the internal structure of the material.

Совершенствование механических элементов конструкций в современном автомобилестроении, авиации и космической технике связано с расширением использования легких сплавов с высокими удельными прочностными свойствами. Одной из актуальных научно-технических задач является расширения номенклатуры сплавов, способных претерпевать структурные изменения с одновременным улучшением физико-механических свойств [1]. Известно, что модификация крупнокристаллической структу-

ры конструкционных легких сплавов методами интенсивной пластической деформации (ИПД) дает очень хорошие результаты по измельчению крупнозернистых структур, что приводит к повышению физико-механических свойств. [2, 3]. В данном исследовании рассматриваются различные методы изменения зеренной структуры, такие, как равноканальное угловое прессование (РКУП) [4], циклическое прессование рифлением (ЦПР) [5], которые воздействуют на структуру образцов.

Известно, что пластичность металлов определяется дислокационными процессами, действующими во внутренних областях зерен. Данное воздействие приводит к дислокационным взаимодействиям и измельчению зерен (поведение Холла–Петча).

Целью данной работы являлось изучение влияния кумулятивной пластической деформации на формирование зеренной структуры в материале, а также исследование соотношения Холла–Петча для исследуемых материалов.

Анализ проводился для методов ИПД, где была отмечена хорошая тенденция к изменению зеренной структуры образцов. Каждый метод ИПД применяется для специально-приспособленной под него геометрии. Данные методы очень сильно зависят от режима испытания, ключевыми параметрами которого являются скорость деформации, температура деформации, а также смазочный элемент для уменьшения влияния трения. Для учета перечисленных параметров процесс ИПД проводят многократно для оптимизации параметров.

Соотношение Холла–Петча, показывает, как влияет размер зерна на пластическую деформацию материала. Явление Холла–Петча обусловлено эффектом упрочнения, связанным с большими сдвиговыми деформациями. Однако другие важные факторы могут также играть важную роль, в том числе подготовка образца для эксперимента, аналогичным образом аддитивную роль играют параметры, при которых проходит эксперимент. С использованием методов ИПД были улучшены физико-механические характеристики исследуемых материалов.

В процессе исследовательской работы выявлено, что изменение микроструктуры образцов при РКУП и ЦПР имеют схожую тенденцию, заключенную в получении УМЗ структуры. Это связано с тем, что в образцах накапливаются большие степени сдвиговых деформаций. Эффективные пластические деформации в материале увеличиваются с увеличением числа циклов обработки методом ИПД. Кумулятивные пластические деформации для одного цикла прессования рифлением эквивалентны одному циклу обработки методом равноканального углового прессования. Пропорциональное увеличение числа циклов ведет к пропорциональному измельчению зеренной структуры. После полного цикла, равного четырем проходам для РКУП и четырем этапам прессования для ЦПР, достигается однородная структура.

Исследование выполнено при поддержке Программы повышения конкурентоспособности ТГУ (проект фонда Д.И. Менделеева ТГУ)

Литература

1. *Ахметшин Л.Р., Кушнарев А.Г., Москвичев Е.Н.* Численное моделирование деформации образцов листового проката из магниевых сплавов при обработке методом прессования рифлением / Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики. 2017. Сер. Физико-математическая. 2018. С. 74–81.
2. *Москвичев Е.Н., Скрипняк В.А., Лычагин Д.В., Козулин А.А., Скрипняк В.В.* Влияние структуры на сопротивление пластической деформации алюминиевого сплава 1560 после обработки методом прессования рифлением // Письма о материалах. 2016. Т. 6. № 2 (22). С. 141–145.
3. *Skripnyak N.V.* The features of fracture behavior of an aluminum-magnesium alloy AMg6 under high-rate straining // Russian Physics Journal September, 2015. Vol. 58, Is. 5, pp. 691–697.
4. *Москвичев Е.Н., Скрипняк В.А., Скрипняк В.В., Козулин А.А., Лычагин Д.В.* Исследование структуры и механических свойств алюминиевого сплава 1560 после интенсивной пластической деформации методом прессования с рифлением // Физическая мезомеханика. 2017. Т. 20. № 4. С. 85–93.
5. *Krasnoveikin V.A., Kozulin A.A., Skripnyak V.A.* Detection of structural changes and mechanical properties of light alloys after severe plastic deformation / IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 919 (2017) 012012.

References

1. *Akhmetshin L.R., Kushnarev AG, Moskvichev E.N.* Numerical simulation of deformation of magnesium alloy sheet metal samples during processing by corrugation pressing / In Book: Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics. 2017 Ser. Physical and Mathematical. 2018. Pp. 74–81.
2. *Moskvichev E.N., Skripnyak V.A., Skripnyak V.V., Kozulin A.A., Lychagin D.V.* Influence of structure to plastic deformation resistance of aluminium alloy 1560 after groove pressing treatment // Letters on Materials. 2016. 6(2). Pp. 141–145.
3. *Skripnyak N.V.* The features of fracture behavior of an aluminum-magnesium alloy AMg6 under high-rate straining // Russian Physics Journal September, 2015. Vol. 58, Is. 5. Pp. 691–697.
4. *Moskvichev E.N., Skripnyak V.A., Skripnyak V.V., Kozulin A.A., Lychagin D.V.* Investigation of the structure and mechanical properties of aluminum alloy 1560 after severe plastic deformation by pressing with corrugation // Physical mesomechanics. 2017. Vol. 20. No. 4. Pp. 85–93.
5. *Krasnoveikin V.A., Kozulin A.A., Skripnyak V.A.* Detection of structural changes and mechanical properties of light alloys after severe plastic deformation / IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 919 (2017) 012012.

МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ АЛЮМИНИЯ МЕТОДОМ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

О.Н. Загородкин, Д.Б. Даутбаева

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
zagorodkin.o@gmail.com

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, механические свойства, микротвердость.

Аннотация. В работе методом интенсивной пластической деформации по схеме равноканального углового прессования были обработаны призматические образцы технически чистого алюминия. Проведен комплекс исследований физико-механических свойств исследуемых материалов, измерение микротвердости, предела текучести и прочности при одноосном растяжении. Оценка полученных результатов показала повышение всех измеряемых величин в сплаве по мере увеличения количества повторений обработки, что является эффектом измельчения его структуры в результате накопления деформации. Результаты исследований показали эффективность выбранного метода обработки для получения повышенных физико-механических свойств в алюминиевом сплаве.

MODIFICATION OF ALUMINUM STRUCTURE BY SEVERE PLASTIC DEFORMATION

Oleg Zagorodkin and Diana Dautbaeva

National research Tomsk State University, Russian Federation
zagorodkin.o@gmail.com

Keywords: severe plastic deformation, mechanical properties, microhardness.

Abstract. In the labor, the prismatic samples of commercially pure aluminum were processed by the method of intensive plastic deformation according to the scheme of equal-channel angular pressing. Complex studies of physical and mechanical properties of the materials, measurement of micro-hardness, yield strength and strengths under uniaxial tension were done. Appraisal of the results showed the rise of all measured quantities in the alloy with increase of numbers of repetitions of treatment, which is the effect of grinding its structure as a result of strain accumulation. The results of research showed the effectiveness of the selected processing method for obtaining increased physical and mechanical properties in an aluminum alloy.

Модификация крупнокристаллической (КК) зеренной структуры конструкционных алюминиевых сплавов, в частности, ее измельчение с помощью интенсивной пластической деформации (ИПД) до нано- и ультрамелкозернистого состояния, открывает новые возможности для создания нового класса сплавов с заданными свойствами. В настоящий момент из-

вестно множество методов обработки, успешно применяющихся на производстве, наиболее распространенные из них – вращение под давлением [1], поверхностная обработка [2], рифление и равноканальное угловое прессование [3].

Целью настоящей работы явилось исследование особенностей влияния интенсивной пластической деформации на структуру и физико-механические свойства алюминия при обработке ИПД по схеме равноканального углового прессования.

Были проведены исследования влияния ИПД на микроструктуру и механические свойства алюминий технической чистоты (хим. состав ~99.5 %, остальное Si~0.2 %, Fe~0.2 %, Ti~0.1 %). Деформационную обработку по схеме равноканального углового прессования призматических заготовок (размеры 8×8×45 мм³) из исследуемого материала проводили в специально изготовленных стальных пресс-формах с двумя каналами, пересекающимися под углом 90 градусов. Повторные прессования заготовок проводили до 2 и 4 проходов по маршруту Вс, заключающемуся в повороте образца вокруг продольной оси на 90 градусов при каждом повторении, при температуре 200 °С и скорости прессования 15 мм/мин с применением высокотемпературной смазки на основе дисульфида молибдена.

После обработки образцов ИПД проводили измерения микротвердости HV (по Виккерсу) на боковой поверхности призматических заготовок в разных участках вдоль оси прессования. Использовали автоматический микротвердомер HNV G21ST SHIMADZU. Измерения выполняли с усилием 0.5 Н и выдержкой 10 с. При анализе полученных результатов установлено значительное повышение средней величины HV до 468 МПа (2 прохода) и 542 МПа (4 прохода) от исходной равной 348 МПа.

Эксперименты на одноосное растяжение проводились на универсальной электромеханической испытательной машине Instron 3369 при скорости деформации 0.001 1/с и температуре испытания 25 °С. Использовали микрообразцы для растяжения в форме плоских двухсторонних лопаток с размером рабочей части 10 мм, толщиной 1 мм, шириной 3 мм и радиусом скругления 2.5 мм, которые были вырезаны из призматических заготовок вдоль оси прессования с использованием метода электроэрозионной резки. Испытания на растяжение показали повышение условного предела текучести с 40 до 90 МПа (2 прохода) и 100 МПа (4 прохода), временного сопротивления с 70 до 119 МПа (2 прохода) и 149 МПа (4 прохода) при одновременном уменьшении предельных степеней деформации. По характеру кривой деформирования видно, что при повышении условного предела текучести после обработки у материала образцов теряется склонность к упрочнению, при этом значения неравномерной деформации значительно преобладает над равномерной.

Литература

1. *Murashkin M.Y., Valiev R.Z., Markushev M.V., Ivanisenko Y.V.* Strength of commercial aluminum alloys after equal channel angular pressing and post-ecap processing // *Solid State Phenomena*. 2006. Т. 114. С. 91–96.
2. *Москвичев Е.Н., Скрипняк В.А., Скрипняк В.В., Козулин А.А., Лычагин Д.В.* Исследование структуры и механических свойств алюминиевого сплава 1560 после интенсивной пластической деформации методом прессования с рифлением // *Физическая мезомеханика*. 2017. Т. 20. № 4. С. 85–93.
3. *Krasnoveikin V.A., Kozulin A.A., Skripnyak V.A.* Detection of structural changes and mechanical properties of light alloys after severe plastic deformation // *Journal of Physics: Conference Series*, 919 (1), 2017, 012012.

References

1. *Murashkin M.Y., Valiev R.Z., Markushev M.V., Ivanisenko Y.V.* Strength of commercial aluminum alloys after equal channel angular pressing and post-ecap processing // *Solid State Phenomena*. 2006. Т. 114. С. 91–96.
2. *Moskvichev E.N., Skripnyak V.A., Skripnyak V.V., Kozulin A.A., Lychagin D.V.* Structure and Mechanical Properties of Aluminum 1560 Alloy after Severe Plastic Deformation by Groove Pressing // *Physical Mesomechanics*. 2018. 21(6). С. 515–522.
3. *Krasnoveikin V.A., Kozulin A.A., Skripnyak V.A.* Detection of structural changes and mechanical properties of light alloys after severe plastic deformation // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. 919(1). 012012.

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРНО-МОРФОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МИКРОДУГОВЫХ СТРОНЦИЙ-КРЕМНИЙ-СОДЕРЖАЩИХ КАЛЬЦИЙФОСФАТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Я.О. Иващенко, Е.Г. Комарова, Е.А. Казанцева

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
yanaivashchenko16@gmail.com

Ключевые слова: стронций-, кремний-содержащие кальций фосфатные покрытия, структура, морфология, МДО.

Аннотация. Исследованы морфология поверхности и структура Sr-Si-КФ покрытий, осажденных методом микродугового оксидирования при различных импульсных напряжениях в интервале 200–350 В, методом растровой электронной микроскопии. Показано, что с повышением приложенного напряжения увеличиваются средний размер элементов структуры (сфер и пор), поверхностная и объемная пористость, толщина и шероховатость поверхности Sr-Si-КФ покрытий, при этом кажущаяся плотность покрытий уменьшается.

STUDY OF THE STRUCTURAL AND MORPHOLOGICAL PROPERTIES OF MICRO-ARC STRONTIUM-SILICON-CONTAINING CALCIUM PHOSPHATE COATINGS

Ya.O. Ivachshenko¹, E.G. Komarova, E.A. Kazantceva

National Research Tomsk State University, Russian Federation¹
yanaivashchenko16@gmail.com

Keywords: strontium-silicon-containing calcium phosphate coatings, structure, morphology, MDO.

Abstract. The surface morphology and the structure of Sr-Si-CaP coatings deposited by micro-arc oxidation under the different pulsed voltages in the range of 200–350 V were studied by the scanning electron microscopy. It is shown that the average size of the structure elements (spheres and pores), surface and volume porosity, thickness and surface roughness of Sr-Si-CaP coatings increase with the increase of the applied voltage, while the apparent density of the coatings decreases.

В современном медицинском материаловедении при создании новых имплантационных материалов актуальным направлением является биофункционализация и модифицирование поверхности металлических имплантатов путем нанесения биоактивных покрытий. Для формирования покрытий на основе фосфатов кальция перспективным методом является микродуговое оксидирование (МДО). Использование в составе электролита порошка биоактивного гидроксиапатита (ГА), замещенного ионами стронция (Sr^{2+}) и силикат ионами (SiO_4^{4-}), обеспечит уникальные биоактивные и остеостимулирующие свойства покрытиям [1].

Целью работы было изучение структурно-морфологических свойств микродуговых стронций-кремний-содержащих кальций фосфатных (Sr-Si-КФ) покрытий.

Синтез Sr-Si-КФ покрытий проводили методом МДО на образцы из чистого титана марки ВТ1-0 по схеме, описанной в работе [2] при варьировании величины импульсного напряжения от 200 до 350 В. Состав электролита был следующий: H_3PO_4 (30%), CaCO_3 (100 г/л) и Sr-Si-замещенный ГА ($\text{Ca}_{9.5}\text{Sr}_{0.5}(\text{PO}_4)_{5.5}(\text{SiO}_4)_{0.5}(\text{OH})_2$, 60 г/л) [2].

Исследования методом растровой электронной микроскопии (РЭМ, LEO EVO 50 Zeiss) показали, что морфология поверхности всех покрытий представлена структурными элементами сфероидальной формы (сферы и полусферы) с открытыми порами (рис. 1, а, в, д). При повышении приложенного напряжения увеличивается интенсивность микроплазменных разрядов, воздействующих на подложку. Это ведёт к увеличению размеров элементов структуры и частичному их разрушению с образованием осколочных элементов. При этом на поверхности разрушенных полусфер образуются скопления многочисленных кристаллов пластинчатой формы дли-

ной до 15 мкм (рис. 1, в, д). Расчет размеров элементов структуры с помощью метода секущей и дальнейший статистический анализ показали, что для всех покрытий гистограммы распределения сфер и пор по размерам имеют нормальное одномодальное распределение. При этом с повышением электрического напряжения средний размер сфер и пор в покрытиях увеличивается от 17 до 24.6 мкм и от 6.2 до 8.1 мкм, соответственно.

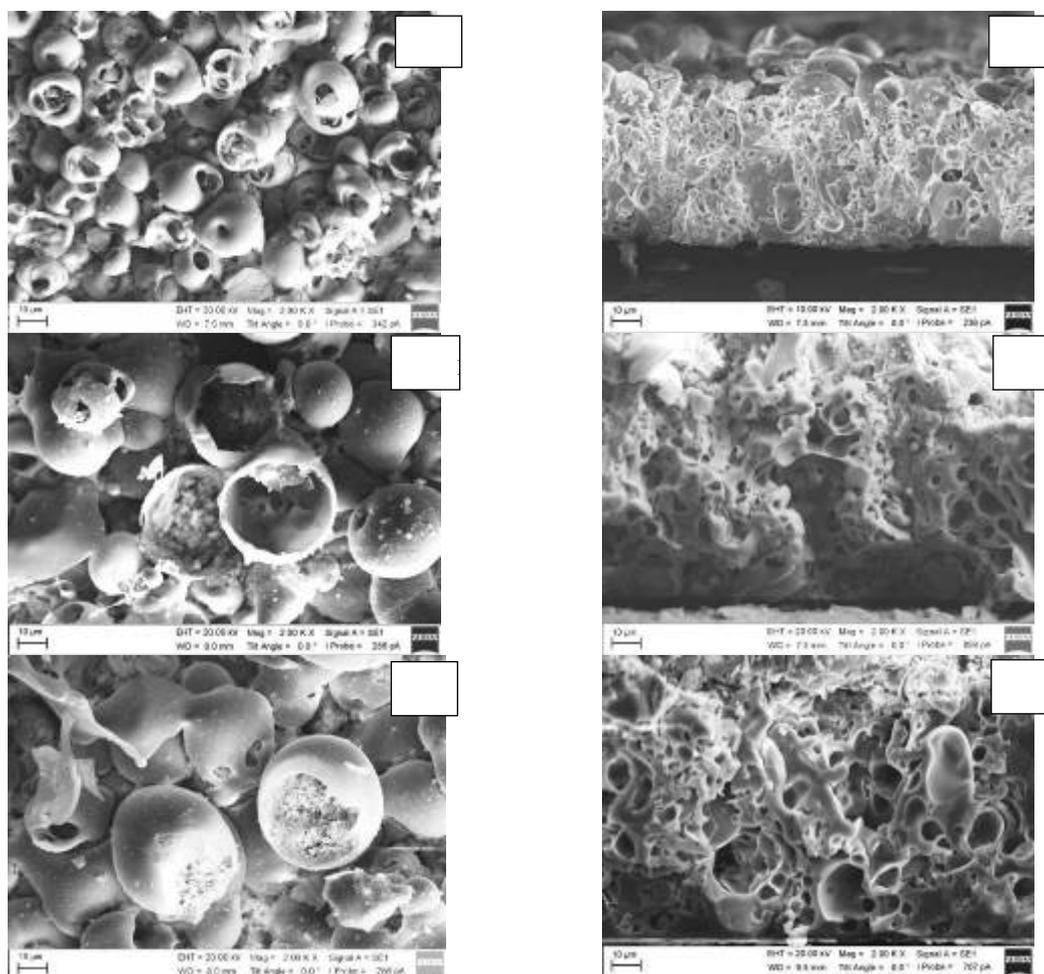


Рис. 1. РЭМ-изображения поверхности (а, в, д) и поперечного излома Sr-Si-KF (б, г, е), нанесенных при импульсных напряжениях: 200 В (а, б); 300 В (в, г); 350 В (д, е)

Пористость покрытий определяли по РЭМ-изображениям, как отношение «свободной» площади покрытий, занятой порами, к общей площади микрофотографии. Результаты измерений показали, что с повышением импульсного напряжения поверхностная пористость покрытий увеличивается от 25 до 35 %.

Исследование поперечных изломов покрытий методом РЭМ показало, что сфероидальные структурные элементы формируются только на поверхности, тогда как структура покрытий представлена многочисленными разветвленными порами сложной формы (рис. 1, б, г, е). В покрытиях, сформированных при низких напряжениях 200–250 В, размер пор не пре-

вышает 15 мкм, а средний размер составляет 5.1 мкм. С повышением напряжения до 350 В поры растут в интервале 0.5–30 мкм. При этом гистограммы распределения пор по размерам приобретают бимодальный характер. Это происходит из-за того, что в покрытиях, полученных при высоких напряжениях, наряду с микропорами формируются макропоры с размерами 15–30 мкм (средний размер – 20 мкм), образованные в результате воздействия каскада интенсивных микродуговых разрядов в локализованной области. Формирование в покрытиях макропор сопровождается увеличением объемной пористости покрытий от 25 до 40 %.

Так же было показано, что с увеличением импульсного напряжения толщина и шероховатость покрытий линейно увеличиваются от 55 до 150 мкм и от 3.2 до 8.5 мкм, соответственно, в то время как кажущаяся плотность уменьшается с 1.5 до 1.1 г/см³.

Литература

1. Медков М.А., Грищенко Д.Н., Руднев В.С., Шулепин И.В., Череповский А.С., Пономаренко А.И., Дюйзен И.В. Особенности остеорепарации при использовании биоматериалов на основе гидроксиапатита и стронцийзамещенного гидроксиапатита // Тихоокеанский медицинский журнал. 2015. № 4. С. 48–52.

2. Комарова Е.Г. Закономерности формирования структуры и свойств микродуговых покрытий на основе замещенных гидроксиапатитов на сплавах титана и ниобия: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е.Г. Комарова. Томск, 2017. 190 с.

References

1. Medkov M.A., Grischenko D.N., Rudnev V.S., Shulepin I.V., Cherepovsky A.S., Ponomarenko A.I., Duyzen I.V. Features osteoreparation when using biomaterials based on hydroxyapatite and strontium-substituted hydroxyapatite // Pacific Medical Journal. 2015. No. 4. Pp. 48–52.

2. Komarova E.G. Patterns of formation of the structure and properties of microarc coatings based on substituted hydroxyapatites on titanium and niobium alloys: dis. ... Cand. tech. Sciences / E.G. Komarov. Tomsk, 2017. 190 p.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ КОМПОЗИЦИОННЫХ ШНУРОВ

А.К. Каравацкий, С.В. Пономарев

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
raven@ftf.tsu.ru

Ключевые слова: углеволокно, компаунд, активный силовой элемент, электрический привод, деформация.

Аннотация. В работе приведено описание подготовки экспериментального исследования по температурной деформации сильно скрученного углеволоконного шнура пропитанного двухкомпонентным силиконовым компаундом под действием электрического тока и приведены результаты.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE TEMPERATURE DEFORMATION OF COMPOSITION CORDS

A.K. Karavatskiy, S.V. Ponomarev

National Research Tomsk State University, Russian Federation
raven@ftf.tsu.ru

Keywords: carbon fiber, compound, active force element, electric drive, deformation.

Abstract. The paper describes the preparation of an experimental study on the temperature deformation of a highly twisted carbon fiber cord impregnated with a two-component silicone compound under the action of an electric current and the results are presented.

В современных условиях развитие технологий построения спутников пошло по пути построения крупногабаритных рефлекторов и увеличения точности отражающей поверхности. Для этого необходима разработка небольших, легких и точных приводов или совершенствование существующих.

Для уменьшения массогабаритных характеристик приводов, использующих различные виды активных силовых элементов двигателей на основе, например, пьезокерамики или материалов с памятью формы. Новым перспективным направлением является разработка силовых элементов двигателей на основе композиционных шнуров. Преимущество композиционных шнуров в компактности, малом весе и в отсутствии редукторов для передачи линейных перемещений. Проведенные предварительные исследования показали, что влияние повышенной температуры существенно снижает ресурс композиционного шнура. Понимание механики деформирования углеволоконных шнуров при нагревании имеет важное значение для повышения эффективности и расширения области их применения.

В НИИ ПММ ведутся поисковые научные исследования, направленные на поиск новых материалов и структур, которые можно использовать в качестве активного силового элемента двигателя, а также проходят разработки линейных двигателей с активным силовым элементом из пьезокерамики. Наиболее свежие исследовательские работы представлены в журнале «Smart materials and structures». В 2011 г. была продемонстрирована возможность объемного анизотропного расширения сильно скрученного волокна из углеродных нанотрубок покрытого слоем компаунда по средствам нагрева при погружении шнура в электролит.

В данной работе рассмотрен процесс изготовления и температурного деформирования, сильно скрученного углеволоконного шнура посредством пропускания сквозь шнур электрического тока. Шнур расплетался из угле-ткани марки «Toray 12K» производства «Kardarna» (Чешская республика), с одинаковыми механическими характеристиками по основе и утку пропитывался компаундом марки «ПентЭласт» (изготовления «Пента-91»). Предварительное скручивание волокна с одним закрепленным концом производилось после пропитки компаундом для получения прямого шнура с постоянным радиусом. Через сутки, после полного высыхания, шнур скручивают повторно в емкости, заполненной жидким, оптически прозрачным смазочным материалом.

Для проведения эксперимента был изготовлен экспериментальный стенд, состоящий из вертикально расположенной поверхности, на которой расположены полозья с помещенной между ними пластиной, к которой крепится шнур сверху и нагрузка – снизу. Сверху шнур закрепляется таким образом, чтобы ограничить вращение. Электроды крепятся в верхней и нижней частях шнура, по центру располагается датчик, который отключает подачу электричества при достижении необходимой температуры.

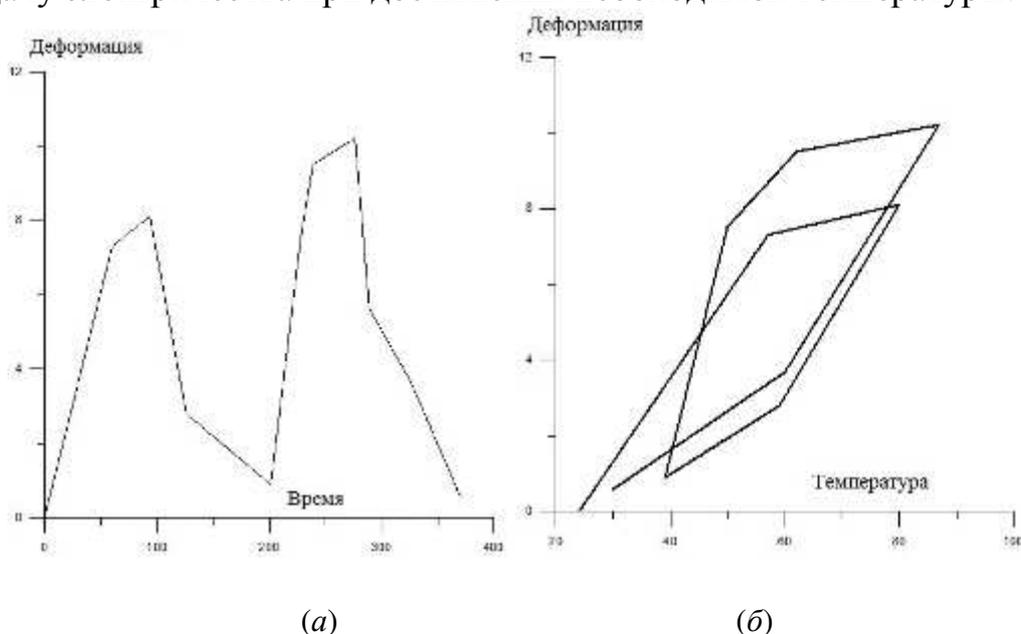


Рис. 1. Зависимость деформации от времени (а) и деформации от температуры (б) при нагревании углеволоконного шнура

Для проведения эксперимента был взят отрез шнура длиной 360 мм. К шнуру были подключены электроды и подана нагрузка 20 Вт. В результате нагрева шнур начал деформироваться, поднимая при этом груз массой 3 кг. Результаты эксперимента показаны на графике.

В ходе подготовки исследований был разработан стенд для подготовки и исследования образцов. Разработана методика накручивания углеволоконных шнуров и проведены эксперименты по деформированию сильноскрученных шнуров под действием электрического тока.

Результаты проведенных исследований можно трактовать как качественные тесты, так как не были получены определяющие характеристики температурной деформации композиционных шнуров, но эксперименты подтверждают результаты экспериментов, представленных в иностранных источниках.

Исследование композиционных шнуров в качестве активного силового элемента двигателя является перспективной разработкой, но требует проведения дополнительных экспериментальных и теоретических исследований.

Литература

1. Хейнсис С. Новый взгляд на искусственные мышцы // Известия Национальной академии наук 2016. Т. 113. № 42. С. 11709–117016.
2. Азиз С., Форуги Дж., Браун Х.Р. и Спинкс Г.М. Управляемое и масштабируемое торсионное воздействие на скрученные волокна из нейлона 6 // Journal of Polymer Science. 2016. 54. С. 1278–1286.
3. Ламута С., Месселот С., Тауфик С. Теория приведения в действие при растяжении армированных волокнами спиральных мышц. Smart Materials and Structures. 2018. Т. 27, № 5.

References

1. Carter S. Haines et al. New twist on artificial muscles. PNAS 2016. Vol. 113. № 42. Pp. 11709–117016.
2. Aziz S., Foroughi J., Brown H.R and Spinks G.M. Controlled and Scalable Torsional Actuation of Twisted Nylon 6 Fiber // Journal of Polymer Science. 2016. 54. P. 1278–1286.
3. Lamuta C., Messelot S., Tawfik S. Theory of the tensile actuation of fiber reinforced coiled muscles. Smart Materials and Structures. 2018. Vol. 27, № 5.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛЮМООКСИДНОЙ КЕРАМИКИ С РАЗЛИЧНЫМ ЗНАЧЕНИЕМ ПОРИСТОСТИ

В.А. Микушина^{1,2}, И.Ю. Смолин^{1,2}, А.С. Кульков^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия
mikushina_93@mail.ru

Ключевые слова: пористая керамика, прочность, трехточечный изгиб, мезоуровень, конечно-разностный метод, разрушение.

Аннотация. Выполнены экспериментальные и численные исследования прочности при трехточечном изгибе образцов алюмооксидной керамики с различным значением пористости (от 15 до 30%). Полученные значения предела прочности варьируются от

150 до 280 МПа. Моделирование особенностей разрушения образцов керамики с пористой структурой выполнено на мезоуровне в двумерной постановке в условиях плоской деформации с использованием конечно-разностного метода Уилкинса. В качестве критерия разрушения использован критерий поврежденности с учетом вида напряженного состояния (параметра Лодэ–Надаи). Проанализировано влияние структуры пористой керамики на характер локальных разрушений в мезообъемах материала, а также на макроскопическую диаграмму деформирования.

THE STUDY OF THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF ALUMINA CERAMICS WITH DIFFERENT POROSITY VALUES

Valentina A. Mikushina^{1,2}, Igor Yu. Smolin^{1,2}, Aleksey S. Kulkov^{1,2}

¹National Research Tomsk State University, Russian Federation

²Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Russian Federation
mikushina_93@mail.ru

Keywords: porous ceramics, strength, three-point bending, meso-level, finite-difference method, fracture.

Abstract. The experimental and numerical studies of the strength in three-point bending of alumina ceramics samples with porosity values varying from 15 to 30 % were performed. The obtained values of flexural strength range from 150 to 280 MPa. The modeling of fracture features of ceramic samples with porous structure is performed at the meso level in a two-dimensional statement under plane-strain conditions using the finite-difference method. The damage criterion with regard to the stress state type (Lode parameter) was used. The influence of the porous ceramics structure on local fracture patterns in material mesovolumes as well as on the macroscopic deformation diagram was analyzed.

В настоящей работе проведены экспериментальные и численные исследования прочности образцов алюмооксидной керамики с различным значением пористости (от 15 до 30%). Прямоугольные образцы, полученные из порошка Al_2O_3 методом шликерного литья, испытывали на трехточечный изгиб до разрушения. Полученные значения предела прочности варьировались от 150 до 280 МПа. Эксперимент показал, что на образцах встречаются прямолинейные трещины, параллельные оси нагружения, и криволинейные.

Численное исследование механического поведения образцов керамики на основе Al_2O_3 с пористой структурой выполнено на мезоуровне. В качестве геометрических моделей были рассмотрены объемы с явным учетом пор. Пористая структура мезообъема взята из данных электронной микроскопии исследуемых образцов. Для каждого значения пористости было смоделировано поведение трех различных компьютерных моделей мезообъемов в условиях одноосного растяжения. Моделирование проведено в двумерной постановке в условиях плоской деформации с использованием конечно-разностного метода Уилкинса [1]. Для описания механическо-

го отклика пористых керамических материалов на мезоуровне использованы определяющие соотношения, учитывающие накопления неупругих деформаций и повреждений, которые вызывают деградацию прочностных свойств [2, 3]. В качестве критерия разрушения использован критерий поврежденности с учетом вида напряженного состояния, определяемого по параметру Лоде–Надаи [3, 4].

В результате проведенных расчетов проанализировано влияние структуры пористой керамики на характер локальных разрушений в мезообъемах материала, а также на макроскопическую диаграмму деформирования. Наличие сильных концентраторов напряжений в образцах определяет место зарождения трещин и влияет на их распространение в моделируемых мезообъемах образца. Диаграмма деформирования имеет характерный для хрупких материалов вид. Показано, что с уменьшением пористости нелинейно возрастает модуль Юнга и прочность материала. Полученные из расчетов значения прочности хорошо согласуются с экспериментальными значениями для всех значений пористости [5].

Исследование выполнено при поддержке Программы повышения конкурентоспособности ТГУ и в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы, направление III.23.

Литература

1. *Wilkins M.L.* Computer Simulation of Dynamic Phenomena. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1999. 246 p.
2. *Smolin I.Yu., Makarov P.V., Eremin M.O., Matyko K.S.* Numerical simulation of mesomechanical behavior of porous brittle materials // Proc. Struct. Integrity. 2016. Vol. 2. Pp. 3353–3360.
3. *Еремин М.О.* Применение метода механической аналогии для численного моделирования разрушения керамических композитов $ZrO_2-Al_2O_3$ в трехмерной постановке // Физическая мезомеханика. 2015. Т. 18. № 3. С. 105–112.
4. *Макаров П.В., Еремин М.О.* Моделирование разрушения керамических композиционных материалов при одноосном сжатии // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2013. № 1 (21). С. 61–74.
5. *Kulkov A.S., Smolin I.Yu., Mikushina V.A.* Investigation of mechanical response of Al_2O_3 ceramic specimens to loading with consideration for their structural features // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2051. Pp. 020162-1–020162-4.

References

1. *Wilkins M.L.* Computer Simulation of Dynamic Phenomena. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1999. 246 p.
2. *Smolin I.Yu., Makarov P.V., Eremin M.O., Matyko K.S.* Numerical simulation of mesomechanical behavior of porous brittle materials // Proc. Struct. Integrity. 2016. Vol. 2. Pp. 3353–3360.
3. *Eremin M.O.* Numerical simulation of fracture of $ZrO_2-Al_2O_3$ ceramic composites. Phys. Mesomech. 2016. 19(4). Pp. 452–458.

4. *Makarov P.V., Eremin M.O.* Simulation of ceramic compositional materials fracture upon uniaxial compression // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mehanika. Tomsk State University // Journal of Mathematics and Mechanics. 2013. № 1 (21). Pp. 61–74.

5. *Kulkov A.S., Smolin I.Yu., Mikushina V.A.* Investigation of mechanical response of Al₂O₃ ceramic specimens to loading with consideration for their structural features // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2051. pp. 020162-1–020162-4.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ТИТАНА VT1-0 И СПЛАВА Zr-1 МАС. % Nb В РЕЖИМЕ ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

А.М. Майрамбекова¹, А.Ю. Ерошенко², М.В. Банников³

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия

³Институт механики сплошных сред УрО РАН, Россия

aikol@ispms.tsc.ru

Ключевые слова: титан, сплав циркония, ультрамелкозернистая структура, гига-цикловая усталость.

Аннотация. В данной работе изучены особенности микроструктуры и усталостное разрушение технически чистого титана марки VT1-0 и сплава Zr-1 мас. % Nb в различных структурных состояниях. Проведены усталостные испытания для образцов титана VT1-0 и сплава Zr-1 мас.% Nb в ультрамелкозернистом, мелкозернистом и крупнокристаллическом состояниях в режиме гигацикловой усталости. Установлено, что формирование ультрамелкозернистой структуры в титане VT1-0 и сплаве Zr-1 мас. % Nb приводит к увеличению предела усталости титана VT1-0 в 1.3 раза, а сплава Zr-1 мас. % Nb в 1.7 раза в гигацикловой области по сравнению с мелкозернистым и крупнокристаллическим состоянием.

STUDY OF THE FATIGUE FAILURE OF TITANIUM VT1-0 AND ZR-1 WT. % NB ALLOY IN THE GIGACYCLE FATIGUE MODE

A.M. Mairambekova¹, A.Yu. Eroshenko², M.V. Bannikov³

¹National Research Tomsk State University, Russia

²Institute of Strength Physics and Materials Science, SB RAS, Russia

³Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Russia

aikol@ispms.tsc.ru

Keywords: titanium, zirconium alloy, ultrafine-grained structure, gigacycle fatigue.

Abstract. In this paper we studied the microstructure features and fatigue failure of technically pure titanium VT1-0 and Zr-1 wt. % Nb alloy at different structural states. Fatigue testing of ultrafine-grained, fine-grained and coarse-grained VT1-0 and Zr-1 wt% Nb alloy

samples was performed under conditions of gigacycle fatigue mode. It has been established that the formation of the ultrafine-grained structure in VT1-0 and Zr-1 wt. % Nb alloy leads to an increase in the fatigue limit of titanium by 1.3 times and the zirconium alloy by 1.7 times in the gigacycle region when compared to the fine-grained and coarse-grained states.

Разработка новых биоматериалов для медицинских приложений в качестве имплантатов, представляет собой задачу высокой сложности. Наиболее широко применяемыми в медицине являются «технически чистый» титан марок VT1-0, VT1-00, Grade 1-4, в том числе титановые β -сплавы, безванадиевые сплавы и циркониевые сплавы Zr-1Nb, Zr-2,5Nb и др. [1]. Циркониевые сплавы, как и титановые сплавы, обладают уникальным комплексом физико-механических, коррозионностойких и биологических свойств. Благодаря этим свойствам находят широкое применение, в стоматологии, ортопедическом протезировании и в качестве конструкционных материалов в различных отраслях промышленности.

Создание объемной наноструктурной (НС) и/или ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры в металлах и сплавах методами интенсивной пластической деформации (ИПД) позволяет повысить механические свойства металлических материалов (пределы текучести и прочности, твердость, сопротивление к усталостному разрушению и циклическая долговечность и др.) [2].

С увеличением длительности эксплуатации имплантата в организме накапливается усталостное повреждение, которое в итоге может привести к расшатыванию и разрушению имплантата. Одной из причин разрушения имплантатов является неадекватная механическая нагрузка, связанные с накоплением усталостных повреждений при больших циклических нагрузках. В связи с этим проблема повышения циклической долговечности металлов и сплавов сохраняет высокую актуальность. Известно, что формирование УМЗ структуры в металлах и сплавах эффективно повышает сопротивление к усталостному разрушению в области многоциклового усталости (10^6 циклов нагружения).

В настоящее время актуальными являются исследования, посвященные влиянию НС/УМЗ состояния на процессы разрушения при циклических нагрузках, анализу кривой усталости в широком диапазоне количества циклов нагружения, не только для многоциклового усталости, но и для гигацикловой усталости, т.е. более 10^9 циклов [4, 5].

В работе были получены образцы технически «чистого» титана VT1-0 и сплава Zr-1Nb (Zr-1 мас.%Nb, сплав Э110) в УМЗ состоянии комбинированным двухэтапным методом интенсивной пластической деформации (ИПД), который включал многократное абс-прессование и многоходовую прокатку в ручьевых валках с последующим рекристаллизационным отжигом [3]. Часть образцов титана и сплава циркония в УМЗ состоянии были переведены в крупнокристаллическое (КК) и мелкозернистое состояния (МЗ) за счет рекристаллизационных отжигов. Из заготовок VT1-0 и Zr-1Nb

в УМЗ, КК, МЗ состояниях были изготовлены образцы для усталостных испытаний в виде цилиндрических лопаток. Геометрические размеры лопаток были определены по аналитическим формулам [4], в зависимости от плотности исследуемого материала и его динамического модуля Юнга отвечающим условиям стоячей ультразвуковой волны и резонанса испытательной системы. Усталостные испытания проведены на ультразвуковой резонансной нагружающей машине Shimadzu USF-2000 для исследуемых образцов в режиме гигацикловой усталости.

Выполнены исследование микроструктуры и фазового состава титана VT1-0 и сплава Zr-1Nb в УМЗ, КК и МЗ состояниях. Для обоих исследуемых материалов характер УМЗ микроструктуры подобный. Наблюдаются как фрагменты и субзерна, так уже сформировавшиеся зерна. Средний размер элементов структуры (зерна, субзерна и фрагменты) в УМЗ состоянии составил $0,20 \pm 0,1$ мкм для титана VT1-0 и $0,22 \pm 0,1$ мкм – для сплава Zr-1Nb. В случае титана VT1-0 в КК состоянии средний размер зерен оказался равным 27 ± 8 мкм, а для сплава Zr-1Nb в МЗ состоянии – $1,9 \pm 0,4$ мкм. Микроструктура сплава циркония представлена матричными зернами циркония и расположенными по границам и в теле матричных зерен частицами ниобия со средним размером 0.4 мкм.

Установлено повышение усталостной прочности при гигацикловых режимах нагружения для титана VT1-0 и сплава Zr-1Nb с УМЗ структурой. Формирование УМЗ структуры приводит к увеличению предела усталости титана VT1-0 в 1.3 раза, а сплава Zr-1Nb в 1.7 раза в гигацикловой области по сравнению с мелкозернистым и крупнокристаллическим состоянием.

Работа выполнена в рамках Программ фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2017–2020 гг., Программа III.23.2., проект № 23.2.

Литература/References

1. *Mitsuo Niinomi, Masaaki Nakai, Junko Hieda.* Development of new metallic alloys for biomedical application // *Acta Biomaterialia*. 2012. № 8. Pp. 3888–3903.
2. *Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G.* Bulk nanostructured materials: fundamentals and applications. New Jersey: John Wiley & Sons. 2014.
3. *Sharkeev Yu.P., Eroshenko A.Yu., Danilov V.I et.al.* Microstructure and Mechanical Properties of Nanostructured and Ultrafine-Grained Titanium and the Zirconium Formed by the Method of Severe Plastic Deformation // *Russian Physics Journal*. 2014. Vol. 56. Pp. 1156–1162.
4. *Bathias C.* There is no infinite fatigue life in metallic materials // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 1999. № 22. Pp. 559–565.
5. *Bannikov M.V., Naimark O.B., Oborin V.A.* Experimental investigation of crack initiation and propagation in high- and gigacycle fatigue in titanium alloys by study of morphology of fracture // *Fratturaed Integrità Strutturale*. 2016. Vol. 35. P. 50–56.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ KNO_3 НА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СМЕСЕВОЙ КОМПОЗИЦИИ

М.П. Орлова, Т.И. Горбенко

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
maria-orlova-93@mail.ru

Ключевые слова: газогенерирующие композиции, смешанные композиции, термодинамический анализ, влияние добавки KNO_3 .

Аннотация. В работе представлены энергетические характеристики газогенерирующих композиций на основе нитрата аммония и инертного горючего-связующего. Рассмотрено влияние добавки нитрата калия на характеристики горения смешанных композиций. Процентное соотношение компонентов в составе смешанных композиций оценивали критерием технологичности. Анализ термодинамических расчетов показал возможность получения низкотемпературного состава с возможностью повышения газообразных продуктов сгорания при введении добавки KNO_3 .

THE EFFECT OF THE ADDITIVE KNO_3 ON THE THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE MIXED COMPOSITION

M.P. Orlova and T.I. Gorbenko

National Research Tomsk State University, Russian Federation
maria-orlova-93@mail

Keywords: gas-generation composition, mixed compositions, thermodynamic analysis, the effect of the additive KNO_3 .

Abstract. The paper presents the energy characteristics of gas-generating compositions based on ammonium nitrate and inert combustible binder. The influence of the addition of potassium nitrate on the burning characteristics of the mixed compositions is considered. The percentage of components in the composition of the mixed components assesses the criteria for manufacturability. The analysis of thermodynamic calculations showed the possibility of obtaining a low-temperature composition with the possibility of increasing gaseous combustion products with the introduction of an additive KNO_3 .

Газогенерирующие композиции используются в различных отраслях науки и человеческой деятельности [1]. В данной работе рассматриваются газогенерирующие композиции на примере автомобильных мешков безопасности для промышленных устройств. Современные газогенерирующие композиции для автомобильных мешков безопасности должны удовлетворять широкому набору жестких требований: бездымность (т.е. композиция должна быть построена на базе CHNO -соединений); высокие скорости го-

рения и термостойкость, сохранение эксплуатационных характеристик в течение 10–15 лет и практическое отсутствие в продуктах горения токсичных веществ [2].

Композиции на основе нитрата аммония (NH_4NO_3 , НА) в продуктах сгорания образуют только газообразные химические соединения. Однако НА имеет несколько фазовых переходов в температурном диапазоне эксплуатации от -50 до $+110^\circ\text{C}$. Поэтому при длительном хранении и больших перепадах температур структура содержащей НА композиции может разрушаться [3, 4]. Композиции на основе НА характеризуются низкой скоростью горения (около 3–5 мм/с при 100 атм.). Для улучшения эксплуатационных свойств газогенерирующих композиций на основе НА целесообразно ввести добавку окислителя нитрата калия (KNO_3 , НК). Известны рецептуры смесевых композиций на основе НК, преимуществом которых наряду с достаточно высоким удельным импульсом тяги (1960 (н·с)/кг) является низкая температура продуктов сгорания (1750°C).

Цель данной работы – исследование влияния добавки нитрата калия на термодинамические характеристики газогенерирующей композиции на основе нитрата аммония и инертного горючего-связующего марки СКДМ-80.

Таблица 1. Расчет компонентных составов смесевых композиций

Номер смесевой композиции / Параметр технологичности (B)	Компоненты	Содержание компонентов в смесевой композиции при различном α , масс. %		
		0.3	0.4	0.5
1	KNO_3 NH_4NO_3 СКДМ-80	5.000	5.000	5.000
		59.030	60.440	64.480
		35.970	34.560	30.520
		B	1.780	1.890
2	KNO_3 NH_4NO_3 СКДМ-80	7.000	7.000	7.000
		60.765	68.228	73.570
		32.235	24.772	19.430
		B	2.102	3,037

Расчет компонентных составов смесевых композиций проведен для коэффициента избытка окислителя $\alpha=0.3; 0.4; 0.5$ (табл. 1). Процентное соотношение компонентов в составе смесевой композиции полезно оценивать критерием технологичности B (табл. 1). Под технологичностью топливной массы понимают разработку таких топливных композиций, в которых соотношение вязких и твердых составляющих обеспечивает возможность формирования образцов, сохранение формы заряда, возможность механической обработки образца. За критерий технологичности выбрано соотношение твердых и жидких компонентов смесевой композиции:

$$B = N_1 / N_2 ,$$

где N_1 , N_2 – процентное соотношение твердых и жидких компонентов в смеси, соответственно. Для хороших технологических показателей необходимо чтобы значение параметра B находилось в промежутке от 2.8 до 6.

Для термодинамического расчета использовали программный комплекс ASTRA (МГТУ им. Н.Э. Баумана), директива Nozzle (адиабатическое расширение). Расчет проведен для газогенерирующих смесевых композиций:

1) НА (75%) + СКДМ-80 (25%), $\alpha=0.5$;

2) НА (73.6%) + СКДМ-80 (19.4%) + добавка KNO_3 (7%), $\alpha =0.5$, при давлении в камере $P_k=1, 2, 4$ МПа и $P_{вых.}=0.1$ МПа.

В табл. 2 представлены исходные данные для термодинамического расчета: компоненты смеси (СК), эквивалентные формулы, энтальпии образования [5], давление в камере и давление на выходе из соплового блока.

Таблица 2. Исходные данные для термодинамического расчета

Компонент	Эквивалентная формула	Энтальпия образования ΔH , кДж/кг	Давление в камере P_k , МПа	Давление на выходе $P_{вых.}$, МПа
НА	$N_{12.493}H_{49.973}N_{12.493}O_{37.48}$	-4569	1, 2, 4	0.1
KNO_3	$K_{9.890}N_{9.890}O_{29.673}$	-4891		
СКДМ-80	$C_{72.044}H_{129.169}S_{0.142}$	-1086		

Рассмотрено влияние добавки KNO_3 на содержание компонентов в продуктах сгорания по отношению к базовой смеси. За базовую СК принимаем смесь, содержащую НА – 75% и СКДМ-80 – 25%, $\alpha=0.5$. Смесь с добавкой KNO_3 (7 масс. %) также содержит НА – 73.6% и СКДМ-80 – 19.4%, $\alpha=0.5$.

Анализ результатов расчетов показал, что в рабочем диапазоне давлений газогенератора (1 ÷ 4 МПа) значение адиабатической температуры базовой смеси изменяется от 1144 до 1215 К. Значение адиабатической температуры горения СК с добавкой повышается от 1042 до 1126 К. Введение добавки KNO_3 в СК привело к снижению адиабатической температуры горения по отношению к базовой СК на 10%.

Введение добавки KNO_3 по отношению к базовой смеси приводит к повышению содержания СО в продуктах сгорания независимо от значения давления в камере сгорания. Введение добавки приводит к снижению содержания азота, водорода и воды. Результаты, представленные в работе, могут быть полезны при экспериментальных исследованиях.

Литература

1. Лемперт Д.Б., Манелис Г.Б. Новое поколение газогенерирующих составов для автомобильных мешков безопасности / Д.Б. Лемперт, Г.Б. Манелис // Институт проблем химической физики РАН «Химия в интересах устойчивого развития». Черноголовка. 2005.
2. Лемперт Д.Б., Манелис Г.Б., Махонина М.В., Нечипоренко Г.Н. Зависимость температуры горения стехиометрических CHNO-композиций от их химического состава и теплосодержания / Д.Б. Лемперт и [др.] // Журн. химическая физика. 2003. Т. 22. Вып. 5. С. 65–69.
3. Шидловский А.А. Основы пиротехники. М.: Машиностроение, 1973. 319 с.
4. Новый справочник химика и технолога. Основные свойства неорганических, органических и элементоорганических соединений. СПб.: АНО НПО «Мир и семья», 2002. 1280 с.
5. Жуков Б.П. Энергетические конденсированные системы / под ред. академика Б.П. Жукова 2-е изд., исправл. М.: Янус К. // Краткий энциклопедический словарь. М., 2000. 299 с.

References

1. Lempert D.B., Manelis G.B. Novoye pokoleniye gazogeneriruyushchikh sostavov dlya avtomobil'nykh meshkov bezopasnosti / D.B. Lempert, G.B. Manelis // Institut problem khimicheskoy fiziki RAN «Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya». Chernogolovka. 2005.
2. Lempert D.B., Manelis G.B., Makhonina M.V., Nechiporenko G.N. Zavisimost' temperatury goreniya stekhiometricheskikh CHNO- kompozitsiy ot ikh khimicheskogo sostava i teplosoderzhaniya / D.B. Lempert i [dr.] // Zhurn. khimicheskaya fizika. 2003. T. 22, Vol. 5. Pp. 65–69.
3. Shidlovskiy A.A. Osnovy pirotekhniki/ M.: Mashinostroyeniye, 1973. 319 s.
4. Novyy spravochnik khimika i tekhnologa. Osnovnyye svoystva neorganicheskikh, organicheskikh i elementoorganicheskikh soyedineniy. S.-Pb.: ANO NPO «Mir i sem'ya», 2002. 1280 p.
5. Zhukov B.P. Energeticheskiye kondensirovannyye sistemy / pod red. akademika B.P. Zhukova. 2-e izd., ispravl. M.: Yanus K. // Kratkii entsiklopedicheskiy slovar'. M., 2000. 299 p.

ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛО-ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СКОРОСТЯХ УДАРА ДО 5000 м/с

А.А. Попов, А.С. Зелепугин

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Россия
popov.alexey1997@gmail.com

Ключевые слова: металло–интерметаллидный слоистый композит, высокоскоростной удар, деформация, разрушение, численное моделирование.

Аннотация. В данной работе исследуется взаимодействие ударника из высокопрочной стали с многослойной металло-интерметаллидной преградой, состоящей из шести композиционных слоев, каждый из которых состоит из слоя интерметаллида (Al_3Ti) и слоя титанового сплава (BT-6). При моделировании процесса взаимодействия применена модель упругопластической повреждаемой среды. Для описания процесса разрушения композиционной преграды использованы: кинетическая модель активного типа – для слоев из титанового сплава, модель хрупкого разрушения – для слоев интерметаллида. При численном моделировании использован модифицированный метод конечных элементов (без глобальной матрицы жесткости), используемый для решения динамических задач. Численные расчеты проводились при скоростях удара, равных 2000, 3000 и 5000 м/с с целью оценить влияние начальной скорости ударника на характер разрушения многослойного композита. Полученные результаты показывают, что с ростом начальной скорости удара возрастает роль ударно-волновых процессов в характере разрушения преграды. В интерметаллидных слоях металло-интерметаллидной композиционной преграды наблюдается расслоение вдоль границ со слоями из титана, причем степень расслоения возрастает с ростом скорости удара.

FRACTURE BEHAVIOR OF METAL-INTERMETALLIC LAMINATE COMPOSITES AT IMPACT VELOCITIES UP TO 5000 M/S

A.A. Popov, A.S. Zelepugin

National Research Tomsk State University, Russian Federation
Tomsk Scientific Center SB RAS, Russian Federation
popov.alexey1997@gmail.com

Keywords: metal-intermetallic laminate composite, high-velocity impact, deformation, failure, numerical simulation.

Abstract. The paper studies the interaction of a high-strength steel projectile with a multi-layer metal-intermetallic target that contains six composite layers, each of which consists of an intermetallic layer (Al_3Ti) and a layer of titanium alloy (VT6). An elastoplastic damaged medium model is applied to simulate the interaction process. To describe the fracture of the multi-layer target, the models are used as follows: the active kinetic model for titanium alloy layers and the brittle fracture model for intermetallic layers. A modified finite element method (without a global stiffness matrix), applied to solve dynamic problems, is used for numerical simulation. Numerical computations were performed at impact velocities of 2000, 3000 and 5000 m/s to evaluate the effect of the initial velocity of the projectile on the fracture behavior of the multi-layer composite. The obtained results show that the effect of shock-wave processes on the fracture behavior of the target increases with increasing an initial impact velocity. The composite target demonstrates the separation of layers along the boundaries, and the degree of separation increases with increasing the impact velocity.

Исследование поведения композиционных материалов в экстремальных условиях нагружения является актуальным в настоящее время [1]. Одним из видов таких материалов являются металло-интерметаллидные слоистые композиционные материалы (МИСКМ) – перспективные конструкционные

материалы, обладающие большим набором структурных и функциональных свойств. МИСКМ представляют собой композицию из взаимно чередующихся слоев твердого хрупкого интерметаллида и пластичного металла или сплава. Идея создания таких материалов родилась при исследовании биологических систем. Например, раковины морских моллюсков имеют многослойную структуру и представляют собой твердые хрупкие плитки CaCO_3 , склеенные пластичной граничной фазой из биоматериала. В многослойном слоистом композите $\text{Ti-Al}_3\text{Ti}$ роль твердых хрупких слоев выполняет триалюминид титана (Al_3Ti), а слои из титанового сплава (ВТ-6) имитируют пластичную граничную фазу [4].

В данной работе исследуется процесс взаимодействия композитной многослойной преграды $\text{Ti-Al}_3\text{Ti}$ с ударником, выполненным из высокопрочной стали. Для моделирования процесса деформирования и разрушения используется модифицированный метод конечных элементов (без глобальной матрицы жесткости), применяемый при решении динамических задач. Расчеты проведены в осесимметричной постановке.

При описании поведения материала при динамическом нагружении была использована модель упругопластической повреждаемой среды. Для описания разрушения слоев из титанового сплава применена кинетическая модель разрушения активного типа [5], для интерметаллидных слоев – модель хрупкого разрушения [3]. В областях интенсивного взаимодействия и деформирования контактирующих тел применяется модель разрушения эрозионного типа. В качестве критерия разрушения в эрозионной модели используется критическое значение удельной энергии сдвиговых деформаций, которое зависит от условий взаимодействия и задается функцией начальной скорости удара.

Многослойная преграда состояла из шести композиционных слоев общей толщиной около 7 мм. Отношение толщины слоя интерметаллида к толщине слоя титанового сплава в композиционном слое составляет $\sim 4/1$. Осредненная плотность преграды в данном случае составила $3513,3 \text{ кг/м}^3$. Расчеты проводились при начальных скоростях ударника 2000, 3000 и 5000 м/с.

В результате ударно-волновых процессов, протекающих в преграде, в слоях интерметаллида (Al_3Ti) зарождаются и растут магистральные трещины. Более интенсивному росту этих трещин препятствуют слои из титанового сплава (ВТ6). Поля распределения удельной энергии сдвиговых деформаций и удельного объема микрповреждений представлены на рис. 1.

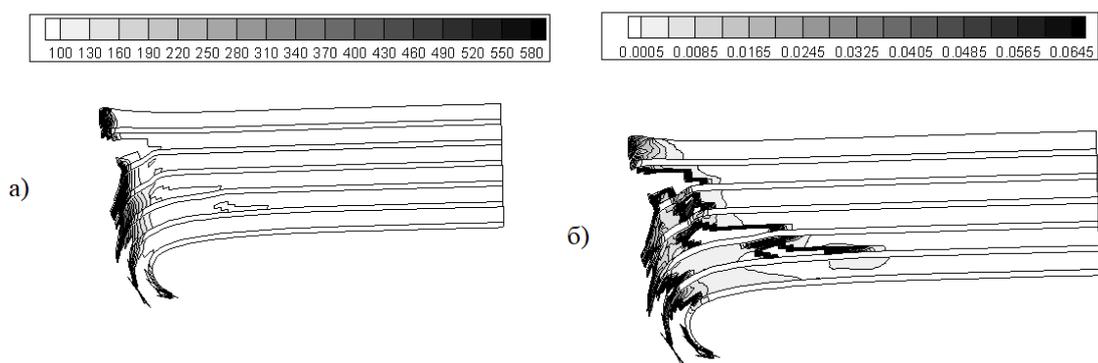


Рис. 1. Поля распределения в момент времени 20 мкс при начальной скорости удара 2000 м/с: *а* – удельной энергии сдвиговых деформаций (кДж/кг); *б* – удельного объема микроповреждений (см³/г)

Результаты численного моделирования деформирования и разрушения МИСКМ Ti–Al₃Ti показывают, что с ростом начальной скорости удара в исследуемом диапазоне скоростей 2000–5000 м/с возрастает роль ударно-волновых процессов в характере разрушения преграды. В отличие от более низких скоростей удара, при которых больший вклад в характер разрушения многослойной преграды вносит деформационный фактор, действующий в области внедрения ударника [5], при более высоких скоростях происходит расслоение преграды, вызванное действием волн разгрузки.

В интерметаллидных слоях металло-интерметаллидной композиционной преграды наблюдается расслоение вдоль границ со слоями из титана, причем степень расслоения возрастает с ростом скорости удара.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-01152).

Литература

1. Orlov M.Yu., Glazyrin V.P., Orlov Yu.N. Numerical modeling of the destruction of steel plates with a gradient substrate // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1893. 030133. DOI:10.1063/1.5007591.
2. Orlov M.Yu., Glazyrin V.P., Orlov Yu.N., Orlova Yu.N. Investigation of the behaviour of functionally graded materials under impact loads // EPJ Web of Conferences. 2018. Vol. 183. 01049 (DYMAT 2018). DOI: 10.1051/epjconf/201818301049
3. Зелепугин С.А., Толкачев В.Ф., Зелепугин А.С. Асимметрия разрушения керамики при высокоскоростном ударе // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. Вып. 23. С. 48-54. DOI: 10.21883/PJTF.2017.23.45275.16974.
4. Vecchio K.S. Synthetic multifunctional metallic-intermetallic laminate composites // JOM. 2005. March. Pp. 25–31. DOI: 10.1007/s11837-005-0229-4.
5. Зелепугин А.С., Зелепугин С.А. Численное моделирование разрушения многослойных композитов титан – триалюминид титана при высокоскоростном ударе // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 112. С. 194–198. DOI: 10.17513/mjpf.11997.

References

1. Orlov M.Yu., Glazyrin V.P., Orlov Yu.N. Numerical modeling of the destruction of steel plates with a gradient substrate // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1893. 030133. DOI:10.1063/1.5007591.
2. Orlov M.Yu., Glazyrin V.P., Orlov Yu.N., Orlova Yu.N. Investigation of the behaviour of functionally graded materials under impact loads // EPJ Web of Conferences. 2018. Vol. 183. 01049 (DYMAT 2018). DOI: 10.1051/epjconf/201818301049.
3. Zelepugin S.A., Tolkachev V.F., Zelepugin A.S. Asymmetry of ceramic destruction under a high-velocity impact // Technical Physics Letters. 2017. Vol. 43. No. 12. Pp. 1071–1073. DOI: 10.1134/S1063785017120136.
4. Vecchio K.S. Synthetic multifunctional metallic-intermetallic laminate composites // JOM. 2005. March. Pp. 25–31. DOI: 10.1007/s11837-005-0229-4.
5. Zelepugin S.A., Zelepugin A.S., Popov A.A., Yanov D.V. Failure of the laminate composites under impact loading // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1115. 042018. DOI: 10.1088/1742-6596/1115/4/042018.

ГОРЕНИЕ ХРОМА В СПУТНОМ ПОТОКЕ АЗОТОСОДЕРЖАЩЕГО ГАЗА

А.Б. Толынбеков, А.С. Жуков

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
a.tolynbekov@gmail.com

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, фильтрационное горение, спутная фильтрация.

Аннотация. В статье исследован процесс горения порошка хрома в спутном потоке азотосодержащего газа. Представлены результаты экспериментальных работ по созданию установки для исследования горения порошков металлов в спутном потоке газа и использовании ее для азотирования порошков хрома в среде азотосодержащего газа. Получены результаты по регистрации расхода газа, давления газа на входе и на выходе в спутный реактор.

THE COMBUSTION OF CHROMIUM IN CO-FLOW OF NITROGEN CONTAINING GAS

A.B. Tolynbekov, A.S. Zhukov

National research Tomsk State University, Russian Federation
a.tolynbekov@gmail.com

Keywords: self-propagating high temperature synthesis, filtration combustion, co-flow filtration.

Abstract. In the present paper we investigated processes of combustion of chromium powders in co-flow of nitrogen containing gas. Presented results of experimental work on the created on a laboratory facility to study of combustion of metal powders in a gas flow and its use for nitriding of chromium powders in nitrogen-containing gas. Results were obtained of gas consumption and pressure in entrance and in exit in co-flow reactor.

Фильтрационное горение порошков различных систем при принудительном продуве их реакционным газом, теоретически исследовано достаточно подробно [1]. В то же время горения порошков, в частности систем хром – азот при принудительном нагнетании реагирующего газа в реакционную зону, экспериментально изучены мало [2]. В работе [3] изучены закономерности скорости горения, температура горения, фазовый состав продуктов реакций, массовое содержание реагирующего газа в пористых образцах.

В данной работе представлены экспериментальные результаты опробования оригинальной лабораторной установки проточного реактора СВС при горении порошков хрома в потоке азото-аргоновой смеси.

Лабораторная установка состоит из систем контроля (3–6) подачи газа, реакционной зоны (2) и из системы регистрации параметров газа (7–10). Установка позволяет исследовать горение порошков с размером частиц в диапазоне $40 \cdot 10^{-6} - 0.3 \cdot 10^{-3}$ м, с диаметром $10-30 \cdot 10^{-3}$ м и высотой до 0.2 м при давлении на входе до 0.2 МПа и максимальной температуре до 2000 °С.

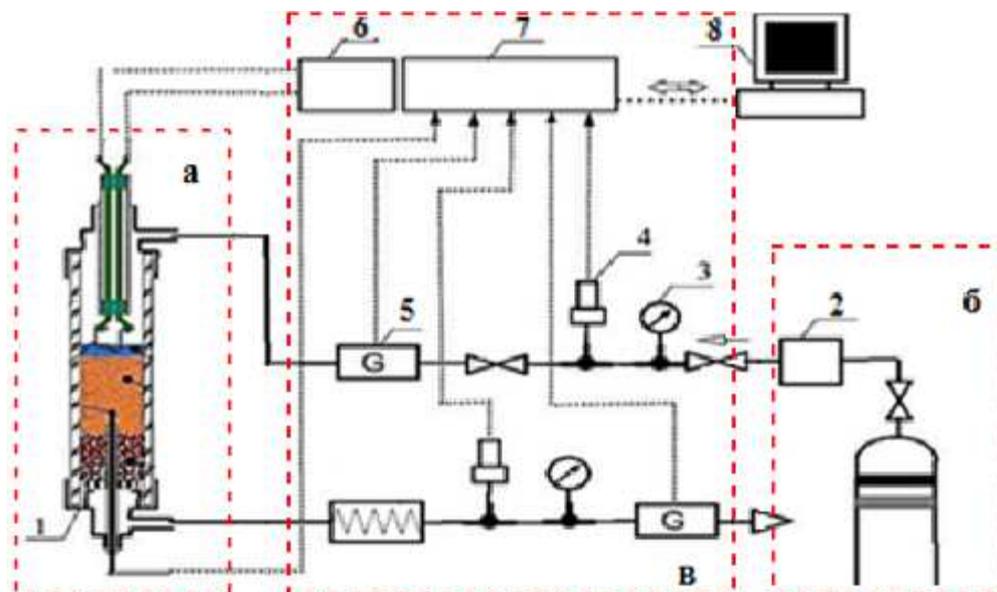


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторной установки проточного реактора СВС: 1 – камера горения; 2 – редуктор; 3 – манометр; 4 – датчик давления; 5 – электронный расходомер; 6 – блок управления зажиганием; 7 – АЦП; 8 – компьютер

В качестве реагента были использованы порошки Cr (пористостью $\varepsilon=80\%$) марки ПХ1С, с размером частиц 40–300 мкм. Фазовый состав исходных порошков и продуктов горения определялся на дифрактометре Shimadzu XRD-600. Горение осуществлялось в проточном реакторе с подводом газовой смеси азот-аргон (в соотношении 87.2–12.8%). В данной смеси предполагалось, что, аргон не будет вступать в реакцию с образцом. Образец массой $m=10$ г устанавливали в кварцевую трубку с внутренним диаметром $d=16$ мм, которая является рабочей средой. Образцы поджигались проведенной к верхнему торцу электрической спиралью. На входе и на выходе в реакционную зону были установлены датчики расхода и давления реагирующего газа, данные от которых записывались на компьютер.

При изучении горения Cr в азото-аргоновой смеси были замечены следующие особенности: во время горения датчики расхода и контрольный расходомер фиксировали падение расхода реагирующей смеси. При этом, если показатели на контрольном расходомере во время горения падали до нуля, то датчики расхода на входе и на выходе показывали, что не весь окислитель прореагировал с Cr. Как показали датчики, между показателями датчика на входе и на выходе. Второй особенностью было то, что во время горения наблюдался второй фронт горения, которая следовала после основного фронта горения.

Продукты горения взвешивали на весах, чтобы рассчитать массовое содержание азота в продукте. В образце №8 по результатам расчета массовое доля азота составляла $[N=7.6\%]$. Результаты химического анализа показали, что в продукте содержится $N=7,2\%$ азота. Вместе с тем по результатам рентгенофазного анализа образец является однофазным и состоит только из нитрида Cr_2N . Таким образом, в продуктах горения, в соответствии с нашими предположениями, аргон не вступает в химическую реакцию с Cr.

Выводы:

- 1) использование принудительной спутной фильтрации позволяет реализовать СВС в системе Cr–N₂;
- 2) использование принудительной фильтрации позволяет синтезировать в режиме горения полунитрид хрома Cr₂N;
- 3) при использовании режима фильтрационного горения порошков Cr наблюдается второй фронт горения.

Полученные экспериментальные данные и результаты химического анализа выдвигают необходимость постановки новых направленных экспериментов по изучению данного процесса, которые могут представлять также практический интерес.

Литература

1. *Зиатдинов М.Х.* Горение хрома в спутном потоке азота // Физика горения и взрыва. 2016. Т. 52, №4. С. 51–60.

2. Мержанов А.Г., Боровинская И.П., Володин Ю.Е. В механизме горения пористых металлических образцов в азоте // Докл. АН СССР. 1972. Т. 206, № 4. С. 905–908.
3. Ziatdinov M. Combustion Synthesis of Composition Ferroalloys / M. Ziatdinov, A. Zhukov, V. Promakhov // Materials. 2018. 11, 2117.

References

1. Ziatdinov M. Combustion of Chromium in co-flow of nitrogen // Fizika goreniya i vzyryva. 2016. Vol. 52, №4. Pp. 51–60.
2. Merzhanov A.G., Borovinskaya I.P., Volodin Ju.E. The mechanism of combustion porous metallic samples in nitrogen // RPT. USSR ACADEMY OF SCIENCES. 1972. Vol. 206, № 4. Pp. 905–908.
3. Ziatdinov M. Combustion Synthesis of Composition Ferroalloys / M. Ziatdinov, A. Zhukov, V. Promakhov // Materials. 2018. 11, 2117.

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОГО КАНАЛЬНО-УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ МЕДНЫХ ОБРАЗЦОВ

Д.В. Янов, А.С. Зелепугин

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Россия
dima.yanov97@mail.ru

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, динамическое канально-угловое прессование, удельная энергия сдвиговых деформаций.

Аннотация. Для получения ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры металла прибегают к методам интенсивной пластической деформации, т.к. металл с УМЗ структурой характеризуется улучшенными физико-механическими свойствами, такими как повышенная прочность, хладноломкость, радиационная стойкость. В данной работе рассматривается метод динамического канально-углового прессования (ДКУП), с помощью которого можно получать УМЗ структуру. Целью работы является численное моделирование процесса ДКУП медного образца при условиях нагружения, реализуемых в экспериментах. Численное моделирование проводилось с помощью модифицированного метода конечных элементов, в рамках упругопластической модели повреждаемой среды с использованием модели разрушения активного типа. На тыльную часть образца действует давление пороховых газов, равное $P_0=310$ МПа, начальную скорость образца можно варьировать в широких пределах при ускорении $a = 3.5 \times 10^5$ м/с². В результате проведенных численных расчетов показано, что образец из меди успешно проходит процесс ДКУП при начальных параметрах $v_0 = 170$ м/с и $P_0 = 310$ МПа. В процессе ДКУП происходит незначительное удлинение образца в направлении продольной оси и повышение температуры до 600 К в области контакта образца со стенками горизонтальной части канала, при этом равномерным интенсивным пластическим деформациям подвергается почти весь образец, кроме передней и тыльной частей.

SIMULATION OF DYNAMIC CHANNEL-ANGULAR PRESSING OF COPPER SAMPLES

D.V. Yanov, A.S. Zelepugin

National research Tomsk State University, Russian Federation
Tomsk Scientific Center SB RAS, Russian Federation
dima.yanov97@mail.ru

Keywords: severe plastic deformation, dynamic channel-angular pressing, specific energy of shear deformations.

Abstract. Severe plastic deformation methods are used to obtain ultrafine-grain (UFG) metal structure, since a metal with the UFG structure is characterized by improved physical and mechanical properties, such as increased strength, cold brittleness, and radiation resistance. This paper represents the method of dynamic channel-angular pressing (DCAP) which can be used to obtain the UFG structure. The purpose of the work is numerical simulation of DCAP of a copper sample under loading conditions implemented in experiments. Numerical simulation was carried out using a modified finite element method, an elastoplastic damaged medium model, and an active fracture model. Explosion pressure, equal to $P_0=310$ MPa, acts on the back of the sample; the initial velocity of the sample can be varied in a wide range at acceleration of $a = 3.5 \times 10^5$ m/s². The numerical computations have shown that the copper sample successfully undergoes the DCAP process with the initial parameters of $v_0 = 170$ m/s and $P_0 = 310$ MPa. During the DCAP process, a slight elongation of the sample is observed in the direction of the longitudinal axis and the temperature increases up to 600 K in the region of contact of the sample with the walls of the horizontal part of the channel, while almost the entire sample is subjected to uniform plastic deformation, except for the front and back parts.

Для улучшения физико-механических свойств металлов и сплавов часто прибегают к различным методам обработки давлением. Перспективным направлением являются методы интенсивного пластического деформирования (ИПД), т.к. металл, прошедший ИПД обработку, обладает уникальными свойствами, такими, как повышенная прочность, ударная вязкость, стойкость к радиоактивному излучению [1]. Существует несколько способов ИПД обработки металла: равноканальное угловое прессование (РКУП), кручение под давлением, динамическое канально-угловое прессование [2]. В зависимости от требуемой формы образца прибегают к тому или иному способу ИПД обработки, т.к. при РКУП и ДКУП образец имеет вытянутую форму, а при кручении под давлением образец имеет форму диска.

Метод динамического канально-углового прессования является модификацией РКУП. В классическом подходе обработка металла происходит с помощью специальных прессовальных машин, тогда как в ДКУП металлический образец проходит оснастку значительно быстрее благодаря применению порохового заряда. Также при ДКУП не требуется большого коли-

чество проходов образца через оснастку, при этом сохраняются высокие пластические свойства металла.

Целью данной работы является численное моделирование процесса ДКУП для образцов из меди с помощью модифицированного метода конечных элементов [3]. Начальные условия нагружения (скорость и давление, действующее на тыльную часть исследуемого образца) определялись из анализа экспериментальных данных.

На рис. 1, *а* представлено геометрическое расположение медного образца квадратного сечения 16×16 мм, внутри каналов оснастки, длина образца составляет 65 мм. Наклонная площадка между пересекающимися каналами имеет наклон 45° и высоту 4 мм. Стенки оснастки считаются абсолютно жесткими, также не учитывается трение между образцом и каналами.

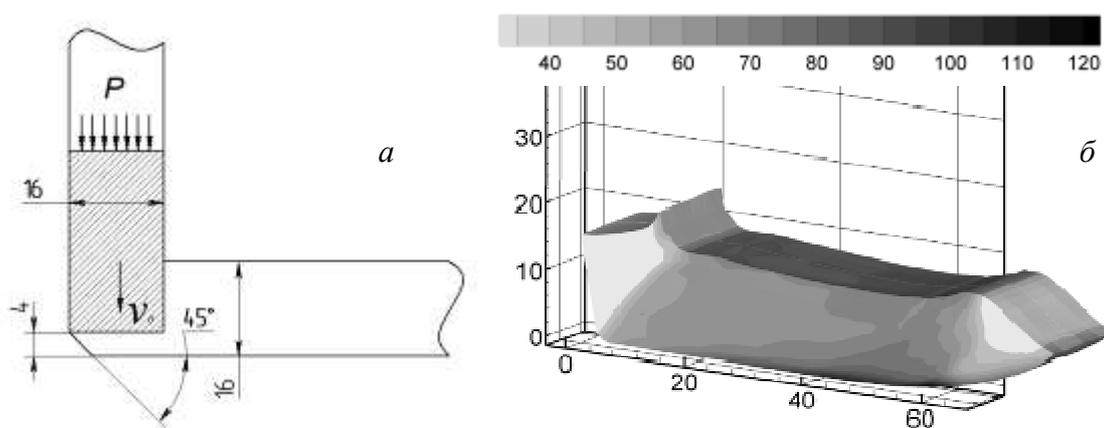


Рис. 1. Оснастка с образцом (*а*), размеры даны в мм; поля удельной энергии сдвиговых деформаций (кДж/кг), в момент времени 800 мкс при $P_0 = 310$ МПа, $v_0 = 170$ м/с

В качестве начальных условий использованы значения давления, действующего на тыльную часть образца, и ускорения, равные $P_0 = 310$ МПа и $a = 3.5 \times 10^5$ м/с². Для определения оптимальной начальной скорости образца было проведено несколько расчетов, т.к. значение скорости может варьироваться в широких пределах. В результате при скорости $v_0 = 170$ м/с образец из меди успешно проходит каналы оснастки.

На рис. 1, *б* представлено распределение полей удельной энергии сдвиговых деформаций при прохождении образца через каналы оснастки, при этом следует отметить, что пластическим деформациям подвергается основная часть образца, кроме передней и тыльной частей. Также в ходе прессования происходит незначительное удлинение образца в продольном направлении [4, 5].

В результате расчетов при $P_0 = 310$ МПа и $v_0 = 170$ м/с образец успешно проходит процесс ДКУП со значительными пластическими деформациями почти по всему объему. При скоростях выше 170 м/с происходит разрушения образца в передней части, а при меньшей скорости образец застревает

в каналах оснастки. Удельная энергия сдвиговых деформаций свидетельствует об измельчении зернистой структуры образца [1, 2].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-01152).

Литература

1. *Валиев Р.З., Александров И.В.* Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. М.: Академкнига. 2007. 398 с.

2. *Столбовский А.В., Попов В.В., Попова Е.Н., Фалахутдинов Р.М., Шорохов Е.В.* Особенности деформационного поведения бронз при динамическом канально-угловом прессовании // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2016. № 11–5. С. 858–863.

3. *Глазырин В.П., Орлов Ю.Н., Орлов М.Ю.* Деформирование и разрушение неоднородных ударников при взаимодействии с преградами // Известия вузов. Физика. 2014. Т. 57. № 8/2. С. 104–109.

4. *Зелепугин С.А., Янов Д.В., Бодров А.С., Попов А.А.* Повышение прочностных характеристик металлических образцов при динамическом канально-угловом прессовании // Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий: научная сессия НИЯУ МИФИ. 2018, 2–6 апреля 2018 г.: материалы конференции / под ред. М.Д. Носкова. Северск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2018. С. 42.

5. *Зелепугин С.А., Бодров А.С., Пахнурова Н.В.* Диаграмма процесса динамического канально-углового прессования титановых образцов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 11–1. С. 28–31. DOI: 10.17513/mjprfi.11924.

References

1. *Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., Alexandrov I.V.* Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation // Progress in Materials Science, 2000, vol. 45, issue 2. Pp. 103–189. DOI:10.1016/s0079-6425(99)00007-9

2. *Stolbovsky A.V., Popov V.V., Popova E.N., Falahutdinov R.M., Shorohov E.V.* Specific features of strain behavior of bronzes under dynamic channel-angular pressing // International Journal of Applied and Fundamental Research, 2016, no. 11–5. Pp. 858–863.

3. *Glazyrin V.P., Orlov Yu.N., Orlov M.Yu.* Deformation and destruction of inhomogeneous impactors when interacting with plates // Izvestiya Vuzov. Physics. 2014. V. 57. Is. 8/2. pp. 104–109.

4. *Bodrov A.S., Olimpiyeva N.V., Zelepugin A.S., Zelepugin S.A.* Numerical simulation of dynamic channel-angular pressing processes // Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015. Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation. 2016. 7414878. Pp. 1–4. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414878.

5. *Bodrov A.S., Zelepugin S.A.* Numerical simulation of dynamic channel-angular pressing of copper specimens // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 177. 012056. Pp. 1–5. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012056.

Секция 4

Баллистика и Небесная механика

Подсекция 4.1 Баллистика

Председатель

к.ф.-м.н., Савкина Н.П.

Внешняя баллистика,

Теория Хаоса,

Аэродинамическая установка,

Термозонд,

Ведущий поясок боеприпаса,

Session 4

Ballistics and celestial mechanics

Subsection 4.1 Ballistics

Chair

PhD. Nadezda Savkina

External ballistics,

Chaos theory,

Aerodynamic installation,

Thermal probe

Lead ammunition belt

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ОБТЕКАНИИ ПРИЗМЫ ПРИ РАЗНЫХ УГЛАХ АТАКИ

Н.Р. Гимаева

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
natalia.gimaeva@inbox.ru

Ключевые слова: внешняя баллистика, аэродинамические коэффициенты, угол атаки.

Аннотация. Высокие темпы развития ракетно-космической техники формируют ряд новых проблем, для решения которых требуется не только ряд натурных испытаний, но и использование математического моделирования. Особое распространение данный метод исследований приобрел в решении задач авиационной и космической техники, где основной целью является определение аэродинамических характеристик с высокой точностью, а также представление полей обтекания метаемых тел и летательных аппаратов. Стремительное развитие вычислительной техники позволяет эффективно применять численные методы решения для практических задач и внедрять их в практику экспериментальных исследований.

В качестве объекта исследования была выбрана прямоугольная призма, которая симитировала элемент космической конструкции. Актуальность исследования аэродинамики исследуемого тела обоснована, в первую очередь, широкой распространенностью объектов подобных форм. В данной работе будет рассмотрена задача обтекания и расчета аэродинамических характеристик тел, имеющих призматическую форму. Призматические тела с квадратом в основании имеют длину 21, 42, 84 и 105 мм.

THEORETICAL STUDY OF GAS-DYNAMIC PARAMETERS IN THE FLOW AROUND A PRISM AT DIFFERENT ANGLES OF ATTACK

N.R. Gimayeva

National research Tomsk State University, Russian Federation
natalia.gimaeva@inbox.ru

Keywords: external ballistics, aerodynamic coefficients, angle of attack.

Abstract. Developments in advanced technology of rocket and space form a number of new problems. These tasks are solved using not only experimental studies, but mathematical modeling. This research method has acquired particularly prevalent in solving aviation and space technology problems, where the main goal is to determine the aerodynamic characteristics with high accuracy, to represent the projectiles and aircraft flow fields. The rapid development of computing technology makes it possible to effectively apply numerical methods for solving practical problems and introduce them into the practice of experimental research.

The object of this study was chosen rectangular prism. The relevance of the aerodynamic study of selected body is justified, first, by the wide prevalence similar forms of objects. In this paper, we will consider the problem of flow-past and calculation of aerodynamic characteristics of prismatic bodies. The prismatic bodies with a square in the base have a length of 21, 42, 84 and 105 mm.

Задача решается при следующих допущениях:

– режим течения воздуха всюду турбулентный. Для описания турбулентного характера движения воздуха используются осредненные уравнения сжимаемой вязкой жидкости и гипотеза вихревой вязкости;

– пренебрегаем массовыми силами.

Течение сплошной среды (газа) описывается системой осредненных уравнений Навье–Стокса, в состав которой входят уравнение неразрывности и уравнения движения с учетом SST модели турбулентности.

Размеры расчетной области выбираются относительно большими, чтобы дальние граничные условия не смогли исказить поле течения вблизи самого тела.

На входной границе расчетной области задавались величина и направление скорости набегающего потока, на выходной границе – мягкие граничные условия, на диаметральной плоскости выставлялись граничные условия симметрии а на поверхности обтекаемого тела – условия непротекания.

Вначале проводилось исследование влияния длины тела на его аэродинамику. Для проверки адекватности полученных результатов был проведен сопоставительный анализ экспериментальных данных, полученных на аэродинамической трубе г. Красноармейска в НИИ Геодезии и результатов расчета на Ansys Fluent в виде зависимости C_x от длины тела. Для тел, обтекаемых потоком, скорость которого в числах Маха составляет 2.06 получено совпадение значений коэффициентов лобового сопротивления экспериментальных и расчетных данных с относительной ошибкой измерения, не превышающей 3%. В случае числа Маха = 4.04 соответствующие величины коэффициента лобового сопротивления отличаются не более чем на 5%. Приведенные эксперименты и расчеты проводились для движения тел с нулевым углом атаки.

После того, как случай обтекания при нулевом угле атаки был изучен достаточно полно, приступили к исследованию влияния угла атаки на аэродинамику прямоугольной призмы длиной 21 мм, при числах Маха 2.06 и 4.04. Рассогласования экспериментальных данных с результатами расчета для коэффициента лобового сопротивления C_x составляет 4%, для коэффициента подъемной силы C_y – 6%, для коэффициента момента тангажа m_z не превышает 7%. Как и ожидалось, при увеличении угла атаки коэффициент подъёмной силы растет, а лобового сопротивления, наоборот становится меньше. Функция коэффициента лобового сопротивления C_x – почти постоянная. При малых углах атаки основную долю лобового сопро-

тивления составляет сопротивление трения, которое практически не зависит от изменения угла атаки. Коэффициент подъемной силы C_y по мере увеличения угла атаки растет, это происходит за счет уменьшения давления на верхней и увеличения давления на нижней стороне призмы. Характер зависимости для mz такой же, что и зависимости для C_y , т.е. при увеличении угла атаки увеличивается момент тангажа относительно передней кромки призмы. Это объясняется тем, что момент тангажа, создаваемый аэродинамическими силами относительно передней части призмы возникает главным образом под действием подъемной силы, поэтому при увеличении подъемной силы увеличивается момент поворачивающий профиль.

Литература

1. *Снегирёв А.Ю.* Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: учеб. пособие. СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2009.
2. *Wilcox D.C.* Turbulence Modeling for CFD. La Canada, California: DCW Industries Inc., 1998.
3. *Menter F.R.* Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. Vol. 32, No 8.
4. *Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М.* Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: Наука, 1982.
5. *Менде Н.П.* Обратная задача нелинейной баллистики. I. Плоское движение // Препринт 1326 ФТИ АН СССР, Ленинград, 1989.

References

1. *Snegirev A.Y.* High-performance computing in engineering physics. Numerical simulation of turbulent flows: Proc. allowance. SPb.: Publishing house of the Polytechnic. University Press, 2009.
2. *Wilcox D.C.* Turbulence Modeling for CFD. La Canada, California: DCW Industries Inc., 1998.
3. *Menter F.R.* Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. Vol. 32, No 8. Pp. 1598–1605.
4. *Belotserkovsky O.M., Davydov Y.u.* Method of coarse particles in the gas dynamics. Moscow: Science, 1982.
5. *Mende N.P.* The inverse problem of nonlinear ballistics. I. Surface Movement // Preprint 1326 FTI AN USSR, Leningrad, 1989.

СОЗДАНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ТРАЕКТОРИЙ ДЛЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АРТИЛЛЕРИЙСКИХ СИСТЕМ ЗАЛПОВОГО ОГНЯ

И.Л. Доненко

ФГАОУ ВО "Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского",
Физико-технический институт, кафедра теоретической физики и физики
твёрдого тела, Россия, г. Симферополь
idonenko2012@gmail.com

Ключевые слова: артиллерия, фрактал, теория хаоса, баллистика, теоретическая механика.

Аннотация. В современном мире использование артиллерийских залповых систем во время боевых действий повсеместно. Но, улучшение точности и кучности как основных характеристик, требуемых для максимального поражения, не менялись уже давно. В связи с этим предложен метод фрактальных траекторий, который позволяет улучшить данные вопросы артиллерийских систем залпового огня. Моделирование траекторий и карт происходит с использованием теории фракталов и хаоса. Данные модели несут в себе математическую модель пространства и фрактальности, смоделированные с использованием геометрических фракталов. Применение современных теорий фракталов и хаоса, позволяет увеличить кучность стрельбы на 20–25%, а точность на 40–45%, что позволяет увеличить наступательную и оборонительную способность техники.

CREATION OF FRACTAL BALLISTIC TRAJECTORIES FOR IMPROVEMENT OF ACCURACY CHARACTERISTICS OF ARTILLERY SYSTEMS OF VOLLEY FIRE

Ivan Donenko

"Crimean Federal University. VI Vernadsky", Physical-Technical Institute, Department of Theoretical Physics and Solid-State Physics, Russia, Simferopol, 4 Academic Vernadsky Avenue, 295007
idonenko2012@gmail.com

Keywords: Non-lethal action, weapons, cartridge, chemical, neutralization.

Abstract. In the modern world, the use of artillery volley systems during combat operations is ubiquitous. However, the improvement of accuracy and accuracy as the main characteristics required for maximum damage has not changed for a long time. In this regard, the proposed method of fractal trajectories, which allows to improve these issues artillery volley fire systems. The simulation of trajectories and maps is carried out using the theory of fractals and chaos. . These models carry a mathematical model of space and fractality, modeled using geometric fractals. The use of modern theories of fractals and chaos, allows to increase the

accuracy of fire by 20–25%, and accuracy by 40–45%, which allows to increase the offensive and defensive ability of the equipment.

Актуальность. Разработка современных артиллерийских систем, а также их применение требуют новых способов прицеливания и попадания по мишеням и вражеским целям в учебном и боевом применении, что позволит сохранить более устойчивое психологическое состояние артрасчета, принесет экономию денежных средств, а также снизит погрешность полета снарядов при их пуске.

Цель и задачи исследования: решение краевой задачи, в которой происходит режим с обострением производных, при нанесенной фрактальной структуре на пространственную модель поверхности земли. Моделирование и расчет точности поражения цели при использовании данного способа ведения артиллерийского огня.

Основные результаты. В последние годы решение таких нелинейных параболических уравнений, разрушающихся за конечное или бесконечное время (см. эволюцию треугольника Серпинского или ковра Серпинского), т.е. режимы с обострением стали активно изучаться, что и не могло оставить нас в стороне, мы решили рассмотреть с математической точки зрения эволюцию фрактальной дифракционной картины [1], полученную в ходе эксперимента на кафедре общей физики, физико-технического института, КФУ им. В.И. Вернадского.

В современной баллистике не учитывается фрактальная составляющая траектории движения снаряда.

Для усовершенствования поражения целей при помощи артиллерийских систем залпового огня предлагается использовать теорию фракталов и хаоса. В частности, предлагается разбивать сектор планируемого поражения по фрактальной топологии земли. Это позволяет при учетывании вихревых потоков пороховых газов во время залпа, направить снаряд с меньшим разбросом в сторону планируемой точки поражения. Перед залпом будущую траекторию снаряда предлагается считать по траектории схожей с кривой Коха.

Таким образом, учитывая ее дробную размерность, которая равна $D = 1.26$ становится возможным производить залпы по совершенно другой траектории, что позволяет увеличить кучность стрельбы всего на 10–12%.

Но, а как же точность? Тут нам на помощь и приходит фрактальная топология пространства, в частности равнины и возвышенностей.

Для этого возьмем среднестатистический район России с не большим количеством возвышенностей и равнин – Тамбовскую область. Средняя дробная размерность участков там равна $D=1.5345$, что очень близко к размерности ковра Серпинского, данные значения позволяют разбить участки на зоны с высокой кучностью стрельбы и точностью попадания – так называемый центральный квадрат.

Это уже позволит увеличить кучность на 20–25%, а вот точность всего на 29–33%. Чтобы увеличить точность попадания снарядом с артиллерийских систем залпового огня учтем, что в некоторых местах имеются возвышенности и низины.

Для этого условно представим зону боевых действий в форме губки Менгера, и построим 3D модель полигона, нанесем на него мишень и систему залпового огня буратино, что показано на рис. 1, размерность которой равна $D = 2.73$.

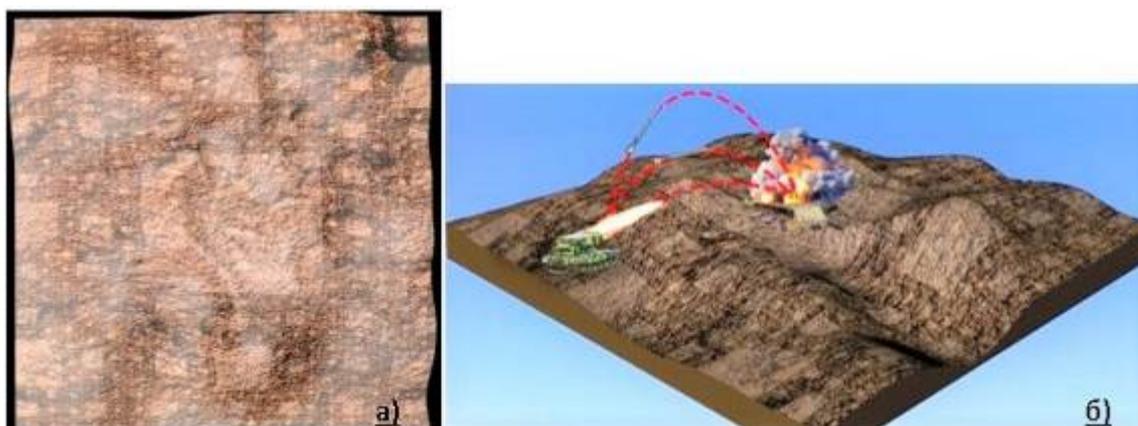


Рис. 1. Моделирование фрактальной поверхности земли с использованием губки Менгера (а), моделирование с более точным попаданием по цели системой залпового огня «Буратино» по мишени (б)

Тогда учитывая данные фрактальные размерности можно увеличить точность стрельбы на 40–45%.

Выводы. Учет теории фракталов и хаоса позволяет улучшить характеристики стрельбы с артиллерийских систем залпового огня, в частности кучность и точность. Для автоматизации данного процесса разрабатывается авторское программное обеспечение. Также запланировано экспериментальное подтверждение данной теории, проведение экспериментальных стрельб с использованием данных моделей карт.

Литература

1. Доненко А.В. Нелинейные параболические уравнения и их приложения // А.В. Доненко, В.А. Лукьяненко // Дни науки КФУ им. В.И. Вернадского. 2017. №3. Т. 6. С. 327–329
2. Кириллов А.А. Повесть о двух фракталах. [Электронный ресурс] // Летняя школа «Современная математика» // Электрон. журн. 2007. №1.
3. Хлыстун В., Грачёв П. Меня назначили ответственным за войну // Труд, № 048, 15 марта 2001.
4. Левченко В.А. Стрельба и управление огнем артиллерийских подразделений // В.А. Левченко, Ю. Сергин, В.А. Иванов, Г.В. Зеленин: учеб. пособие. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2004. С. 128.

Reference

1. *Donenko A.V.* Nonlinear parabolic equations and their applications // A.V. Donenko, V.A. Lukyanenko // Days of Science KFU them. IN AND. Vernadsky. 2017. №3. Т. 6. Pp. 327–329
2. *Kirillov A.A.* A tale of two fractals [Electronic resource] // Summer School "Contemporary Mathematics" // Electron. Journals. 2007. Is. 1.
3. *Khlystun V., Grachev P.I.* was appointed responsible for the war // Work, No. 048, March 15, 2001.
4. *Levchenko V.A.* Shooting and control of firearm divisions // V.A. Levchenko. Y. Sergin, C.A. Ivanov, V. Zelenin. Training allowance. Tambov: TSTU Publishing House, 2004. Pp. 128.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В КАНАЛЕ МОДЕЛЬНОГО ПРЯМОТОЧНОГО ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ОБТЕКАНИИ СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ

**В.В. Мацкевич, В.В. Фарапонов, Е.А. Маслов, М.А. Угольков,
А.Н. Федотов, Е.Ю. Лага**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
akinfeev1402@mail.ru

Ключевые слова: прямоточный воздушно-реактивный двигатель, термозонд, аэродинамическая установка.

Аннотация. Рассматривается исследование распределения температуры в канале модели прямоточного воздушно-реактивного двигателя. Эксперименты проводились на аэродинамической установке с использованием профилированных сопел для создания сверхзвукового потока с числом Маха равным пяти и шести. Для регистрации температуры в канале модельного двигателя выбран калориметрический метод измерения температуры, основанный на термоэлектрическом измерении. Спроектированы и созданы термозонд для измерения температуры в шести точках по каналу модельного двигателя и датчик температуры на стенке форкамеры. Оценивается достоверность полученных результатов. В работе предложена экспериментальная методика исследования распределения температуры в канале прямоточного воздушно-реактивного двигателя.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE CHANNEL OF A MODEL RAMJET WITH SUPERSONIC FLOW

V.V. Matskevich, V.V. Faraponov, E.A. Maslov, M.A. Ugolkov,
A.N. Fedotov, E.Yu. Laga

National research Tomsk State University, Russian Federation
akinfeev1402@mail.ru

Keywords: ramjet, thermoprobe, aerodynamic installation.

Abstract: The study of temperature distribution in the channel model of a ramjet is considered. The experiments were carried out in an aerodynamic installation using profiled nozzles to create a supersonic flow with a Mach number of five and six. To record the temperature in the channel of the model engine, a calorimetric method of temperature measurement based on thermoelectric measurement was selected. A thermal probe for measuring temperature at six points along the channel of a model engine and a temperature sensor on the pre-chamber wall were designed and built. Estimated reliability of the results. An experimental method for studying the temperature distribution in a ramjet duct is proposed.

Современные исследовательские интересы требуют синергетического развития междисциплинарных отраслей науки. Не остается в стороне и интерес к исследованию создания прямоточного воздушно-реактивного двигателя (ПВРД), включающий в себя нахождение эмпирических констант для верного описания данного типа двигателя. В виду сложности геометрии проточного тракта и изменения его геометрических характеристик в процессе работы двигателя в условиях транс- и сверхзвуковых скоростей газового потока разрабатываемые математические модели требуют верификации путем сопоставления с экспериментальными данными. Поскольку испытания натуральных двигателей связаны с большими материальными затратами, то для получения объективной экспериментальной информации целесообразно проводить предварительные исследования на модельных двигательных установках.

Целью данной работы является изучение и применение аэродинамического эксперимента в условиях натурального (физического) моделирования обтекания сверхзвуковым потоком прямоточного воздушно-реактивного двигателя (ПВРД) с использованием импульсной аэродинамической установки.

Основное отличие такого двигателя заключается в том, что он использует в качестве окислителя кислород атмосферного воздуха.

Выбран calorиметрический метод регистрации температуры [1, 2], основанный на термоэлектрическом измерении. Для измерения статической температуры потока на стенке проточного тракта модельного ПВРД была разработана схема зонда с медными датчиками температуры. Датчики

температуры изготовлены из медных колец, соединённых с хромель-копелевыми термопарами диаметром 0.3 мм [3]. Все датчики прошли процесс предварительной градуировки.

При проведении экспериментов измерялась температура торможения потока на оси проточного тракта заднего среза термозонда, температура на стенке форкамеры и в шести точках на стенке канала модельного ПВРД.

Эксперименты проводились на импульсной аэродинамической установке с использованием профилированного сопла, обеспечивающего число Маха равного пяти и шести. Время работы установки составляло 3 секунды [4]. При этом обеспечивался предварительный нагрев воздуха до 400 °С. Всего проведено по 6 экспериментов для каждого значения числа Маха.

Таким образом, были получены значения температур вдоль стенки проточного тракта модельного ГПВРД (рис. 1) с использованием термозонда, где x – расстояние от начального сечения модели до рабочего спая термопары. На рис. 2 представлены осредненные максимальные значения температуры стенки вдоль проточного тракта.

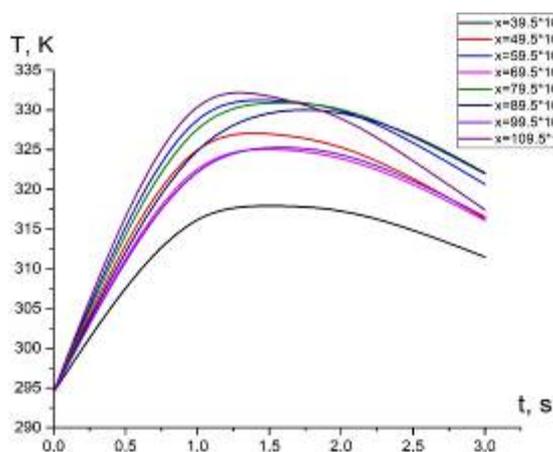


Рис. 1. Измеренные зависимости температуры стенки вдоль проточного тракта модельного ГПВРД от времени, при $M=5$

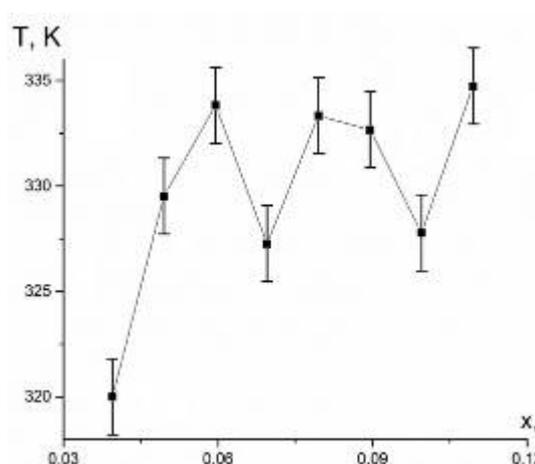


Рис. 2. Осредненные максимальные значения температуры стенки вдоль проточного тракта модельного ГПВРД, при $M=5$

В работе предложена экспериментальная методика исследования распределения температуры в канале проточного воздушно-реактивного двигателя. Разработанные технические средства обеспечивают реализацию предложенной методики. Полученные на основании предложенной методики результаты распределения температуры адекватны физике исследуемого процесса. Сопоставление результатов данных экспериментов с численными расчетами показало их качественное согласование [5].

Литература

1. Методы и средства измерения температуры торможения газового потока в сложных условиях течения / Е.У. Репик, Ю.П. Соседко // Учёные записки ЦАГИ, т. XXXIX, 2008.
2. Репик Е.У. Измерение температуры газового гиперзвукового потока малой плотности // Труды ЦАГИ, 1967, вып. 1066.
3. Теория и техника теплофизического эксперимента: учеб. пособие для вузов / Ю.Ф. Гортышов, Ф.Н. Дресвянников, Н.С. Идиатуллин и др.; под ред. В.К. Щукина. М.: Энерггеатомиздат, 1985. 360 с.
4. *Звегинцев В.И.* Газодинамические установки кратковременного действия. Ч. 1: Установки для научных исследований. Новосибирск: Параллель, 2014. 551 с.
5. Анализ процесса теплообмена в пограничном слое проточной части модельного ГПВРД при обтекании свехрзвуковым потоком / В.В. Мацкевич, В.В. Фарапонов, Е.А. Маслов // Интеллектуальные энергосистемы: труды V Международного молодёжного форума, 9–13 октября 2017 г., г. Томск: в 3 т. Томск: Изд-во ТПУ, 2017. Т. 1. С. 49–52.

References

1. Methods and means of measuring the deceleration temperature of a gas stream in difficult flow conditions // E.U. Repik, Yu.P. Sosedko, TsAGI Scientific Notes, vol. XXXIX, 2008.
2. *Repik E.U.* Measurement of the temperature of a low-density gas hypersonic flow // Trudy TsAGI, 1967, no. 1066.
3. Theory and technology of thermophysical experiment: Textbook. manual for universities / Yu.F. Gortyshov, F.N. Dresvyannikov, N.S. Idiatullin and others; ed. V.K. Shchukin. M.: Energeatomizdat, 1985. 360 p.
4. *Zvegintsev V.I.* Gas dynamic installation of short duration. Part 1 Installations for scientific research. Novosibirsk: Parallel, 2014. 551 p.
5. Analysis of the heat exchange process in the boundary layer of the flow part of the model ramjet with a supersonic flow around it / V.V. Matskevich, V.V. Faraponov, E.A. Maslov; science supervisor E.A. Maslov // Intellectual Energy Systems: Proceedings of the V International Youth Forum, October 9–13, 2017, Tomsk: in 3 v. Tomsk: TPU Publishing House, 2017. Vol. 1. pp. 49–52.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА, НЕОБХОДИМОГО ДЛЯ УВОДА КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА С ПОМОЩЬЮ СИЛЫ ЛОРЕНЦА ПО СПИРАЛИ АРХИМЕДА

С.Ю. Онищук

Омский государственный технический университет, Россия
onishchuksy@gmail.com

Ключевые слова: космический мусор, космический аппарат, сила Лоренца, удельный заряд, спираль Архимеда.

Аннотация. Определена приближенная величина удельного заряда объекта космического мусора (ОКМ) необходимого для его спуска с круговой орбиты до границы атмосферы. Рассмотрено магнитное взаимодействие между ОКМ, принятым за заряженную материальную точку, и магнитным полем Земли, принятым за магнитный диполь. Эллиптический закон движения ОКМ заменяется движением по спирали Архимеда близким к орбитальному. Определено выражение зависимости величины удельного заряда от времени полета и построен его график зависимости. Приведенные результаты позволяют получить предварительную оценку величины заряда, необходимого для маневра снижения ОКМ, а также позволяет на этапе разработки бестопливной системы увода принять программу формирования заряда и необходимые проектные решения.

DETERMINATION OF THE SPECIFIC CHARGE REQUIRED TO REMOVE THE SPACECRAFT USING LORENTZ FORCE IN THE ARCHIMEDES SPIRAL

S.Yu. Onishchuk

Omsk State Technical University, Russian Federation
onishchuksy@gmail.com

Abstract. The approximate value of the specific charge of the space debris object (OCM) necessary for its descent from the circular orbit to the atmospheric boundary is determined. The magnetic interaction between the OCM taken as a charged material point and the Earth's magnetic field taken as a magnetic dipole is considered. Elliptical law of the motion of ОКМ is replaced by the movement of the spiral of Archimedes is close to orbital. The expression of the dependence of the specific charge on the flight time is determined and its dependence graph is constructed. The given results allow to obtain a preliminary assessment of the value of the charge required for the deorbit maneuver ОКМ and allows at the stage of development of propellantless system disposed to accept the program of formation of the charge and the necessary design decisions.

Keywords: space debris, spacecraft, the Lorentz force, the specific charge, the spiral of Archimedes.

Объект космического мусора (ОКМ) представляет собой неконтролируемый космический аппарат (КА), на траекторию которого не может повлиять человек. Существует несколько способов борьбы с ОКМ: предотвращение роста всей массы ОКМ, путем увода последней ступени ракеты после отработки за счет повторного включения двигателя бестопливные методы изменения параметров движения КА [1]. На низкой околоземной орбите наиболее эффективным среди бестопливных методов является использование фундаментального взаимодействия магнитного поля Земли и заряженного КА.

Задачами исследования является получение уравнений движения [2] и частное решение для величины удельного заряда КА, движущегося в экваториальной плоскости по спирали Архимеда.

С помощью уравнения Лагранжа 2 рода для консервативной системы получим следующее уравнение движения:

$$m \cdot \left[\ddot{r} - r \cdot (\dot{\theta}^2 + \dot{\phi}^2 \cdot \sin^2 \theta) + \frac{\mu}{r^2} + \lambda \cdot \sin^2 \theta \cdot \frac{B_0}{r^2} \cdot (\dot{\phi} - \omega) \right] = 0 \quad (1)$$

Зависимость удельного заряда от времени полета:

$$\lambda = \frac{\left(r_0 - \frac{a}{2\pi} \dot{\phi} \cdot t \right)^3 \cdot \dot{\phi}^2 - \mu}{B_0 \cdot (\dot{\phi} - \omega_3)} \quad (2)$$

Для примера возьмем отработавшую вторую ступень РН Космос – 3М. Через 24 года КА будет находиться на высоте 60 км от поверхности Земли.

Таблица 1. Исходные данные

Параметр	Значение
Гравитационный параметр Земли, μ	$3.986 \cdot 10^5$, км ³ /с ²
Начальное расстояние, r_0	7071, км
Магнитный момент диполя Земли, B_0	$8 \cdot 10^6$, Тл·км ³
Угловая скорость вращения Земли, ω_3	$7.292 \cdot 10^{-5}$, рад/с
Шаг спирали, a	0.005, км
Угловая скорость КА, $\dot{\phi}$	$1.062 \cdot 10^{-3}$, рад/с

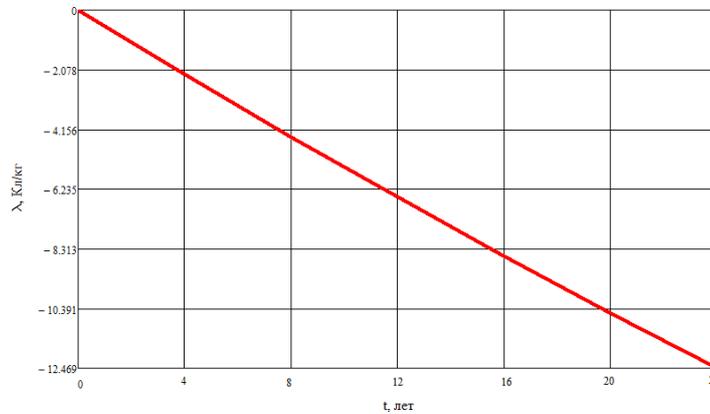


Рис. 1. График зависимости удельного заряда от времени

Исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания подведомственным образовательным организациям, проект «Повышение экологической безопасности и экономической эффективности ракет-носителей с маршевыми жидкостными ракетными двигателями» задание № 9.1023.2017/ПЧ.

Благодарность научному руководителю д.т.н. проф. В.И. Трушлякову.

Литература

1. *Вениаминов С.С., Червонов А.М.* Космический мусор угроза человечеству / под ред. Р.Р. Назирова, О.Ю. Аксенова. М.: Ротапринт ИКИ РАН, 2012, 192 с.
2. *Gangestad J.W., Pollock G.E., Longuski J.M.* Propellantless Stationkeeping at Enceladus via the Electromagnetic Lorentz Force // *Journal Of Guidance, Control, And Dynamics* Vol. 32, No. 5, Sep.–Oct. 2009.

References

1. *Veniaminov S.S., Chervonov A.M.* Space Debris a Threat to Mankind / Edited by. Nazirov R.R, Aksenov O.Y. M.: Rotaprint IKI RAN, 2012, 192 p.
2. *Gangestad J.W., Pollock G.E., Longuski J.M.* Propellantless Stationkeeping at Enceladus via the Electromagnetic Lorentz Force // *Journal Of Guidance, Control, And Dynamics* Vol. 32, No. 5, Sep.–Oct. 2009.

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ МОДЕЛИ В РАБОЧЕЙ ЧАСТИ ИМПУЛЬСНОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Н.П. Скибина

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
uss.skibina@gmail.com

Ключевые слова: аэродинамика, вычислительная гидродинамика, коэффициент лобового сопротивления, импульсная аэродинамическая установка.

Аннотация. Целью настоящей работы является математическое моделирование процесса обтекания тела, закрепленного в рабочей части импульсной аэродинамической установки, сверхзвуковым потоком воздуха со скоростью в числах Маха $M = (2 \div 5)$. В качестве моделей выбраны клин и конус, так как для тел данной геометрии ранее проводились серии экспериментов. При этом модели имели одинаковое сечение с углом полураствора 15 градусов и различную структуру течения вблизи тела. С использованием вычислительного комплекса Ansys Fluent осуществлялось решение системы осредненных уравнений Навье–Стокса. Для моделирования турбулентности использовалась SST модель. Относительная погрешность результатов численного расчета в сравнении с результатами эксперимента составила около 3%. Качественное сравнение картин обтекания, полученных в ходе видеосъемки процесса высокоскоростной видеокамерой, и полей распределения рассчитанных газодинамических параметров показало хорошее согласование между математическим и физическим моделированием.

NUMERICAL CALCULATION OF PARAMETERS FOR SUPERSONIC FLOW AROUND BODY IN WORKING PART OF WIND TUNNEL

N. Skibina

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

Keywords: aerodynamic; computational fluid dynamics; aerodynamic drag coefficient; pulsed wind tunnel.

Abstract. The main purpose of this research is a mathematical modeling of the flow around a body, installed in the working part of a pulsed aerodynamic wind tunnel, by supersonic air flow with a Mach numbers $M = (2 \div 5)$. A wedge and a cone were chosen as models, since a series of experiments were previously carried out for the bodies of a given geometry. At the same time, the models had the same cross-section with a half-angle of 15 degrees and a different flow structure near the body. Using the computational software Ansys Fluent, the Navier-Stokes system of averaged equations was solved. SST model was used to simulate turbulence. The relative error of the results of numerical calculation in comparison with the results of the experiment was about 3%. A qualitative comparison of the flow patterns obtained during the process video filming with a high-speed video camera and the distribution fields of the calculated gas-dynamic parameters showed good agreement between mathematical and physical modeling.

Разработка сверхзвуковых и гиперзвуковых летательных аппаратов военного и гражданского назначения приводит к необходимости изучения аэродинамики, тепломассообмена и физической механики полета на высоких скоростях. Актуальность исследований подтверждается национальными и международными программами, реализуемыми на территории Европы, США, Индии, Японии и Российской Федерации.

Импульсная аэродинамическая установка Томского государственного университета используется для проведения аэродинамических и аэрофизических исследований в сверхзвуковых и гиперзвуковых потоках со скоростями $M=2\div 7$. Основными достоинствами установки являются широкий диапазон режимов работы, простая конструкция, низкие расходы сжатого газа и электроэнергии [1].

Осуществление измерений в высокоскоростных потоках – довольно трудоемкий процесс, так как его организация и проведение требуют учета большого числа различных аспектов. Менее ресурсозатратным способом исследований является численный расчет. При этом критерием истинности остается эксперимент: в результате сравнения результатов математического моделирования и результатов, полученных опытным путем, можно судить о достоверности данных численного расчета и применимости подхода в целом.

Целью настоящей работы является математическое моделирование процесса обтекания тела, закрепленного в рабочей части импульсной аэродинамической установки, потоком воздуха со скоростями в числах Маха $M = (2 \div 5)$. В качестве исследуемых моделей выбраны клин и конус, так как для тел данной геометрии ранее были проведены серии экспериментов. При этом модели имели одинаковое сечение с углом полураствора 15 градусов, но структура течения вблизи тела различна [2].

С использованием вычислительного комплекса Ansys Fluent осуществлялось решение системы осредненных уравнений Навье–Стокса. Для моделирования турбулентности использовалась SST модель. Относительная погрешность результатов численного расчета относительно результатов эксперимента составила около 3%. Качественное сравнение картин обтекания, полученных в ходе видеосъемки процесса высокоскоростной видеокамерой, и полей распределения рассчитанных газодинамических параметров показало хорошее согласование между математическим и физическим моделированием [3].

В процессе работы отлажена методика численного расчета, позволяющая производить расчет параметров обтекания тела в рабочей части при заданной скорости набегающего потока. Сформированная база знаний открывает возможности размещения в рабочей части установки тела более сложной формы для изучения их обтекания сверхзвуковыми и гиперзвуковыми потоками.

Грамотная состыковка эксперимента и математического моделирования позволяет получать достоверные данные для широкого диапазона аэродинамических и термогазодинамических параметров, а также дает информативную картину изменения параметров исследуемого процесса.

Литература

1. *Звегинцев В.И.* Газодинамические установки кратковременного действия. Ч. I: Установки для научных исследований. Новосибирск: Параллель, 2014. 551 с.
2. *Фараонов В.В., Маслов Е.А., Чунашев А.В., Мацкевич В.В., Чижев С.Ю.* Экспериментальное исследование обтекания тел плоской и осесимметричной формы // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: сб. трудов IX всероссийской научной конференции, 21–25 сентября 2016 года, г. Томск. Томск: Томский государственный университет, 2016. С. 144–145.
3. *Скибина Н.П., Савкина Н.В., Фараонов В.В.* Математическое моделирование газодинамических параметров потока в импульсной аэродинамической установке и численный расчет аэродинамических характеристик при обтекании тела в рабочей части: сб. трудов X всероссийской научной конференции, 3–5 сентября 2018 года, г. Томск. Томск: Томский государственный университет, 2018. С. 83.

References

1. *Zvegintsev V.I.* Gas dynamic installation of short duration. Part I. Installations for scientific research. Novosibirsk: Parallel, 2014. 551 s.

2. *Faraponov V.V., Maslov E.A., Chupashev A.V., Matskevich V.V., Chizhov S.Yu.* Experimental study of the flow around flat and axisymmetric bodies // Fundamental and applied problems of modern mechanics: Collection of works of the IX All-Russian Scientific Conference, September 21–25, 2016, Tomsk. Tomsk: Tomsk State University, 2016. Pp. 144–145.

3. *Skibina N.P., Savkina. N.V., Faraponov V.V.* Mathematical modeling of gas-dynamic parameters of the flow in a pulsed aerodynamic installation and numerical calculation of the aerodynamic characteristics of the flow around the body in the working part // Collected Works of the X All-Russian Scientific Conference, September 3–5, 2018, Tomsk. Tomsk: Tomsk State University, 2018. p. 83

ВОПРОС О СТАБИЛИЗАЦИИ ДАВЛЕНИЯ ФОРСИРОВАНИЯ ПРИ ВЫСТРЕЛЕ

М.С. Хребтова

Новосибирский государственный технический университет, Россия
maria.khrebtova@yandex.ru

Ключевые слова: давление форсирования, ведущий поясок, врезание в нарезы канала ствола.

Аннотация. Изменение конструкции ведущего пояска артиллерийского боеприпаса к нарезному оружию – один из актуальных способов стабилизации давления форсирования при выстреле и тем самым повышения характеристик боеприпаса. Переход к новому типу конструкции ведущего пояска обеспечивает уменьшение затрат энергии на врезание в нарезы канала ствола практически вдвое, что приводит к стабилизации давления форсирования при выстреле.

THE ISSUE OF BOOST PRESSURE STABILISATION DURING FIRING

Maria Khrebtova

Novosibirsk State Technical University, Russian Federation
maria.khrebtova@yandex.ru

Keywords: boost pressure, driving belt, bumping into barrel rifling.

Abstract. Changing the design of the driving belt of artillery ammunition to a new type is one of the most relevant ways to stabilize the boost pressure during a shot and thereby improve the performance of the ammunition. Usage of a new design of the driving belt reduces energy consumption for plunging almost by half, which increases boost pressure stabilization.

В настоящее время весьма актуален вопрос поиска способов повышения технических характеристик артиллерийского снаряда при уменьшении его

себестоимости. Одним из таких способов является изменение конструкции ведущего пояска (ВП) [1, 2].

Воздействие конструкции на характеристики заключается в том, что в зависимости от формы и размеров ВП изменяется количество энергии пороховых газов, затрачиваемое на врезание боеприпаса в нарезы канала ствола. Энергия расходуется на выполнение двух задач:

- 1) формирование необходимого профиля ведущего пояска для обеспечения ведения по нарезам канала ствола и обтюрации пороховых газов;
- 2) создание необходимого давления форсирования в момент завершения формирования профиля ВП, для наибольшего импульса, обеспечивающего разгон снаряда.

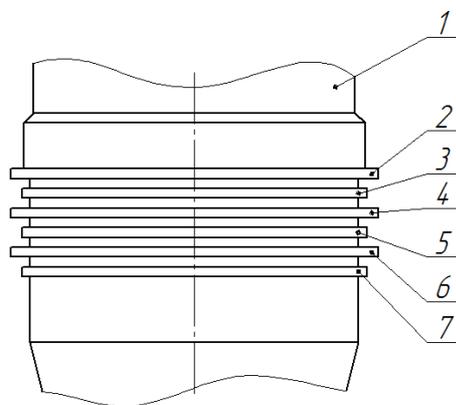
Соответственно, при изменении конструкции ВП изменяется и количество энергии, передаваемой боеприпасу, что сказывается на его скорости. Таким образом, управляя геометрией ВП можно обеспечить минимизацию рассеяния давления форсирования при выстреле, тем самым улучшая характеристики боеприпаса [3].

Целью работы является изучение того, как влияет изменение геометрии ВП на стабилизацию давления форсирования при выстреле. К задачам можно отнести определение контактных напряжений при врезании как типовых ВП, так и ВП нового типа.

Определим, насколько изменяется усилие продавливания в зависимости от конструкции ведущего пояска. Для этого сравним два вида: типовую и нового типа, причем оба выполнены из одного материала. ВП нового типа состоит из нескольких отдельных кольцевых выступов и по ширине и материалу совпадает с типовым.

Используя методику расчета контактных напряжений Е.В. Чурбанова, определим зависимость контактных напряжений, возникающих при врезании ВП в нарезы канала ствола [4]. Количество энергии, затрачиваемой на деформацию ВП, равно интегралу под площадью кривой зависимости контактных напряжений от координаты сечений.

Рис. 1. Артиллерийский снаряд к нарезному оружию с ведущим пояском нового типа:
1 – корпус артиллерийского снаряда; 2, 4, 6 – кольцевые выступы ведущего пояска типовой высоты; 3, 5, 7 – кольцевые выступы ведущего пояска меньшей высоты



Результаты расчетов показывают, что если для типового ВП энергия составляет X Дж, то для ведущего пояска нового типа из того же материала – около $0,45X$ Дж.

С учетом изложенных выше идей была разработана полезная модель конструкции ВП нового типа [5], как показано на рис. 1. Задачей предлагаемой полезной модели является повышение дальности стрельбы за счет улучшения обтюрирующего действия ведущего пояска и при условии сохранения износостойкости ствола.

Предложенный вариант конструкции обеспечивает уменьшение максимальных затрат энергии на продавливание приблизительно в 2 раза.

Вследствие допусков на высоту ВП величина давления форсирования колеблется. Конструкция ВП нового типа уменьшает максимум давления форсирования, следовательно, его колебание также уменьшается. Таким образом, можно сделать вывод, что меньший разброс данной величины приводит к уменьшению рассеивания боеприпаса в целом.

Литература

1. *Капустин А.И.* Передовая технология и новые материалы в производстве боеприпасов. Боеприпасы, 1989, №1 С. 69–74.
2. *Гуськов А.В.* Ведущий поясок, обеспечивающий повышенную точность стрельбы / А.В. Гуськов, К.Е. Милевский, М.С. Хребтова // Академические Жуковские чтения. Современное состояние и перспективы развития авиационного вооружения: сб. науч. ст. по материалам 2 Всерос. науч.-практ. конф. (25–27 нояб. 2014 г.). Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015. С. 56–61.
3. *Селиванов В.В.* (общ. ред.) Средства поражения и боеприпасы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 982 с.
4. *Ермолаев С.И.* Внешняя баллистика / С.И. Ермолаев, Л.Б. Комаров, Е.В. Чурбанов. Л.: Военно-морская академия кораблестроения и вооружения им. Крылова, 1958. 718 с.
5. Артиллерийский снаряд к нарезному оружию // Патент РФ Ru 149768, 20.01.2015 г., Бюл. № 2, / Гуськов А.В., Милевский К.Е., Хребтова М.С.

References

1. *Kapustin A.I.* Advanced technology and new materials in the production of ammunition. Ammunition, 1989, №1. P. 69–74.
2. *Guskov A.V.* Driving belt with improved accuracy / A.V. Guskov, K.E. Milevsky, M.S. Khrebtova // Academic Zhukovsky Readings. The current state and prospects of development of aviation weapons: Sat. scientific Art. On materials 2 Vseros. scientific-practical conf. (Nov. 25–27, 2014). Voronezh: VUNC VVS Air Force, 2015. P. 56–61.
3. *Selivanov V.V.* Means of destruction and ammunition. M.: Izd-vo MGTU N.E. Bauman, 2008. 982 p.
4. *Ermolaev S.I.* External ballistics / S.I. Yermolaev, L.B. Komarov, E.V. Churbanov. L.: Naval Academy of Shipbuilding and Armament. Krylova, 1958. 718 p.
5. Artillery shell for rifled weapons // Patent of the Russian Federation Ru 149768, 01.20.2015, Bull. № 2, / Guskov AV, Milevsky KE, Khrebtova M.S.

Секция 4. Баллистика и Небесная механика

Подсекция 4.1 Небесная механика

Председатель

к.ф.-м.н., Галушина Т.Ю.

Космический мусор,
Космические аппараты,
Астероиды,
Кометы,
Вековые резонансы,
MEGNO-анализ

Session 4

Ballistics and celestial mechanics

Subsection 4.1 Celestial mechanics

Chairman

Ph.D., Tatiana Galushina

Space debris,
Spacecraft,
Asteroids,
Comets,
Age-old resonances
MEGNO analysis

ОРБИТАЛЬНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ОБЪЕКТОВ, ДВИЖУЩИХСЯ В ОКРЕСТНОСТИ РЕЗОНАНСА 1:3 С ВРАЩЕНИЕМ ЗЕМЛИ, В УСЛОВИЯХ НАЛОЖЕНИЯ РЕЗОНАНСОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Е.В. Блинкова, И.В. Томилова

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
zbizk322@mail.ru

Ключевые слова: динамика околоземных объектов, орбитальный резонанс, вековые апсидально-нодальные резонансы, MEGNO-анализ.

Аннотация. Работа посвящена исследованию особенностей динамики объектов, движущихся в резонансе 1:3 с вращением Земли. Проведен обширный численно-аналитический эксперимент по исследованию динамической структуры околоземного пространства выбранной области. Выявлены зоны действия в ней пяти компонентов орбитального резонанса и апсидально-нодальных вековых резонансов низких порядков. Динамическая структура орбитального пространства исследована также с использованием быстрой ляпуновской характеристики MEGNO и представлена MEGNO-картой. По результатам численного эксперимента сделан ряд интересных выводов. В частности, выявлено, что движение большинства объектов исследуемой области отличается высокой степенью хаотичности. Анализ действия резонансов показал, что это является следствием наложения устойчивых и неустойчивых резонансов различных типов.

THE ORBITAL EVOLUTION OF OBJECTS MOVING IN THE VICINITY OF A 1: 3 RESONANCE WITH THE ROTATION OF THE EARTH, IN TERMS OF THE IMPOSITION OF RESONANCES OF VARIOUS TYPES

E. Blinkova, I. Tomilova

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

Keywords: dynamics of near-earth objects, orbital resonance, secular apsidal-nodal resonances, MEGNO analysis.

Abstract. The work is devoted to the study of the features of the dynamics of objects moving in resonance 1:3 with the rotation of the Earth. An extensive numerical and analytical experiment was conducted to study the dynamic structure of the near-earth space of the selected area. The zones of action of five components of orbital resonance and apsidal-nodal secular resonances of low orders are revealed. The dynamic structure of the orbital space is also studied using the fast Lyapunov characteristic of MEGNO and is represented by a MEGNO map. According to the results of the numerical experiment, a number of interesting conclusions were made. In particular, it was found that the movement of most objects of the study area is characterized by a high degree of randomness. The analysis of the resonance ac-

tion showed that this is a consequence of the imposition of stable and unstable resonances of various types.

Работа посвящена актуальной теме исследования динамической структуры околоземного орбитального пространства в области резонанса 1:3 с вращением Земли. Эта область околоземного космического пространства малоизучена. В то же время она может быть использована как для развертывания спутниковых систем связи и навигации, так и для паркинга отработавших объектов системы ГЛОНАСС. Для той и другой задач необходимо знание динамической структуры данной области. Исследование осуществляется путем численного моделирования. В такой постановке задача для данной области решается впервые. В работе [1] Э.Д. Кузнецовым с соавт. рассмотрена динамическая эволюция объектов, движущихся в окрестности резонансов низких порядков, для резонанса 1:3 со скоростью вращения Земли и определена область действия этого резонанса по большой полуоси. Никакие другие динамические характеристики области не определялись.

Целью данной работы является детальное исследование динамической структуры области резонанса 1:3 со скоростью вращения Земли и особенностей долговременной орбитальной динамики объектов, движущихся в этой области.

Для реализации поставленной цели были решены следующие задачи:

- исследована динамическая структура орбитального пространства с использованием быстрой ляпуновской характеристики MEGNO [2] и построена соответствующая динамическая карта области;
- произведен анализ резонансных возмущений, действующих на движение объектов, населяющих рассматриваемую орбитальную область;
- выявлены особенности динамической эволюции орбит под действием резонансов.

Численное моделирование движения объектов осуществлялось на кластере «СКИФ Cyberia» НИ ТГУ при помощи усовершенствованного программного комплекса «Численная модель движения систем ИСЗ» [3]. В процессе моделирования учитывались возмущения от гармоник гравитационного потенциала до 10 порядка и степени, а также возмущения от Луны и Солнца.

Для оценки хаотичности и определения интервала предсказуемости движения использовался комплекс программ, разработанный в [4] для MEGNO-анализа орбитальной эволюции объектов. Исследования проводились по методике, кратко изложенной в [5].

Численный эксперимент осуществлялся в диапазоне больших полуосей от 20250 до 20280 км и с наклонениями от 0 и до 90°.

В результате численного эксперимента была построена MEGNO-карта (рис. 1) для области резонанса 1:3 со скоростью вращения Земли, которая отражает динамическую структуру этой области.

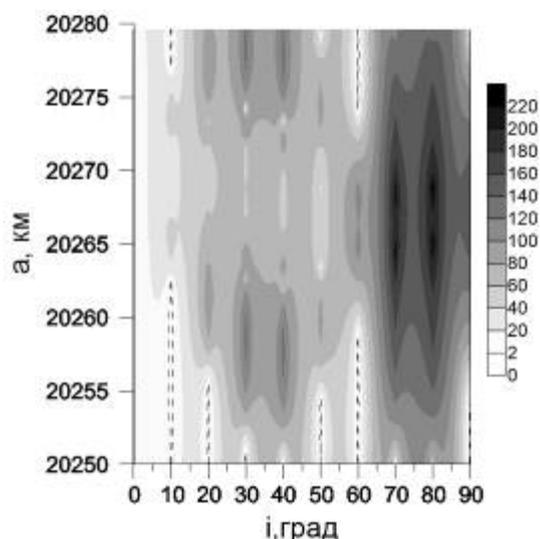


Рис. 1. MEGNO-карта области резонанса 1:3 со скоростью вращения Земли

Поверхность была построена путём расчёта эволюции на интервале времени 100 лет. Пунктирной линией обозначена область, где $MEGNO=2$ (регулярная орбита). При $MEGNO>2$ имеет место хаотическое движение.

Данные, приведенные на рис. 1, показывают, что область резонанса 1:3 со скоростью вращения Земли отличается высокой хаотичностью движения объектов.

Для того, чтобы определить причину хаотизации орбит, данная область исследовалась на наличие и распределение компонент орбитального и вековых апсидально-нодальных резонансов. Полученные данные сопоставлялись с особенностями динамической эволюции объектов под действием выявленных резонансов.

Общий анализ всех результатов говорит о том, что хаотичность возникает во всех случаях, когда хотя бы один из действующих резонансов неустойчив. При этом движение большинства объектов является очень сложным.

При использовании данной области околоземного космического пространства для развертывания спутниковых систем или паркинга отработавших объектов нужно учитывать сложность динамической структуры области.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, 18-32-00735 мол_а.

Литература

1. Кузнецов Э.Д., Захарова П.Е., Гламазда Д.В., Шагабутдинов А.И., Кудрявцев С.О. О влиянии светового давления на орбитальную эволюцию объектов, движущихся в окрестности резонансов низких порядков // Астрон. вестник, 2012, Т. 46, № 6, С. 480–488.
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. Pp. 151–178.

3. *Александрова А.Г., Бордовицына Т.В., Чувашов И.Н.* Численное моделирование в задачах динамики околоземных объектов // Изв. вузов. Физика. 2017. Т. 60, № 1. С. 69–76.
4. *Бордовицына Т.В., Александрова А.Г., Чувашов И.Н.* Комплекс алгоритмов и программ для исследования хаотичности в динамике искусственных спутников Земли / Изв. вузов. Физика. 2010а. №8/2. С. 14–21.
5. *Томилова И.В., Бордовицына Т.В., Красавин Д.С.* Динамическая структура орбитального пространства ГЛОНАСС и GPS. Проблема утилизации отработавших объектов // Изв. вузов. Физика, 2017. Т. 60. № 4, С. 119–125.

References

1. *Aleksandrova AG, Bordovitsyna T.V, Chuvashov I.N.* Numerical modeling in problems of near-earth objects dynamics // *Izv. vuzov. Fizika*. 2017. Vol. 60, No.1. Pp. 69–76.
2. *Bordovitsyna T.V., Aleksandrova A.G., Chuvashov I.N.* A complex of algorithms and programs for studying randomness in the dynamics of artificial earth satellites / *Izv. vuzov. Fizika*. 2010a. No. 8/2. Pp. 14–21.
3. *Kuznetsov, E.D., Zakharova, P.E., Glamazda, D.V., Shagabutdinov, A.I., Kudryavtsev, S.O.* On the effect of light pressure on the orbital evolution of objects moving near low-order resonances // *Astron. vestnik*, 2012, Vol. 46, No. 6. Pp. 480–488.
4. *Tomilova I.V., Bordovitsyna T.V., Krasavin D.S.* The dynamic structure of the orbital space of GLONASS and GPS. The problem of disposal of spent objects // *Izv. vuzov. Fizika*, 2017. Vol. 60. No. 4. Pp. 119–125.
5. *Cincotta P.M., Girdano C.M., Simo C.* Phase space structure. *Physica D* 2003. Vol. 182. Pp. 151–178.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА ПО ДАННЫМ ПОИСКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В ОБСЕРВАТОРИИ НА ПИКЕ ТЕРСКОЛ

П.А. Левкина¹, Н.С. Бахтигараев¹, В.В. Чазов²

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

²Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия
ayvazovskaya@inasan.ru

Ключевые слова: космический мусор, поисковые оптические наблюдения, определение орбит.

Аннотация. Регулярный мониторинг малоразмерных частиц в околоземном космическом пространстве делает возможным исследование заселённости определённых областей пространства техногенными телами. Регулярно обнаруживаются объекты, отсутствующие в каталогах. Телескоп Цейсс-2000 Терскольской обсерватории является крупнейшим телескопом, регулярно применяющимся для исследований космического мусора, при этом обнаруживаются и изучаются характеристики фрагментов космического мусора размерами менее 10 см на расстоянии 40 тыс. и более км от Земли. Например, только за 9 ночей в октябре 2018 г. было открыто 10 ранее не наблю-

давшихся малоразмерных фрагментов. В работе приводятся данные о некоторых обнаруженных в ходе поисковых наблюдений в 2018 г. малоразмерных фрагментах.

CHARACTERISTICS OF SPACE DEBRIS OBJECTS USING SEARCH OBSERVATIONS AT THE TERSKOL PEAK OBSERVATORY

P.A. Levkina¹, N.S. Bakhtigaraev¹, V.V. Chazov²

¹The Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

²Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, Russian Federation
ayvazovskaya@inasan.ru

Keywords: space debris, search optical observations, orbit determination.

Abstract. Regular monitoring of small-sized particles in the near-Earth space makes it possible to study the population of certain areas of space by man-made bodies, which is especially important for objects formed as a result of explosions and destruction in the orbit. The Zeiss-2000 telescope of the Terskol peak observatory is the largest telescope regularly used for space debris research, and the characteristics of space debris smaller than 10 cm in size at a distance of 40 thousand km or more from the Earth are detected and studied. For example, for only 9 nights in October 2018, 10 previously unobserved small fragments were discovered. The data on some small-sized fragments of space debris discovered in 2018 are present in this paper.

This work was supported by a grant from the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists (МК-6640.2018.2).

На комплексе телескопа Zeiss-2000 обнаруживаются малоразмерные объекты, недоступные телескопам с меньшей апертурой. Массив регулярно открываемых объектов, отсутствующих в каталогах, позволяет сделать вывод о заселённости околоземного космического пространства малоразмерными фрагментами космического мусора.

В октябре 2018 года состоялось 9 ночей наблюдений объектов космического мусора на телескопе Zeiss-2000 Терскольской обсерватории ИНАСАН. Орбитальные параметры объектов были получены с помощью численно-аналитической теории движения ИСЗ и космического мусора, разработанной в ГАИШ МГУ.

Было обнаружено более десяти различных фрагментов, большинство из которых находится в геостационарной области. Блеск всех объектов испытывает значительные резкие колебания, с амплитудой от 5 до 7 звездных величин в течение нескольких минут. Период вращения большинства обнаруженных объектов оценивается в ~2 минуты. Для некоторых новых объектов удалось оценить величину отношения площади к массе по данным нескольких наблюдательных ночей.

Характеристики одного из новых объектов, № 92918, представлены в настоящей работе.

Объект, позже каталогизированный под номером 92918, был открыт нами 28.06.2018 при наблюдениях на пике Терскол. Наблюдался 4 ночи (с 28.06.2018 по 01.07.2018), за это время было получено 486 положений. Средняя квадратическая погрешность измерений составила $\sim 0.3''$ по прямому восхождению и склонению.

Амплитуда блеска этого объекта изменяется в диапазоне от 15.3 до 20.8 звездной величины, средняя оценка блеска – 18.7 звездной величины. Период вращения объекта был оценен в 2.2 минуты. По четырем ночам наблюдений оценка величины отношения площади к массе составила $3.71 \text{ м}^2/\text{кг}$. Объект находится в геостационарной области с эксцентриситетом орбиты, равным 0.11089, и наклоном орбиты, равным 3.72159 градуса.

При отождествлении фрагментов космического мусора на основе координатной информации наиболее значимыми для процедуры отождествления элементами орбиты являются углы наклона плоскости орбиты и долготы восходящего узла относительно плоскости экватора. По критерию А.С. Сочилиной [1], на диаграмме «угол наклона – долгота восходящего узла» объекты космического мусора образуют скопления. Обнаруженный объект 92918 попадает в группу осколков с номером COSPAR 68081. Этот обломок разгонного блока Titan 3C Transtage, взорвавшегося на геостационарной орбите в 1992 году. Чтобы провести сравнение, элементы орбит фрагментов Transtage были заимствованы в базе параметров движения NORAD (<http://celestrak.com/NORAD/elements/>).

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (МК-6640.2018.2).

Литература

1. *Киладзе Р.И., Сочилина А.С.* Теория движения геостационарных спутников. Тбилиси, 2008.

References

1. *Kiladze R., Sochilina A.* Theory of motion of geostationary satellites. Pulkovo observatory of the RAS, Astrophysical observatory of Georgia, ILIA State University. Tbilisi. 2010. ISBN 978-9941-9126-1-0.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ИЗБРАННЫХ ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА В ИНАСАН

П.А. Левкина

Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия
ayvazovskaya@inasan.ru

Ключевые слова: космический мусор, отношение площади к массе, оптические наблюдения, режим либрации.

Аннотация. На телескопе Zeiss-2000 Терскольской обсерватории проводятся регулярные наблюдения искусственных космических объектов. Особое место в числе наблюдаемых объектов занимают фрагменты с большим отношением площади к массе, а также объекты геостационарной области, находящиеся в режиме либрации. В настоящей работе приведены орбитальные параметры и физические характеристики избранных объектов космического мусора по результатам наблюдений в ИНАСАН в 2018 году. Обнаружено резкое изменение элементов орбиты отработавшего аппарата Sirio (10294) по данным наблюдений с трёх обсерваторий (Звенигородской, Терскольской и обсерватории Санглок Института астрофизики Академии наук Таджикистана). Продолжается уточнение параметров модели изменения отношения площади к массе малоразмерного искусственного объекта, движущегося в режиме либрации вокруг устойчивой точки 75° в.д.

THE RESULTS OF OBSERVATIONS OF SELECTED SPACE DEBRIS OBJECTS IN THE INASAN

Polina Levkina

The Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation
ayvazovskaya@inasan.ru

Keywords: space debris, area-to-mass ratio, optical observations, libration mode.

Abstract. At the Zeiss-2000 telescope of the Terskol observatory, regular observations of artificial space objects are conducted. Fragments with a high area-to-mass ratio, as well as the geostationary librating objects, occupy a special place among the observed objects. This paper presents the orbital parameters and physical characteristics of selected objects of space debris based on the results of observations in INASAN in 2018. An abrupt change in the orbit elements of the Sirio (10294) old satellite was found from observations at three observatories (Zvenigorod observatory of the INASAN, Terskol observatory of the INASAN, and the Sanglok observatory of the Institute of Astrophysics of the Academy of Sciences of Tajikistan). The clarification of the model parameters for the change in the area-to-mass ratio of a small-sized artificial object moving in the libration mode around a stable point of 75° E continues.

На телескопе Zeiss-2000 Терскольской обсерватории проводятся регулярные наблюдения искусственных космических объектов [1]. Особое место в числе наблюдаемых объектов занимают фрагменты с большим отношением площади к массе, а также объекты геостационарной области, движущиеся в режиме либрации вблизи 75° в.д.

Несмотря на регулярный международный мониторинг околоземного космического пространства, наземными наблюдательными средствами продолжают обнаруживаться последствия взрывов космических аппаратов и сопутствующие запускам объекты, выведенные на орбиту несколько десятков лет назад. Это подтверждает значимость и актуальность проводимых исследований, в основе которых лежат высокоточные наблюдательные данные.

В 2018 году получены новые наблюдательные данные объекта Fengyun 2D Deb, для которого была предложена модель изменения отношения площади к массе [2]. Сеансы наблюдений на пике Терскол в марте и июне-июле подтвердили целесообразность существующей модели (не уточнявшейся после наблюдений 2014 года). Наблюдения, полученные в течение 9 ночей в октябре, показали, что модель нуждается в уточнении с помощью новых наблюдений (полученных после 2014 года). Наблюдательные данные показаны квадратами на графике модели величины отношения площади к массе (рис. 1).

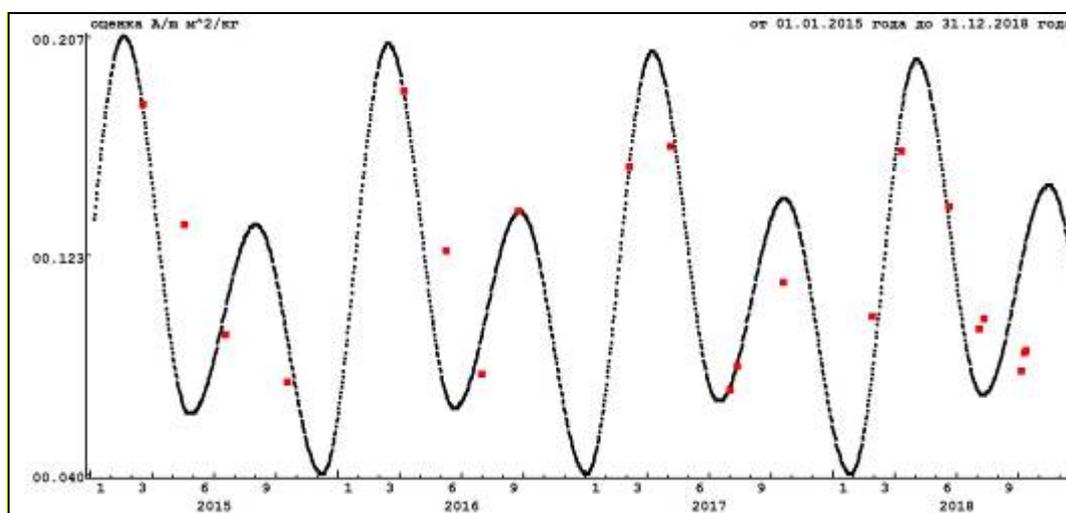


Рис. 1. Модель величины отношения площади к массе объекта Fengyun 2D Deb.

Проверка методики определения величины отношения площади к массе (A/m) осуществлялась по данным спутника Sirio с известными характеристиками [3]. Для Sirio: $A/m = 0.009 \text{ м}^2/\text{кг}$. Это итальянский экспериментальный научный аппарат (номер NORAD 10294, номер COSPAR 7708001), завершивший срок эксплуатации и находящийся в либрационном режиме с малой амплитудой около точки либрации 75° в.д.

Летом 2018 года на пике Терскол Sirio наблюдался 8 ночей подряд с 23.06.2018 по 01.07.2018, за это время было получено 718 положений. По данным наблюдений с трёх обсерваторий (Звенигородской обсерватории ИНАСАН, Терскольской обсерватории ИНАСАН и обсерватории Санглох Института астрофизики Академии наук Таджикистана) было обнаружено резкое изменение элементов орбиты этого отработавшего аппарата.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (МК-6640.2018.2).

Литература

1. Яцкив Я.С., Рыхлова Л.В., Тарадий В.К. Астрономия в Приэльбрусье. Кинематика и физика небесных тел, 2016. Т. 32, №5. С. 3–10.
2. Бахтигараев Н.С., Левкина П.А., Чазов В.В. Эмпирическая модель движения фрагмента космического мусора в геостационарной области // Астрон. вестник, 2016. Т. 50, № 2, 141.
3. Кохинова Г.И., Бахтигараев Н.С., Хамроев У.Х., Мулло-Абдолов А.Ш., Чазов В.В. Исследования космического мусора в международной астрономической обсерватории Санглох: сб. трудов конференции «Звёзды и спутники», посвященной 100-летию со дня рождения А.Г. Масевич, проведенной в Москве 15–16 октября 2018 г.: сб. научных трудов ИНАСАН / под ред. Б.М. Шустова и Д.З. Виебе М.: Изд-во Янус-К, 2018, С. 72–77.

References

1. Yatskiv Ya.S., Rykhlova L.V., Taradij V.K. Astronomy in the Elbrus Region. Kinematics and Physics of Celestial Bodies, 2016. Vol. 32. Pp. 213–217.
2. Bakhtigaraev, N.S.; Levkina, P.A.; Chazov, V.V. Empirical model of motion of space debris in the geostationary region. Solar System Research, 2016, Vol. 50, Issue 2. Pp. 130–135.
3. Kokhirova G.I.; Bakhtigaraev N.S.; Khamroev U.Kh.; Mullo-Abdolov A.Sh.; Chazov V.V. Investigations of space debris at the International Astronomical Observatory Sanglokh. Stars and Satellites, Proceedings of the Memorial Conference Devoted to A.G. Masevich 100th Anniversary, held in Moscow, Russia, in Oct 15–16, 2018, INASAN Science Proceedings. Edited by B.M. Shustov and D.S. Wiebe. Moscow: Yanus-K, 2018. pp. 72–77.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ АСТЕРОИДА 137924 2000 BD19, ИМЕЮЩЕГО МАЛОЕ ПЕРИГЕЛИЙНОЕ РАССТОЯНИЕ

О.Н. Летнер, Т.Ю. Галушина

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
volna@sibmail.com

Ключевые слова: 137924 2000 BD19, динамическая эволюция, тесные сближения, орбитальный резонанс, апсидально-нодальные резонансы.

Аннотация. Динамика АСЗ (астероида, сближающегося с Землей) 137924 2000 BD19 представляет собой большой интерес, так как этот объект имеет малое перигелийное расстояние, и кроме этого движется в окрестности орбитального резонанса $\frac{3}{4}$ с Венерой. С одной стороны, малое перигелийное расстояние астероида может представлять опасность для Земли, так как объект способен приближаться к Земле со стороны Солнца незамеченным. А с другой стороны, устойчивое резонансное взаимодействие астероида с одной из больших планет может служить защитным механизмом от тесных сближений с планетами, что удержит объект на известной орбите. В работе представлены результаты построения орбитальной эволюции астероида 137924 2000 BD19 на интервале времени (-7500, 5000) лет. Выявлены такие особенности движения астероида, как сближения с Меркурием и Землей, орбитальные и вековые резонансы, и получена оценка хаотичности орбиты АСЗ с помощью индикатора OMEGNO (Orthogonal Mean Exponential Growth factor of Nearby Orbits). При исследовании динамики астероида учитывались возмущения от больших планет, Луны, релятивистские эффекты от Солнца, сжатие Солнца и эффект Яркковского. Так как исследуемый объект регулярно проходит близко к Солнцу, эффект Яркковского может оказать значительное влияние на его динамику. По этой причине мы сравнили результаты исследования движения астероида с учетом эффекта Яркковского и без него.

THE STUDY OF THE DYNAMICS OF THE ASTEROID 137924 2000 BD19 WITH A SMALL PERIHELION DISTANCE

O.N. Letner, T.Yu. Galushina

Tomsk State University, Russian Federation
volna@sibmail.com

Keywords: 137924 2000 BD19, the dynamical evolution, close approaches, mean motion resonances, apsidal-nodal resonances.

Abstract. Dynamics of NEA (Near-Earth asteroid) 2000 137924 BD19 is of great interest because the object has a small perihelion distance. Besides it moves in the vicinity of the mean motion resonance $\frac{3}{4}$ with Venus. On the one hand, the small perihelion distance of the asteroid can be dangerous for the Earth, since the object is able to approach the Earth from the Sun's side unnoticed. On the other hand, a stable resonant interaction of the asteroid with one of the major planets can serve as a protective mechanism against close encounters with the planets, which will keep the object in a known orbit. The paper presents the results of the orbital evolution construction of the asteroid 137924 2000 BD19 over the time interval (-7500, 5000) years. The features of the asteroid's motion, such as approaches to Mercury and the Earth, mean motion and secular resonances, are identified, and the chaoticity of the NEA's orbit is estimated by the OMEGNO (Orthogonal Mean Exponential Growth factor of Nearby Orbits). During the study of the asteroid's dynamics, perturbations from the major planets, the Moon, relativistic effects of the Sun, oblateness of the Sun and the Yarkovsky effect were taken into account. Since the object under study regularly passes close to the Sun, the Yarkovsky effect can have a significant influence on its dynamics. For this reason we compared the results of the asteroid motion study with the Yarkovsky effect and without it.

В настоящее время особое внимание привлекают астероиды, имеющие малые перигелийные расстояния (менее 0.15 а.е.), так как исследование

динамики таких объектов играет важную роль в решении проблемы астероидной опасности. Такие небесные тела способны подходить к Земле со стороны Солнца не замеченными. Поэтому очень важно вовремя выявлять объекты подобного класса и исследовать их динамику.

Данная работа посвящена исследованию динамики АСЗ (астероида, сближающегося с Землей) 137924 2000 BD19, имеющего в современную эпоху перигелийное расстояние 0.092 а.е. Особый интерес в исследовании его движения заключается в резонансном взаимодействии объекта с Венерой – астероид 137924 2000 BD19 движется в орбитальном резонансе $3/4$ с этой планетой. Такая особенность, как орбитальные резонансы АСЗ с большими планетами, занимает важное место в исследованиях динамики подобных объектов и решении проблемы астероидной опасности. Известно, что в случае устойчивого резонанса эти взаимодействия могут служить защитным механизмом от тесных сближений с планетами, а попадание АСЗ в окрестность резонанса с неустойчивой геометрической конфигурацией «астероид–планета» повышает риск тесных сближений, что может привести к значительным изменениям орбиты исследуемого объекта [1].

На первом этапе мы провели исследование структуры возмущений и оценили, какой набор возмущающих ускорений следует учитывать при построении орбитальной эволюции астероида 137924 2000 BD19. Результаты исследования показали, что при построении орбитальной эволюции астероида необходимо учитывать возмущения от больших планет, Луны, релятивистские эффекты – от Солнца, сжатие Солнца и эффект Яковского.

На следующем этапе исследования была построена орбитальная эволюция АСЗ на интервале времени $(-7500, 5000)$ лет с помощью программного комплекса ИДА [2]. Движение астероида рассматривалось в рамках возмущенной задачи двух тел, уравнения движения интегрировались численно методом Эверхарта 21 порядка [3]. В качестве начального момента времени было взято среднее значение моментов наблюдений астероида. В процессе исследования были выявлены сближения астероида с Меркурием и Землей, орбитальный резонанс $3/4$ с Венерой и вековые резонансы с большими планетами [1, 4], а также получена оценка хаотичности орбиты АСЗ с помощью индикатора OMEGNO [5].

Результаты построения орбитальной эволюции АСЗ 137924 2000 BD19 показали, что астероид испытывает многократные и тесные сближения с Меркурием и Землей. Практически на всем интервале исследования АСЗ находится в устойчивом резонансе $3/4$ с Венерой, но на концах интервала интегрирования под действием тесных сближений с Землей порядка сферы Хилла 137924 2000 BD19 выходит из резонанса. При этом оценка хаотичности орбиты астероида с помощью индикатора OMEGNO показала, что движение астероида можно считать устойчивым квазипериодическим лишь на интервале времени $(-1570, 3940)$ лет. За пределами этого интерва-

ла под действием тесных и многократных сближений с Землей и Меркурием у орбиты астероида проявляются признаки хаотичности.

Исследование вековой резонансной динамики показало, что все выявленные абсидально-нодальные резонансы являются устойчивыми на рассматриваемом интервале времени.

Мы рассмотрели две модели сил при исследовании динамики 137924 2000 BD19: модель сил, приведенную выше, и ту же модель, но без учета эффекта Ярковского. Так как исследуемый объект регулярно проходит близко к Солнцу, эффект Ярковского может оказать значительное влияние на динамику объекта.

Сравнение результатов построения орбитальной эволюции с учетом Эффекта Ярковского и без него показало, что эффект Ярковского оказывает незначительное влияние лишь на эволюцию большой полуоси астероида в момент выхода из резонанса $3/4$ с Венерой. Но в этот момент у орбиты AC3 отчетливо проявляются признаки хаотичности, и прогнозирование движения астероида может быть недостоверным.

В дальнейшем планируется расширить исследование динамики астероида 137924 2000 BD19 и построить вероятностные области его движения для получения более достоверных результатов.

Данное научное исследование выполнено при поддержке Программы повышения конкурентоспособности ТГУ.

Литература

1. *Murray C.D., Dermott S.F.* Solar system dynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 592 с.
2. *Быкова Л.Е., Галушина Т.Ю., Батулин А.П.* Прикладной программный комплекс «ИДА» для исследования динамики астероидов // Изв. вузов. Физика. 2012. № 10/2. С. 89–96.
3. *Everhart E.* An Efficient Integrator That Uses Gauss–Radau Spacings // Dynamics of Comets: Their Origin and Evolution (Proc. of IAU Colloq. 83, held in Rome, Italy, June 11–15, 1984) / Eds. A. Carusi and G. B. Valsecchi. Dordrecht: Reidel, 1985. Pp. 185–202.
4. *Бордовицына Т.В., Томилова И.В., Чувашов И.Н.* Вековые резонансы как источник динамической хаотичности в долговременной орбитальной эволюции неуправляемых спутников // Астро. вест. 2014. Т. 48. № 4. С. 259–268.
5. *Шефер В.А., Коксин А.М.* Быстрые ляпуновские индикаторы OFLI и OMEGNO: связь и отличительные особенности // Изв. вузов. Физика. 2016. Vol. 59. № 1. С. 58–62.

References

1. *Murray C.D., Dermott S.F.* Solar system dynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 592 с.
2. *Bykova L.E., Galushina T.Yu., Baturin A.P.* 2012. The application suite “IDA” for investigation of dynamics of asteroids. Izv. Vuzov. Fiz. 55 (10/2), 89–96.
3. *Everhart E.* An Efficient Integrator That Uses Gauss–Radau Spacings // Dynamics of Comets: Their Origin and Evolution (Proc. of IAU Colloq. 83, held in Rome, Italy, June 11–15, 1984) / Eds. A. Carusi and G. B. Valsecchi. Dordrecht: Reidel, 1985. Pp. 185–202.

4. *Bordovitsyna T.V., Tomilova I.V., Chuvashov I.N.* 2014. Secular resonances as a source of dynamic chaoticity in the long-term orbital evolution of uncontrolled satellites. *Sol. Syst. Res.* 48 (4), 259–268.

5. *Shefer V.A. and Koxsin A.M.* Fast Lyapunov indicators OFLI and OMEGNO: their relationship and special features // *Russ. Phys. J.* 2016. Vol. 59. No. 1. pp. 71–75.

ПРОГРАММНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТЕОРОИДНЫХ ПОТОКОВ

А.А. Майнагашева

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
maynagasheva.a@bk.ru

Ключевые слова: метеороидный поток, Квадрантид, эволюция орбит.

Аннотация. В связи с ростом вычислительной мощности компьютеров весьма актуальным является создание автоматизированного программного обеспечения во всех сферах науки, в том числе и метеорной астрономии. Поэтому было решено создать оптимизированное программное средство для моделирования образования и эволюции метеороидного потока. Разработку программного обеспечения было решено проводить на том же языке что и часть программ уже написанных на PASCAL.

SOFTWARE TOOL FOR MODELING METEOROID STREAMS

Anna Maynagasheva

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

Keywords: meteoroid flow, quadrant, orbit evolution.

Abstract. In connection with the growth of computing power of computers, the creation of automated software in all areas of science, including meteor astronomy, is highly relevant. Therefore, it was decided to create an optimized software tool to simulate the formation and evolution of meteoroid flow. It was decided to carry out software development in the same language as part of the programs already written in PASCAL.

В связи с ростом вычислительной мощности компьютеров весьма актуальным является создание автоматизированного программного обеспечения во всех сферах науки, в том числе и метеорной астрономии. Хорошим стимулом для данной работы является также инициативный проект Virtual Astronomical Laboratory (Avdyushev et al., 2017), разработанный отделом небесной механики НИИ ПММ. При условии успешной реализации этот проект или часть его могут войти в проект Европланет VESPA (Virtual European Solar and Planetary Access). VESPA объединяет разнообразные

данные в области планетных науки и обеспечивает современные программные инструменты для поиска, кросс-корреляции и представления данных и результатов научного анализа (VESPA, 2018).

Одна из трёх существующих в мире моделей метеороидных потоков (для потока Геминид) создана в нашем отделе (Ryabova, 2007). Соответственно, за последние 30 лет накоплено большое количество программ для моделирования. Разумным шагом является объединение их в один современный инструмент. Подобная попытка была уже сделана шведскими коллегами (Kastinen and Kero, 2017), которые представили первые результаты из моделирования типа Монте-Карло для динамики малых тел Солнечной системы.

Математическое моделирование образования и эволюции метеороидного потока включает три больших этапа.

На первом этапе моделируется образование потока с учётом различных схем выброса вещества. Общеизвестно, что большая часть метеороидных потоков порождена кометами, выбрасывающими пылевое вещество при сближении с Солнцем. Однако астероиды тоже могут выбрасывать пылевые частицы: при столкновении, сходе вещества с поверхности при вращении, термическом растрескивании поверхности.

Второй этап – это вычисление эволюции орбит модельных метеороидов.

Третий этап – исследование структуры эволюционировавшего потока и сравнение её с наблюдениями.

Каждый этап требует относительно независимой реализации.

Необходимо объединить существующие программы, оптимизировать их, а также разработать недостающие модули. Работа не предполагает написание интерфейса. Все данные будут храниться в файлах с необходимым расширением. Важной частью проекта является разработка технической документации, возможно (это ещё не решено) на двух языках.

Тестирование будет выполнено с использованием существующей модели метеороидного потока Геминид. Однако мы планируем и разработку новой модели для метеороидного потока Квадрантид. Он является одним из главных ежегодных потоков. Поток необычен по нескольким причинам: очень короткий период «ядра» активности (0.5 сут), астероид 196256 (2003EH1) как возможное родительское тело метеороидного потока, возможное влияние вековых резонансов на динамику орбиты астероида. В последнее десятилетие опубликовано ряд статей, посвящённых этому комплексу. Его изучение весьма актуально в связи с открытием так называемых «активных астероидов».

На Земле Квадрантиды наблюдаются ежегодно в период с 28 декабря по 7 января, радиант потока находится в созвездии Волопаса. Метеоритный поток имеет ярко выраженный максимум, приходящийся на 3 или 4 января, это один из самых сильных и ярких метеоритных потоков за год. Зенитное часовое число (ZHR – zenithal hourly rate) 120 (изменяется ~60–

200). Правда, зимнее время года зачастую делает наблюдения весьма затруднительными. Пик метеоритного потока Квадрантидов к сожалению, короткий (всего несколько часов). Причина этого в том, что Квадрантиды – это очень тонкий поток частиц, и Земля пересекает этот поток под прямым углом. Родительское тело Квадрантид было неизвестно вплоть до 2003 года, когда Р. Jenniskens нашел свидетельства того, что поток связан с небольшим астероидом 2003ЕН1.

В работе Abedin et al., 2015 приведены результаты по наиболее вероятному возрасту ядра потока Квадрантид и образованию узкой этого потока. Согласно их результатам наиболее вероятный возраст узкой части потока составляет от 200 до 300 лет. Это примерно 1700–1800 года.

ПОИСК МЕТЕОРНЫХ ПОТОКОВ, ПОРОЖДЕННЫХ КОМЕТАМИ C 1983 Н1(ИРАС-АРАКИ-АЛЬКОКА), C 1979 Y1 (БРЭДФИЛДА), 1P/ГАЛЛЕЯ И 141P/МАЧХОЛЬЦА 2

Е.С. Постникова, С.В. Верещагин

Институт астрономии Российской академии наук, Россия
es_p@list.ru

Ключевые слова: астрометрия, орбиты небесных тел, кометы, метеорные потоки, архивы изображений.

Аннотация. Рассмотрена задача сближения в пространстве Солнечной системы орбит комет и метеорных потоков. Для определения случаев сближения использованы различные критерии близости орбит комет и метеорных роев, возникших из вещества, потерянного кометами при сближении с Землей. Рассмотрены кометы, для которых имеются длинные ряды широкопольных фотонаблюдений, полученных на Звенигородской обсерватории Института астрономии РАН. Продолжение работы позволит провести поиск возможных катастроф в хвостах комет. Потерянные кометой частицы могут достигать земной поверхности. Проблема актуальная для вопросов космической опасности тел, приближающихся к Земле.

SEARCH FOR METEOR STREAMS GENERATED BY COMETS C1983 Н1(IRAS-ARAKI-ALKOCA), C 1979 Y1(BREADFILD), 1P/HALLEY AND 141P/MACHHOLZ

Ekaterina Postnikova, Sergei Vereshchagin

The Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation
es_p@list.ru

Keywords: astrometry, orbits of celestial bodies, comets, meteor streams, image archives.

Abstract. The problem of approaching the orbits of comets and meteor streams in the space of the Solar System is considered. The problem is urgent for questions of the cosmic danger of bodies approaching the Earth. To determine the cases of convergence, various criteria were used for the proximity of the orbits of comets and meteoric streams arising from a substance lost by comets as they approach the Earth. The comets for which there are long rows of wide-field photo observations obtained at the Zvenigorod Observatory of the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences are considered. Continuing the work will allow the search for possible catastrophes in the tails of comets. The particles of a comet lost at the same time can reach a terrestrial surface.

Цель работы – отождествить метеорные потоки-сироты с наиболее яркими, проходящими недалеко от земной орбиты кометами, наблюдения которых проводились на Звенигородской обсерватории ИНАСАН в период 1972-2005 гг. [1]. Фотопластинки с изображениями комет, полученные на широкоугольном астрографе Zeiss-400 с полем зрения 8 на 8 градусов, хранятся в архиве Звенигородской обсерватории. Всего в нашем архиве около 450 изображений комет. При должном увеличении снимки позволяют различить детали (вихри, пятна повышенной яркости и т.п.) в хвостах комет и проследить за их изменениями в процессе наблюдений. В дальнейшем планируется сопоставить особенности, обнаруженные на изображениях, с результатами расчетов сближений орбит, полученных в данной работе. Для этих целей из архива выбраны пластинки с изображениями ярких комет, см. пример в работе [2]. Таким образом, в нашем распоряжении имеются подробные снимки комет с длиной хвостов достигающей 7 градусов.

Выбраны кометы C1983 H1(IRAS-ARAKI-ALKOCK), C 1979 Y1(Breadfield), 1P/Halley и 141P/Machholz, для которых имеются достаточно длинные ряды наблюдений в нашем архиве. На рис. 1 приведены изображения комет Галлея и ИРАС-Араки-Алькака, полученные на астрографе Zeiss-400 Звенигородской обсерватории.

Отметим, что появление метеорных потоков наиболее вероятно от комет сближающихся с Землей до расстояний, не превышающих 0.1 а.е. Нами был взят актуальный список метеорных потоков с сайта ИМО [3], с помощью которого отобраны метеорные потоки, для которых в имеющейся базе определены все 6 элементов орбит. По полученному списку произведен поиск ранее не обнаруженных метеорных потоков для выбранных комет.

Применена совокупность D-критериев и выполнены необходимые расчеты динамической эволюции орбит выбранных комет. Численное интегрирование орбит было выполнено с использованием N-body интегратора mercury6 [4]. Для оценки родственности кометы и потока применены: DSH-критерий Саутворта и Хокинса, DD-критерий Друмонда (модифицированный DSH) и смешанный критерий Йопека (DJOP), который был основан им на численном анализе критериев DSH и DD [5].

Был обнаружен метеорный поток South α -Pegasis (Южные Альфа Пегасиды), ранее считающийся «сиротой», но по данным D-критериев, уверенно принадлежащий комете 1979Y1 (Брэдфилда). Обнаружен ряд метеорных потоков, возможно, принадлежащих комете Мачхольца. Однако, из-за того, что она достаточно короткопериодическая и ее орбита прецессирует, оказалось сложно выделить однозначно ей принадлежащие потоки. Найден, возможно, метеорный поток ψ -Cygnids, который, вероятно также принадлежит комете C/1983 H1 (IRAS-Araki-Alcock). Для кометы Галлея показано, что ранее она подходила к земной орбите на более близкое расстояние, а сейчас постепенно удаляется от нее.

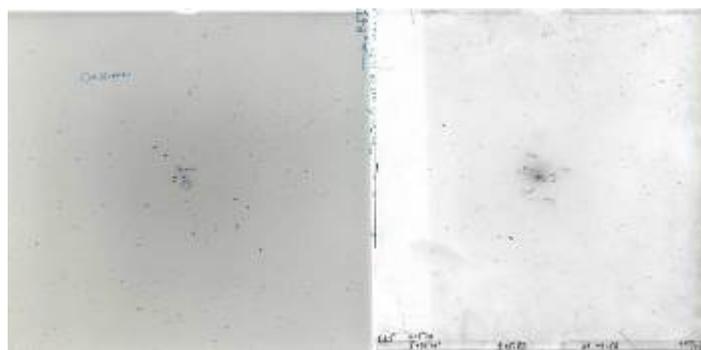


Рис. 1. Снимки кометы Галлея (слева) и ИРАС-Араки-Алькока (справа), полученные на астрографе Zeiss-400 Звенигородской обсерватории

Литература

1. Dluzhnevskaya O.B.; Vereshchagin S.V., Chupina N.V., Osipenko V.P. The INASAN Zvenigorod Observatory Plate Collection // Publications of the Astronomical Society "Rudjer Boskovic". 2012. Vol. 11. Pp. 359–362.
2. Верещагин С.В., Постникова Е.С., Осипенко В.П. Фотографические наблюдения кометы Хейла-Боппа на Звенигородской обсерватории // *Астрономический Вестник*, 2017, Vol. 51, No. 2. С. 174–181.
3. Международная организация по метеорам (ИМО). URL: <https://www.imo.net/>
4. Инструкция к интегратору Mercury6. URL: <https://github.com/4xxi/mercury>
5. Jopek T.J. Remarks on the meteor orbital similarity D-criterion // *Icarus*. 1993. Vol. 106. Pp. 603–607.

References

1. Dluzhnevskaya, O.B., Vereshchagin, S.V., Chupina N.V., Osipenko V.P. The INASAN Zvenigorod Observatory Plate Collection // Publications of the Astronomical Society "Rudjer Boskovic". 2012. Vol. 11. Pp. 359–362.
2. Vereshchagin S.V., Osipenko V.P., Postnikova E.S. Photographic observations of comet Hale–Bopp at the Zvenigorod Observatory // *Solar System Research*. 2017. T. 51. № 2. С. 157–164.
3. The International Meteor Organization (IMO). URL: <https://www.imo.net/>
4. Manual for the Mercury6 integrator. URL: <https://github.com/4xxi/mercury>
5. Jopek T.J. Remarks on the meteor orbital similarity D-criterion // *Icarus*. 1993. Vol. 106. Pp. 603–607.

ДИНАМИКА ЯДРА МЕТЕОРНОГО ПОТОКА КВАДРАНТИДЫ МЕЖДУ 1750 И 2020 ГОДАМИ

Г.Е. Самбаров, О.М. Сюсина

НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета,
Россия
detovelli@vtomske.ru

Ключевые слова: (196256) 2003 EH1, астероид, сближения с планетами, орбитальные резонансы.

Аннотация. В данной работе проведен анализ динамики метеорных частиц, предположительно высвобождаемых из околоземного астероида (196256) 2003 EH1, а именно: исследованы хаотичность и эволюция промоделированных выбросов метеороидов из предполагаемого родительского тела. Была выявлена сложная динамическая структура метеорного потока, который приближается к орбитам Юпитера и Земли.

THE DYNAMICS OF THE CORE OF THE QUADRANTIDS METEOR SHOWER BETWEEN AD 1750 AND 2020

Georgy Sambarov, Olga Syusina

Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Tomsk State University,
Russian Federation
detovelli@vtomske.ru

Keywords: (196256) 2003 EH1, asteroid, the dynamical evolution, Close encounters, mean motion resonances.

Abstract. In this paper, we studied the dynamics of particles supposedly ejected from the Near-Earth Asteroid (196256) 2003 EH1. Particularly, the chaotic and evolution of the simulated meteoroid stream from the proposed parent body were investigated. The complicated dynamic structure of the meteor shower was identified, which particles were the close approaches of Jupiter and the Earth.

Квадрантиды – один из самых сильных метеорных потоков. Возраст ядра метеорного потока Квадрантиды составляет всего 200–300 лет. Ядро данного потока связано с астероидом (196256) 2003 EH1, в то время как широкая часть потока связана с кометой 96P / Machholz. Астероид 2003 EH1 [1, 2] во многих работах, предполагается, как спящая или недавно вымершая комета. Данный объект движется вблизи орбитальных резонансов: 2/1 с Юпитером, 1/3 с Марсом и 1/9 с Венерой, а также имеет частые сближения с Юпитером, что может быть причиной проявления хаотичного движения астероида и модельных метеороидов.

Метеороиды наследуют динамические свойства родительского тела, но не все. На самом деле, метеорный поток можно рассматривать как уникальную структуру, возникающую, скорее всего, в кометных и астероидных родительских телах. Существует несколько десятков комет семейства Юпитера, многие из которых имеют динамические свойства, аналогичные свойствам астероида (196256) 2003 EH₁, и несколько известных астероидов с перигелием внутри орбиты Земли. Обнаружение и изучение малых тел Солнечной системы является актуальной проблемой для будущих исследований метеорных потоков.

Для моделирования потока метеороидов мы применяли метод, который заключается в том, что генерируется выброс определенного количества пробных частиц в некоторых точках на орбите родительского тела [3]. В рамках данного исследования эпохи выбросов были выбраны в перигелии родительской орбиты астероида (196256) 2003 EH₁ приблизительно в 1760–1790 гг. Дальнейшее исследование эволюции частиц метеорного потока осуществлялось с помощью численного интегрирования методом Everhart (1974) 19-го порядка с переменным размером шага от момента выброса до настоящего времени. В работе [2] была выполнена оценка возмущающих факторов, действующих на астероид (196256) 2003 EH₁, и выбрана оптимальная модель сил, которая включает в себя влияние больших планет, Луны, сжатия Солнца и релятивистских эффектов от Солнца. Остальными возмущающими воздействиями можно пренебречь без потери точности, поскольку их действие значительно меньше ошибок начальных данных и не оказывает существенного воздействия на орбитальную эволюцию исследуемых объектов.

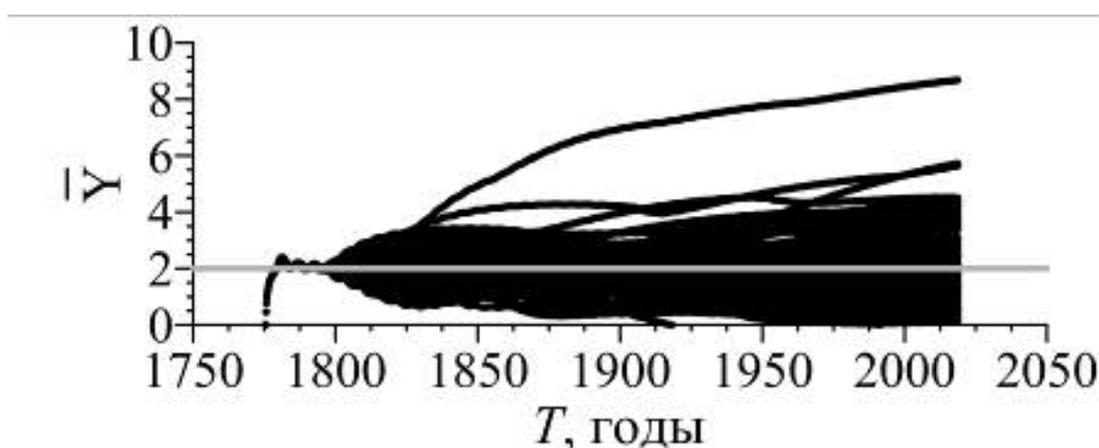


Рис. 1. Эволюция параметра MEGNO

Обратное интегрирование уравнений движения для потока метеороидов проводилось до 1750 года. Данная дата была выбрана исходя из предположения относительно молодого возраста центральной части потока метеороидов.

ритов Quadrantid [1]. Кроме того наши исследования хаотичности движения астероида (196256) 2003 EH1 [2] показали, что орбиту объекта можно считать регулярной вплоть до 1700 г.

Изучение кратковременной динамической эволюции ста выброшенных частиц показало, что в среднем чуть менее половины частиц выброса имеют хаотическое движение. На рис. 1 приведено изменение параметра МЕГНО для 100 частиц, выброшенных около 1780 года. Как видно из рисунка, чуть меньше чем половина исследуемых объектов параметр МЕГНО переходит через значение равное 2, что означает наличие хаотичности в движении.

Мы предполагаем, что причинами являются частые сближения частиц выброса с Юпитером. В частности те встречи, которые являются частыми и происходят не очень далеко от радиуса сферы Хилла планеты. Аналогичный вывод был получен в исследованиях системы N-тел Tancredi [4] и Goodman et al. [5]. Другая причина заключается в том, что нерезонансное состояние, близкое к орбитальным резонансам 2:1J, 1:3M и 1:9V, оказывает сильное влияние на движение метеорного потока Квадрантиды между 1760 и 2020 годами. Это «слабый хаос» в значительной степени ограничивается истинной аномалией. Следовательно, форма орбиты может быть надежно рассчитана для более длительных интервалов времени, чем само положение тела на орбите.

В заключение следует отметить, что хаотическое поведение моделируемых частиц метеорного потока может быть вызвано не только близкими сближениями с планетами, но также при наличии неустойчивых орбитальных и вековых резонансов.

Литература/References

1. *Abedin, A., Spurný, P.; Wiegert, P.; Pokorný, P.; Borovička, J.; Brown, P.* On the age and formation mechanism of the core of the Quadrantid meteoroid stream // *Icarus*. 2015. Vol. 261, Pp. 100–117.
2. *Galushina, T. Yu.; Sambarov, G. E.* The dynamical evolution and the force model for asteroid (196256) 2003 EH1 // *Planetary and Space Science*. 2017. Vol. 142. Pp. 38–47.
3. *Ryabova G. O.*, A preliminary numerical model of the Geminid meteoroid stream // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2016. Vol. 456. Pp. 78.
4. *Tancredi, G.*, Chaotic dynamics of planet-encountering bodies. // *Celest. Mech. Dynam. Astron.* 1998. Vol. 70. Pp. 181–200.
5. *Goodmann, J., Heggie, D. and Hut, P.* On the exponential instability of N-body systems // *Astrophys. J.* 1993. Vol. 415. Pp. 715–733.

ЭФФЕКТ И РЕЗОНАНС ЛИДОВА–КОЗАИ В ДИНАМИКЕ ОКОЛОЛУННЫХ ОБЪЕКТОВ

И.В. Томилова, Т.В. Бордовицына

Национальный исследовательский Томский государственный университет
irisha_tom@mail.ru

Ключевые слова: окололунные объекты, динамика, резонанс и эффект Лидова–Козаи.

Аннотация. Обсуждаются результаты обширного численного эксперимента по исследованию эффекта и резонанса Лидова–Козаи в динамике окололунных объектов. Представлен детальный анализ орбитальной эволюции 5180 модельных объектов, движущихся под действием притяжения Луны, рассматриваемой как материальная точка, возмущений от второй зональной гармоники селенопотенциала и притяжения Земли и Солнца. В качестве индикатора наличия эффекта Лидова–Козаи использована сохраняемость интеграла Лидова–Козаи. Показано, что наименьшие колебания интеграла наблюдаются у объектов с наклонениями орбит с от 80 до 100 градусов. Орбитальная эволюция объектов этой зоны очень наглядно демонстрирует перекачку энергии между эксцентриситетом и наклонением орбит. Интересно отметить, что в этой зоне окололунного пространства отсутствует острый резонанс Лидова–Козаи, но присутствует острый апсидально-нодальный вековой резонанс, который связывает частоты изменения долготы перицентра от узла и долготы восходящего узла.

LIDOV–KOSAI EFFECT AND RESONANCE IN DYNAMICS OF NEAR LUNAR OBJECTS

Irina V. Tomilova, Tatiana V. Bordovitsyna

National research Tomsk State University
irisha_tom@mail.ru

Keywords: near lunar objects, dynamics, resonance and Lidov–Kozai effect.

Abstract. The results of an extensive numerical experiment to study the effect and resonance of Lidov–Kozai in the dynamics of near-moon objects are discussed. A detailed analysis of the orbital evolution of 5180 model objects moving under the influence of the attraction of the Moon, considered as a material point, of perturbation from the second zonal harmonic of the selenium potential and the attraction of the Earth and the Sun is presented. The persistence of the Lidov–Kozai integral was used as an indicator of the presence of the Lidov – Kozai effect. It is shown that the smallest oscillations of the integral are observed for objects with orbital inclinations from 80 to 100 degrees. The orbital evolution of objects in this zone very clearly demonstrates the transfer of energy between the eccentricity and the inclination of the orbits. It is interesting to note that there is no sharp Lidov–Kozai resonance in this near-moon space zone, but there is a sharp apsidal-nodal secular resonance which connects the frequencies of change of pericenter longitude from the node and the longitude of the ascending node.

Влияние эффекта и векового резонанса Лидова–Козаи на орбитальную эволюцию космических объектов в настоящее время очень активно обсуждается специалистами по небесной механике [1, 2, 3, 4].

Как известно, это влияние сводится, прежде всего, к возрастанию эксцентриситета орбиты объекта и перекачке энергии между эксцентриситетом и наклоном вследствие сохранения интеграла Лидова–Козаи $\sqrt{1-e^2} \cos i = \text{const}$, где e – эксцентриситет, а i – наклонение орбиты спутника к экватору центрального тела.

В данной работе представлен детальный анализ влияния эффекта и векового резонанса Лидова–Козаи на орбитальную эволюцию модельных окололунных объектов. Рассмотрена орбитальная эволюция 5180 модельных объектов, движущихся под действием притяжения Луны, рассматриваемой как материальная точка, возмущений от второй зональной гармоники селенопотенциала и притяжения Земли и Солнца на интервале времени 10 лет. Ограничения по столкновению с центральным телом не вводились. В качестве индикатора наличия эффекта Лидова–Козаи использована сохраняемость интеграла Лидова–Козаи.

Показано, что эффект, также как и вековой резонанс Лидова–Козаи, в разных областях окололунного пространства проявляют себя по-разному.

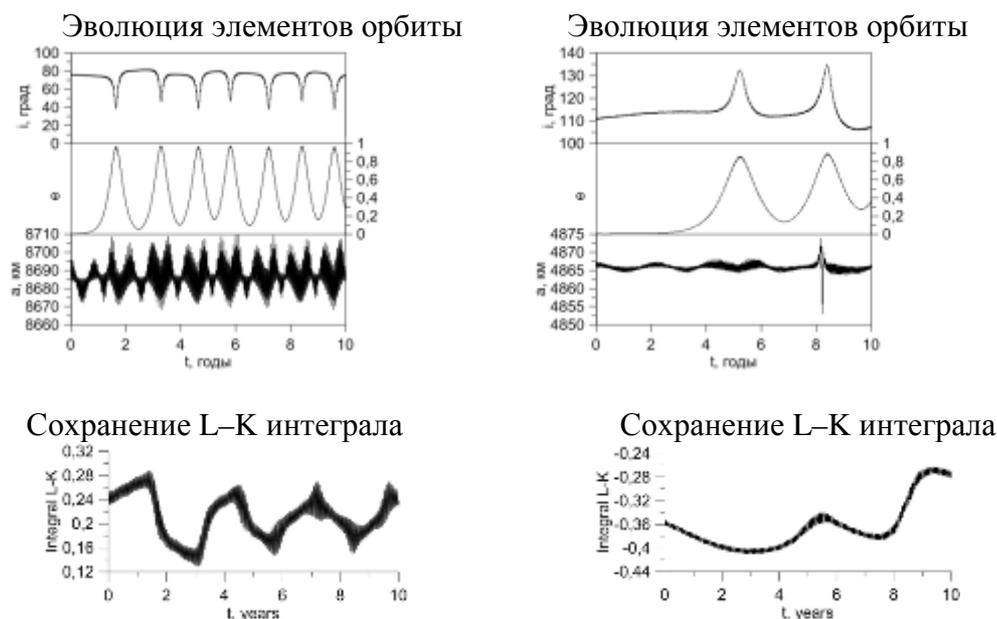


Рис. 1. Эволюция элементов орбит и сохранение интеграла Лидова–Козаи (L–K) для приполярных объектов

На низких орбитах с большими полуосями до 2500 км эффект практически не наблюдается, а резонанс проявляет себя очень слабо. Начиная с 2500 и до 3500 км по большой полуоси и в диапазонах наклонений от 60 до 70 градусов и от 110 до 120 градусов и резонанс, и эффект начинают проявляться.

Для больших полуосей 3500 км и выше резонанс Лидова–Козаи действует в диапазоне наклонений от 50 до 65 градусов и от 120 до 125, а в диапазоне от 65 до 120 градусов активно проявляет себя эффект Лидова–Козаи. Наименьшие колебания интеграла наблюдаются у объектов с наклонениями орбит от 80 до 100 градусов. Орбитальная эволюция объектов этой зоны очень наглядно демонстрирует перекачку энергии между эксцентриситетом и наклоном орбит (см. рис. 1)

Интересно отметить, что в этой зоне окололунного пространства отсутствует острый резонанс Лидова–Козаи, но присутствует острый апсидально-нодальный вековой резонанс, который связывает частоты изменения долготы перицентра от узла и долготы восходящего узла.

Данное научное исследование выполнено при поддержке Программы повышения конкурентоспособности ТГУ.

Литература

1. *Shevchenko I.I.* The Lidov–Kozai Effect – Applications in Exoplanet Research and Dynamical Astronomy. Springer. 2016. 194 p.
2. *Naoz S.* The Eccentric Kozai–Lidov Effect and Its Applications // Annu. Rev. in Astronomy & Astrophysics 2016. AA: Pp. 1–59.
3. *Александрова А.Г., Бордовицына Т.В., Томилова И.В.* Резонанс Лидова–Козаи и его влияние на орбитальную эволюцию околоземных космических объектов // М.Л. Лидов – яркое имя в космической науке: сб. докладов / под ред. М.А. Вашковьяка. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша. 2016. С. 49–66.
4. *Холшевников К.В., Соколов Л.Л.* Эффект Лидова–Козаи и его роль в астрономии // М.Л. Лидов – яркое имя в космической науке: сб. докладов / под ред. М.А. Вашковьяка. М.: ИПМ им. М.В.Келдыша. 2016. С. 39–48.

References

1. *Shevchenko I.I.* The Lidov–Kozai Effect – Applications in Exoplanet Research and Dynamical Astronomy. *Springer*. 2016. 194 p.
2. *Naoz S.* The Eccentric Kozai–Lidov Effect and Its Applications // Annu. Rev. in Astronomy & Astrophysics 2016. AA: Pp. 1–59
3. *Aleksandrova, A. G.; Bordovitsyna, T. V.; Tomilova, I. V.* Lidov–Kozai resonance and it’s influence on orbital evolution of near Earth space objects // in M.L. Lidov – bright name in space science. Collection of reports / edited by M.A. Vashkovyak. M: IAM im. M.V. Keldysh. 2016. Pp. 49–66.
4. *Kholshchevnikov K. V., Sokolov L.L.* Lidov–Kozai effect and it’s role in astronomy // in M.L. Lidov – bright name in space science. Collection of reports / edited by M.A. Vashkovyak/ M.: IAM im. M.V. Keldysh. 2016. Pp. 39–48.

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ СТОЛКНОВЕНИЯ ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

И.Н. Чувашов

Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия
chuvashovin@gmail.com

Ключевые слова: космический мусор, отношение площади к массе, тесные сближения объектов космического мусора.

Аннотация. На текущий момент проблема столкновения космических аппаратов с объектами космического мусора становится все более актуальной. По данным Командования воздушно-космической обороны Северной Америки (NORAD) в околоземном пространстве находится 17512 действующих спутников и объектов космического мусора, большая часть из которых – на низких орбитах. На низких орбитах происходит постоянный мониторинг и отслеживание миграций объектов космического мусора, так как в этой зоне находится Международная космическая станция (МКС). Это приводит к тому, что в реальном времени отслеживается вся группировка низкоорбитальных объектов и оценивается вероятность столкновения этих объектов между собой. В работе рассматривается вероятность столкновения объектов космического мусора между собой и с действующими космическими аппаратами.

EVALUATION OF THE PROBABILITY OF COLLISION OF SPACE DEBRIS OBJECTS

Ivan Chuvashov

The Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow,
Russian Federation
chuvashovin@gmail.com

Keywords: space debris, area-to-mass ratio, close encounters of space debris.

Abstract. Currently, the problem of collision of spacecraft with objects of space debris is becoming very urgent. According to the North American Aerospace Defense Command (NORAD), 17,512 operating satellites and space debris are located in near-Earth space, most of which are in low orbits. In low orbits, there is constant monitoring and tracking of migrations of space debris objects, since the International Space Station (ISS) is located in this zone. This leads to the fact that in real time the whole grouping of low-orbit objects is tracked and the probability of collision of these objects among themselves is estimated.

The paper considers the probability of collision of space debris objects with each other and with operating spacecraft.

Исследование динамической эволюции всех неуправляемых объектов космического пространства является актуальной задачей, так как позволяет определить вероятность столкновения объектов между собой. Для прове-

дения исследования были выбраны объекты из каталога NORAD на 1 июня 2018 г., перигей которых был больше 1500 км.

Известно, что для прогнозирования движения реальных объектов, как показано в работах [3, 4], должно осуществляться не в виде номинальных орбит, а в виде областей возможных движений объектов. Построение областей непосредственно связано с точностью определения начальных параметров движения по данным измерений и несет информацию о реальности наших знаний об орбитальном движении. Для исследования вероятности столкновения околоземных объектов между собой, вначале находятся орбиты объектов, имеющие тесные сближения, затем рассматриваются доверительные области движения этих объектов и прослеживается эволюция орбитальных параметров до момента тесного сближения.

В основу моделирования динамики совокупности объектов геостационарной зоны была положена «Численная модель движения ИСЗ», разработанная в НИИ ПММ ТГУ.

В процессе интегрирования учитывались возмущения от гармоник геопотенциала 15 порядка, притяжение Луны и Солнца, приливы в теле Земли и световое давление.

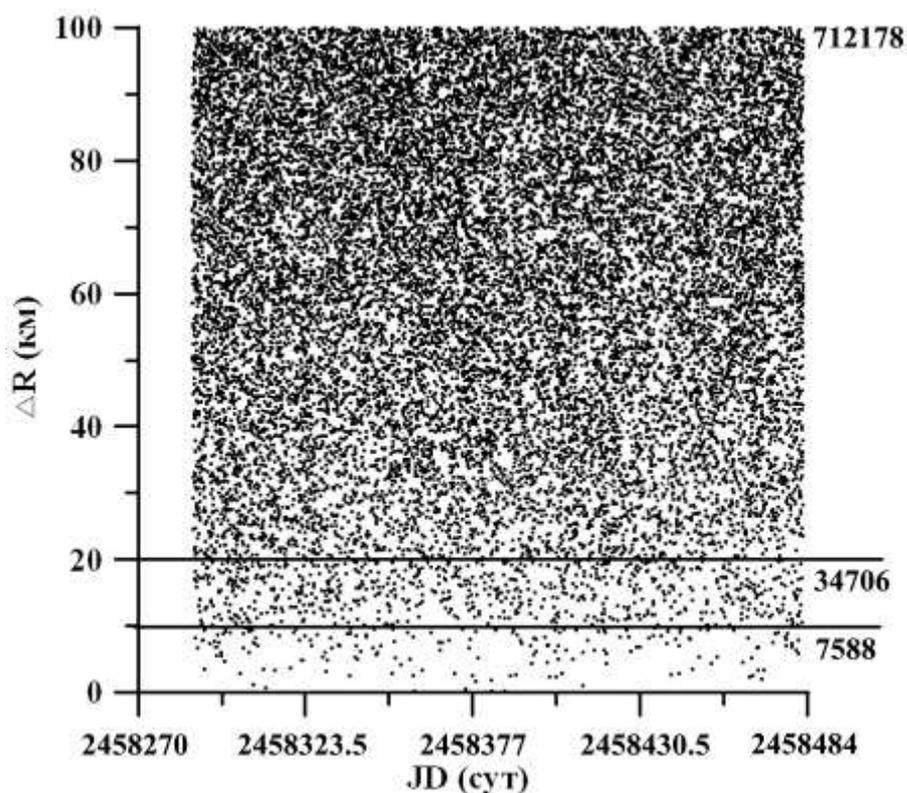


Рис. 1. Тесные сближения объектов околоземного пространства

Для оценки сближения околоземных объектов между собой был выполнен прогноз движения на интервале времени 6 месяцев. На каждом шаге интегрирования выполнялось определение взаимных расстояний между

всеми рассматриваемыми объектами. Все выявленные сближения на расстоянии менее 100 км, их оказалось 712178, приведены на рис. 1. Необходимо отметить, что произошло 34706 сближений на расстояние менее 20 км и 7588 на расстояние менее 10 км, что считается крайне опасным. Причем следует заметить, что данные объекты неоднократно имели тесные сближения. На рис. 1 для иллюстрации представлены не все сближения, а только каждое 30 сближение.

В случае сближений менее 1 км нами были построены доверительные области для сближающихся объектов и прослежена их динамическая эволюция до момента наиболее тесного сближения.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (МК-6640.2018.2).

Литература

1. *Früh C., Kelecy T., Jah M.* Coupled Orbit-Attitude Dynamics of High Area-to-Mass Ratio (HAMR) Objects: Influence of Solar Radiation Pressure, Earth's Shadow and the Visibility in Light Curves // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2013. Vol. 117, Issue 4. Pp. 385–404.
2. *Авдюшев В.А.* Численное моделирование орбит. Томск: Изд-во НТЛ, 2010. 282 с.
3. *Bordovitsyna T., Avdyushev V., Chernitsov A.* New Trends in Numerical Simulation of the Motion of Small Bodies of the Solar System // *Celest. Mech.* 2001. Vol. 80. Is. 3. Pp. 227–247.
4. *Milani A., La Spina A., Sansaturio M.E. and Chesley S.R.* The Asteroid Identification Problem. III. Proposing identifications // *Icarus*. 2000. Vol. 144. pp. 39–53.

References

1. *Früh C., Kelecy T., Jah M.* Coupled Orbit-Attitude Dynamics of High Area-to-Mass Ratio (HAMR) Objects: Influence of Solar Radiation Pressure, Earth's Shadow and the Visibility in Light Curves // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2013. Vol. 117, Issue 4. Pp. 385–404.
2. *Avdyushev V.A.* Numerical Orbit Simulation. Tomsk: STL, 2010. 282 p.
3. *Bordovitsyna T., Avdyushev V., Chernitsov A.* New Trends in Numerical Simulation of the Motion of Small Bodies of the Solar System // *Celest. Mech.* 2001. Vol. 80. I. 3. Pp. 227–247.
4. *Milani A., La Spina A., Sansaturio M.E. and Chesley S.R.* The Asteroid Identification Problem. III. Proposing identifications // *Icarus*. 2000. Vol. 144. pp. 39–53.

Секция 5

Математическое и физическое моделирование технических и природных систем

Председатель
К.ф.-м.н., Маслов Е.А.

Нейронная сеть,
Реология нефтепродуктов,
Тепломассоперенос,
Фракталы,
Термическое разложение,
Испарение,
Природные материалы.
Инородные включения

Session 5

Mathematical and physical modeling of technical and natural systems

Chair
Ph.D., Maslov E.A.

Neural network,
Rheology of petroleum products
Heat and mass transfer,
Fractals,
Thermal decomposition,
Evaporation,
Natural materials.
Foreign inclusions

ПРИМЕНЕНИЕ ВИБРОСТРУЙНОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ СОХРАНЕНИЯ ТЕКУЧЕСТИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ И НЕФТЕПРОДУКТОВ В УСЛОВИЯХ СИБИРИ И АРКТИКИ

С.В. Рикконен, А.В. Азин, С.В. Пономарев

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
antonazin@niipmm.tsu.ru

Ключевые слова: Арктика, топливо, низкие температуры, реология нефтепродуктов, физические воздействия.

Аннотация. В условиях низких температур высоких широт Сибири и Арктики имеются проблемы с запуском энергетических установок, работающих на углеводородном топливе и маслах. Применяемые термические и химические методы сохранения текучести топлива, масла и охлаждающей жидкости не дают 100% гарантии в оперативной подготовке к работе автономных объектов. Для повышения тактико-технических характеристик стационарных и подвижных автономных объектов предлагается использовать принцип виброструйного гидродинамического сохранения текучести углеводородных топлив и масел.

APPLICATION OF VIBRO-JET HYDRODYNAMIC TECHNOLOGY TO PRESERVE THE FLUIDITY OF HYDROCARBON FUELS AND PETROLEUM PRODUCTS IN SIBERIA AND THE ARCTIC

S.V. Rikkonen, A.V. Azin, S.V. Ponomarev

National research Tomsk State University, Russian Federation
antonazin@niipmm.tsu.ru

Keywords: Arctic, fuel, low temperatures, the rheology of petroleum products, physical effects.

Abstract. At low temperatures, the high latitudes of the Arctic and Siberia there are problems run power plants operating on hydrocarbon fuels and oils. Thermal and chemical methods used to preserve the fluidity of fuel, oil and coolant do not provide a 100 % guarantee in the operational preparation for the operation of autonomous objects. To improve the tactical and technical characteristics of stationary and mobile autonomous objects, it is proposed to use the principle of vibratory jet hydrodynamic preservation of fluidity of hydrocarbon fuels and oils.

В настоящее время существуют научные разработки с применением нетрадиционных методов активации нефти, нефтепродуктов, нефтяных остатков и донных отложений. Любое изменение реологических и физико-химических свойств нефтяных дисперсных систем (НДС) является следствием передачи в систему энергии посредством теплового, механическо-

го, электронного, электромагнитного, акустического, кавитационного, радиационного или химического воздействия. Эволюция структурного и химического состояний, устойчивости НДС зависит от вида воздействия, устройства, посредством которого передается энергия, от времени передачи энергии и от количества энергии, сообщенной среде. Применение таких видов физических воздействий создает условия для достижения предельного уровня разрушения надмолекулярной структуры, фракционного и группового состава углеводородов и поддержания этого состояния в течение времени, необходимого для осуществления транспорта, массообменных процессов, сжигания и переработки нефти, особенно в условиях Арктики.

Острой проблемой является сохранение текучести углеводородного топлива и масел в условиях низких температур, температур существенно ниже температуры застывания продукта. Основным методом, распространенным во всем мире, является термический способ сохранения текучести топлив. Этот способ очень энергозатратен из-за низкой теплопроводности и высокой теплоёмкости нефтепродуктов. При повторном нагреве реологические свойства топлива ухудшаются из-за испарения легких фракций, чтобы достичь первоначальных реологических свойств, необходимо нагревать топливо на более высокую температуру [1–3].

Для повышения тактико-технических характеристик стационарных и подвижных автономных объектов, работающих в условиях высоких широт, предлагается использовать принцип виброструйного гидродинамического сохранения текучести углеводородных топлив и масел [4].

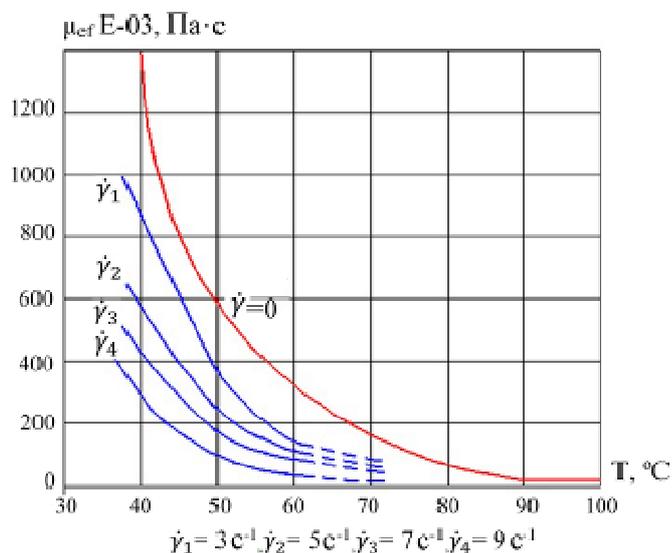


Рис. 1. Изменение эффективной вязкости μ_{ef} мазута марки М-100 в зависимости от температуры T при разных сдвиговых скоростях среды $\dot{\gamma}$

На рис. 1 показано, что требуемую эффективную вязкость μ_{ef} мазута можно получить не только воздействием температуры, но и определенными

ми сдвиговыми скоростями среды, при значительно меньших энергетических затратах.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что этот принцип позволяет:

- за счет высоких сдвиговых скоростей сплошной среды разрушать надмолекулярную структуру нефтепродуктов, тем самым сохранять текучесть при температуре намного ниже температуры застывания продукта;
- за счет потерь на трение при высоких сдвиговых скоростях производить нагрев нефтепродукта;
- нагрев нефтепродукта происходит изнутри массы сплошной среды, что существенно снижает испарение легких фракций;
- нагрев топлива происходит в 3–4 раза быстрее, чем при термическом нагреве;
- существенно сокращаются затраты энергии на нагрев по сравнению с термическим методом.

Пилотные испытания данной технологии показали высокую эффективность метода:

- стоимость подготовки мазута к сжиганию в мазутных котельных снизилась в 30 раз;
- температура застывания высокопарафинистой нефти снизилась с +14 до –35 °С.

В настоящее время отсутствует полное понимание физических процессов, происходящих при виброструйной гидродинамической обработки углеводородных топлив и нефтепродуктов. Не ясна степень разрушения надмолекулярной структуры за счет сдвиговых скоростей и степень разрушения за счет нагрева сплошной среды.

Для определения энергетических параметров и конструкции устройства воздействия требуется разработка математической модели процесса разрушения надмолекулярной структуры за счет вибрационных гидродинамических процессов в сплошной среде. Это задача для дальнейших исследований.

Ожидаемые результаты позволят:

- на основе математической модели разработать конструкции виброструйных гидродинамических устройств с более совершенными энергетическими параметрами;
- увеличить оперативность подвижных автономных объектов, увеличится КПД энергетических установок;
- оперативно, в автоматическом режиме, регулировать реологические свойства топлива, вязкость и температуру;
- существенно снизить расход топлива на нагрев;
- снизить испарение легких фракций топлива, тем самым увеличив скрытность подвижных автономных объектов.

Литература

1. *Ткачев О.А., Тугунов П.И.* Сокращение потерь нефти при транспорте и хранении. М.: Недра, 1988 г. 116 с.
2. *Шахворостов А.В., Кудайбергенов С.Е.* Разработка полимерных депрессорных присадок для транспортировки высокопарафинистых нефтей // Материалы конференции VII-й Всероссийской научно-практической конференции. «Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа». 2016, Томск. С. 325–329.
3. *Лоскутова Ю.В., Астурян Д.Э., Литвинец И.В.* Влияние депрессорных присадок на агрегативную устойчивость высокопарафинистой нефти: Материалы конференции VII-й Всероссийской научно-практической конференции. «Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа». 2016, Томск. С. 333–335.
4. *Azin A.V., Bogdanov E.P., Ponomarev S.V., Rikkonen S.V.* Calculation of energy parameters of submerged vibrating confuser of an electromagnetic vibrator // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. 2017. № 328(5). pp. 16–23.

References

1. *Tkachev O.A., Tuginov P.I.* Reducing oil loss during transport and storage. M.: Nedra, 1988. 116 p. (rus)
2. *Shahvorostov A.V., Kudajbergenov S.E.* Development of polymeric depressant additives for the transportation of high paraffin oils: Materials of the VIIth All-Russian Scientific and Practical Conference. "Production, preparation, transportation of oil and gas". 2016, Tomsk. Pp. 325–329. (rus)
3. *Loskutova YU.V., Asturyan D.EH., Litvinec I.V.* Influence of depressor additives on aggregative stability of high paraffin oil: Materials of the VIIth All-Russian Scientific and Practical Conference. "Production, preparation, transportation of oil and gas". 2016, Tomsk. Pp. 333–335. (rus)
4. *Azin A.V., Bogdanov E.P., Ponomarev S.V., Rikkonen S.V.* Calculation of energy parameters of submerged vibrating confuser of an electromagnetic vibrator // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. 2017. No. 328(5). pp. 16–23.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МИКРОВЗРЫВА ПАДАЮЩИХ ДВУХЖИДКОСТНЫХ КАПЕЛЬ ПРИ ИНТЕНСИВНОМ НАГРЕВЕ

Д.В. Антонов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия
antonovdv132@gmail.com

Ключевые слова: двухжидкостные капли, микровзрыв, диспергирование, без держателей, радиационный и конвективный нагрев.

Аннотация. В настоящей работе основное внимание уделено изучению процессов диспергирования и микровзрыва без влияния держателей. Эксперименты проведены с каплями, формирующимися из горючего и негорючего компонента с существенно отличающимися температурами кипения, вспышки и воспламенения. Спрогнозированы

условия возможного существенного повышения эффективности технологий зажигания капель топлива в камерах сгорания двигателей, топках паровых и водогрейных котлов, печей и других промышленных установок за счет эффектов взрывного измельчения двухжидкостных капель.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF MICROEXPLOSION OF FALLING TWO-FLUID DROPS AT INTENSIVE HEATING

Dmitry Antonov

National research Tomsk Polytechnic University, Russian Federation
antonovdv132@gmail.com

Keywords: two-fluid drops, microexplosion, puffing; without holder, radiative and convective heating.

Abstract. This paper pays main attention to the study of puffing and micro-explosion without the influence of holders. The experiments were carried out with drops, formed from combustible and non-combustible components with significantly different boiling, flash and ignition temperatures. The conditions for a substantial increase in the efficiency of heating and ignition of fuel drops in the combustion chambers of engines, burners of steam and hot water boilers, furnaces and other industrial plants due to explosive breakup have been established.

Для совершенствования существующих и создания принципиально новых технологий зажигания капель топлив в камерах сгорания двигателей, топках паровых и водогрейных котлов, печей и других промышленных установок необходимы знания физики процессов, протекающих при движении капель водных растворов, суспензий и эмульсий через высокотемпературные (более 500 К) газы (воздух, продукты сгорания топлив). К сожалению, до настоящего времени общая теория процессов тепломассопереноса и фазовых превращений для таких условий не разработана. Однако в последние годы получены экспериментальные результаты, являющиеся определенными предпосылками для создания такой теории [1].

Эффект взрывного дробления капель эмульсий и суспензий при нагреве в газовой среде исследован экспериментально [2, 3]. Определены пороговые значения температуры возникновения этого эффекта для группы твердых и жидких органических примесей. Выявлено, что в результате взрывной фрагментации неоднородных капель площадь поверхности испарения увеличивается в 15 раз. Важно расширить экспериментальную базу данных о характеристиках испарения типичных составов жидких топлив для повышения эффективности технологий зажигания.

Наиболее широко применяемым подходом к изучению условий и характеристик процесса измельчения вскипающих капель жидкостей, эмульсий, растворов и суспензий является их помещение в разогретый газовый поток на держателе [2, 3]. Представляет интерес изучение данных условий без

применения держателей. Это позволит определить различия во временах распада при использовании держателей и их отсутствии, а также приблизиться к реальным условиям, соответствующим технологиям зажигания капель топлив.

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование процессов микровзрыва двухжидкостных капель без использования держателей, т.е. в режиме свободного падения.

При исследовании процессов микровзрыва двухкомпонентных капель без использования держателя в качестве нагревательной системы была использована муфельная печь (диапазон температур 20–1200 °С). Температура печи фиксировалась с помощью системы, состоящей из комплекса сбора данных National Instruments и малоинерционных термопар. Муфельная печь находилась в вертикальном положении. Процесс фрагментации капель регистрировался с помощью высокоскоростной видеокамеры (частота съемки до 10^5 кадров в сек). Обработка видеок кадров осуществлялась с использованием программного обеспечения Phantom Camera Control.

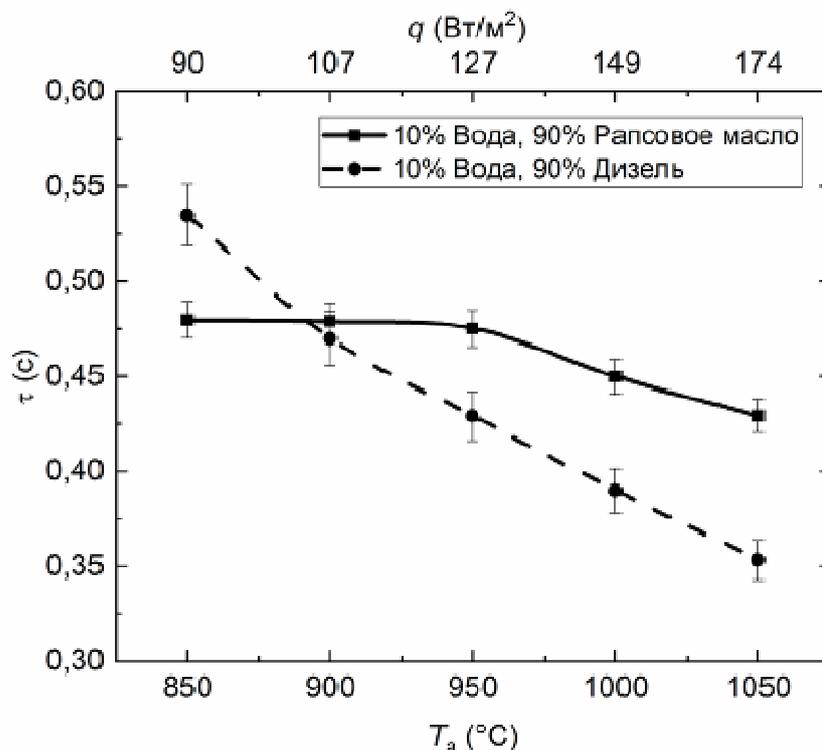


Рис. 1. Времена задержки микровзрыва при радиационном нагреве падающих двухжидкостных капель (без держателя) ($R_d=0,842$ мм)

В результате проведенных экспериментальных исследований была получена зависимость времён распада от температуры газовой среды для двух составов: 1–10% вода, 90% рапсовое масло, 2–10% вода, 90% дизель (рис. 1). Основной закономерностью, выявленной в ходе проведения экспериментов по варьированию температуры, являлось то, что с увеличени-

ем температуры газовой среды времена распада уменьшались в 1.3–1.5 раза. Это, в первую очередь, связано с тем, что при увеличении температуры возрастает тепловой поток, подводимый к капле, в 1.9–3.8 раза.

Впервые получены результаты экспериментальных исследований по определению времен распада падающих двухкомпонентных капель. Получены зависимости по временам распада при варьировании температуры газовой среды. С применением экспериментальных данных, представленных в настоящей работе, можно выполнять прогнозирование потенциальной эффективности измельчения двухкомпонентных капель и эмульсий в реальных технологиях зажигания.

Исследования выполнены за счет средств Российского научного фонда (проект 18-71-10002).

Литература

1. Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Летро Ж.К., Стрижак П.А. Экспериментальное исследование последовательных капель воды, падающих через высокотемпературную газовую среду // Международный журнал тепломассопереноса. 2016. Т. 95. С. 184–197. (eng)
2. Ватанабе Х., Харада Т., Мацусита Я., Аоки Х., Миура Т. Характеристики диспергирования эмульгированного топлива // Международный журнал тепломассопереноса. 2009. Т. 52. С. 3676–3684. (eng)
3. Сузуки Я., Харада Т., Ватанабе Х., Шоджи М., Мацусита Я., Аоки Х., Миура Т. Визуализация процесса агрегации дисперсных капель воды и влияние агрегации на вторичное распыление капель эмульгированного топлива // Труды института горения. 2011. Т. 33. С. 2063–2070. (eng)

References

1. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Legros J.C., Strizhak P.A. Experimental investigation of consecutive water droplets falling down through high-temperature gas zone. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 95. Pp. 184–197. (eng)
2. Watanabe H., Harada T., Matsushita Y., Aoki H., Miura T. The characteristics of puffing of the carbonated emulsified fuel. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2009. Vol. 52. Pp. 3676–3684. (eng)
3. Suzuki Y., Harada T., Watanabe H., Shoji M., Matsushita Y., Aoki H., Miura T. Visualization of aggregation process of dispersed water droplets and the effect of aggregation on secondary atomization of emulsified fuel droplets. Proceedings of the Combustion Institute. 2011. Vol. 33. Pp. 2063–2070. (eng)

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И НЕУПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ В ЗОНАХ КОЛЛИЗИИ В РАЙОНЕ ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА

А.Ж. Ахметов^{1,2}, И.Ю. Смолин^{1,2}, П.В. Макаров^{1,2}

¹Национальный исследовательский
Томский государственный университет, Россия
²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия
ayan.akhmetov93@gmail.com

Ключевые слова: зона коллизии, геологический разрез, глубинное сейсмическое зондирование, неупругая деформация.

Аннотация. На основе опубликованных работ выявлены зоны разломов и коллизии в регионе Енисейского кряжа. Используя данные глубинного сейсмического зондирования, создана компьютерная модель геологического разреза Енисейского кряжа по геологическому профилю «Батолит». Компьютерная модель включает структурную карту геологического разреза и физико-механические свойства структурных составляющих. Смоделированы равновесные состояния полей напряжений и деформаций в изучаемом объекте под действием силы тяжести и коллизионных процессов. Выявлено, что полосы неупругой деформации зарождаются в зонах разлома и далее распространяются вглубь горного массива. Показано, что на распределение напряжений влияют не только неоднородности структуры и кривизна границ раздела, но и образующиеся полосы локализации неупругих деформаций.

THE NUMERICAL INVESTIGATION OF THE STRESSES AND NON-ELASTIC STRAINS IN THE COLLISION ZONES IN THE YENISEI RIDGE

Ayan Zh. Akhmetov^{1,2}, Igor Yu. Smolin^{1,2}, Pavel V. Makarov^{1,2}

¹National research Tomsk State University, Russian Federation
²Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Russian Federation
ayan.akhmetov93@gmail.com

Keywords: collision zone, geologic cross-section, deep seismic sounding, non-elastic strain.

Abstract. Using published papers works the zones of faults and collisions are defined in the region of the Yenisei Ridge. It was created a computer model of geologic cross-section of the Yenisei Ridge across the geological profile “Batolit” using the deep seismic sounding. The computer model includes the subsurface contour map of geologic cross-section and physical and mechanical properties of the constituents. The equilibrium states of stresses and strains were modeled due to the action of gravity and collision’s processes in the researched object. It is found that the bands of non-elastic strain originate in the fault zones and extend deep into rock massif. It is shown that not only structure heterogeneity and the interface curvature affect the stress distributions but also the non-elastic strain localization bands. The dis-

tribution of stress's field is varied in terms of ratio of heterogeneous of structures and flection of rock banding.

Геотектоническая эволюция земной коры и литосферы на современном уровне с успехом может быть объяснена с использованием моделирования ввиду недоступности глубинных частей Земли. Математическое и натурное моделирование применяется для объяснения ведущих геодинамических процессов – конвекции в мантии, плюмов, интрузии магмы, движения и коллизии плит, субдукции и др. Большой интерес вызывают также магматические явления, играющие важную роль в эволюции верхних оболочек Земли и образовании месторождений полезных ископаемых. Особый интерес вызывают конкретные области Земной коры для поиска и анализа процессов возникновения различных полезных ископаемых. С этой точки зрения Енисейский кряж является интересным объектом для исследования. Он представляет собой покровно-складчатый пояс с коллизионно-аккреционной структурой преимущественно северо-западно-юго-восточного простирания, расположенный на юго-западном обрамлении Сибирской платформы [1].

Для формирования структурно-физической модели были использованы данные глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) по профилю «Батолит», характеризующие глубинную структуру Енисейского кряжа. Получение этих данных являлось частью грандиозной работы в рамках «Комплексной программы глубинного изучения земных недр», проведенной на территории СССР за период 1972–1995 гг. [2]. Физико-механические свойства слоёв земной коры получены на основе данных ГСЗ профиля «Батолит» и статей [3, 4, 5].

Цель данной работы – исследование напряженно-деформированного состояния Енисейского кряжа вдоль профиля «Батолит–1982» с помощью компьютерного моделирования.

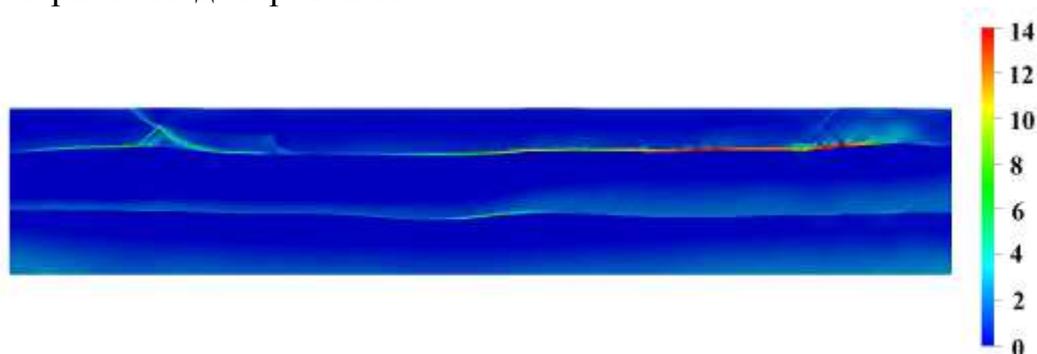


Рис. 1. Накопление неупругой деформации в районе Енисейского кряжа вдоль геологического профиля «Батолит–1982»

Ввиду неоднородной структуры северной части Енисейского кряжа вдоль выбранного геологического разреза, в зонах тектонических разломов происходят геотектонические процессы, такие как коллизия и сдвиги. Это

связано с движением крупных литосферных плит, которые влияют на движение земных блоков Енисейского кряжа. В данной работе численно проанализированы различия в напряженно-деформированном состоянии в зонах Енисейского кряжа, подверженных процессам коллизии. Выявлено, что основными концентраторами напряжения и локализации неупругой деформации являются зоны разломов. Ввиду неоднородных свойств горных пород, твердые породы являются более устойчивыми по сравнению с породами, имеющими ослабленные физико-механические свойства. Поэтому слоистость строения также оказывает влияние на распределение напряжений и деформаций.

Данная работа была выполнена в рамках проекта «Численное моделирование плавления в земной коре и литосфере при растяжении и коллизии (на примере Сибирской платформы и её обрамления)» Комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования» на 2018–2020 гг.

Литература

1. Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С. Коллизионные метаморфические комплексы Енисейского кряжа: особенности эволюции, возрастные рубежи и скорость эксгумации // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, №10. С. 1493–1611.
2. Кольская сверхглубокая / Е.А. Козловский [и др.]. М.: Недра, 1984. 490 с.
3. Гольдин С.В., Суворов В.Д., Макаров П.В., Стефанов Ю.П. Структура и напряженно-деформированное состояние Байкальской рифтовой зоны в модели гравитационной неустойчивости // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, №10. С. 1094–1105.
4. Buck W.R. Modes of continental lithospheric extension // Jour. of Geophys. Research. 1991. Vol. 96. Pp. 20161–20178.
5. Burov E.B. Rheology and strength of the lithosphere // Marine and Petroleum Geology. 2011. Vol. 28. Pp. 1402–1443.

References

1. Likhonov I.I., Reverdatto V.V., Kozlov P.C. Collision-related metamorphic complexes of the Yenisei Ridge: their evolution, ages, and exhumation rate // Russian Geology and Geophysics. 2011. Vol. 47, №10. Pp. 1493–1611.
2. Kozlovsky Ye.A. The Superdeep Well of the Kola Peninsula. Berlin: Springer Verlag, 1987. 558 p.
3. Gol'din S.V., Suvorov V.D., Makarov P.V., Stefanov Yu.P. Structures and stress-strain state of the Baikal rift zone in the model of gravitational instability // Russian Geology and Geophysics. 2006. Vol. 47, №10. Pp. 1094–1105.
4. Buck W.R. Modes of continental lithospheric extension // Jour. of Geophys. Research. 1991. Vol. 96. Pp. 20161–20178.
5. Burov E.B. Rheology and strength of the lithosphere // Marine and Petroleum Geology. 2011. Vol. 28. Pp. 1402–1443.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ГРАНУЛИРОВАННОГО ПОЛИЭТИЛЕНА ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ

С.С. Боровиков, А.С. Разва

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия
pouls_1994@mail.ru

Ключевые слова: ПЭВД, центробежный сепаратор, гранулы, очистка.

Аннотация. В статье представлено новое техническое решение для эффективной очистки гранулированного полиэтилена от технологических примесей. Для очищения ПЭВД предлагается устройство под названием установка комплексной очистки. С целью повышения эффективности очистки материала, проводился ряд экспериментов с корректированием подачи воздуха в дополнительных патрубках и регулированием внутренних составных частей сепаратора. Настройка параметров проводилась до тех пор, пока результаты эксперимента станут наилучшими. Найдена оптимальная компоновка аппарата комплексной очистки, при которой достигнут наилучший результат очистки гранул от технологических примесей. Установка может быть применена в промышленности. Сконструированное техническое решение улучшает экологическую обстановку и повышает качество товарного продукта.

IMPROVEMENT OF A GRANULATED POLYETHYLENE CLEANING SYSTEM FROM TECHNOLOGICAL IMPURITIES

S.S. Borovikov, A.S. Razva

National Research Tomsk Polytechnic University, Russia
pouls_1994@mail.ru

Keywords: LDPE, centrifugal separator, granules, cleaning up.

Abstract. The article presents a new technical solution for the effective cleaning of granulated polyethylene from technological impurities. For the purification of LDPE, a device called a complex cleaning unit is proposed. In order to improve the efficiency of cleaning the material, a series of experiments were carried out with adjusting the air supply in the additional pipes and regulating the internal components of the separator. The adjustment of the parameters was carried out until the experimental results were the best. The optimal layout of the complex cleaning apparatus was found, at which the best result of cleaning the granules from technological impurities was achieved. Installation can be applied in the industry. The designed technical solution improves the environmental situation and improves the quality of the commercial product.

Методами снижения загрязнения является совершенствование в соответствующем направлении основных технологических процессов, внедрение и создание новых установок пылеочистки [1].

Наиболее широкое распространение получили методы сепарации зерновых и гранулированных материалов, основанные на силовом взаимодействии газового потока и частиц [2, 3].

Целью работы являлось разработка предложений по повышению эффективности очистки гранул. Основной задачей была модернизация экспериментальной установки.

Эксперименты проводились на стенде, схема компоновки которого представлена на рис. 1 [4]. Путем изменения условий движения потока по криволинейному каналу и регулировки положений его внутренних частей был достигнут наилучший результат очистки гранул от технологических примесей.

Установка имеет три ступени: первая – центробежный сепаратор [5], вторая – вихревая камера [6], третья – фильтр.

Эксперименты проводились на установке, изображенной на рис. 1.

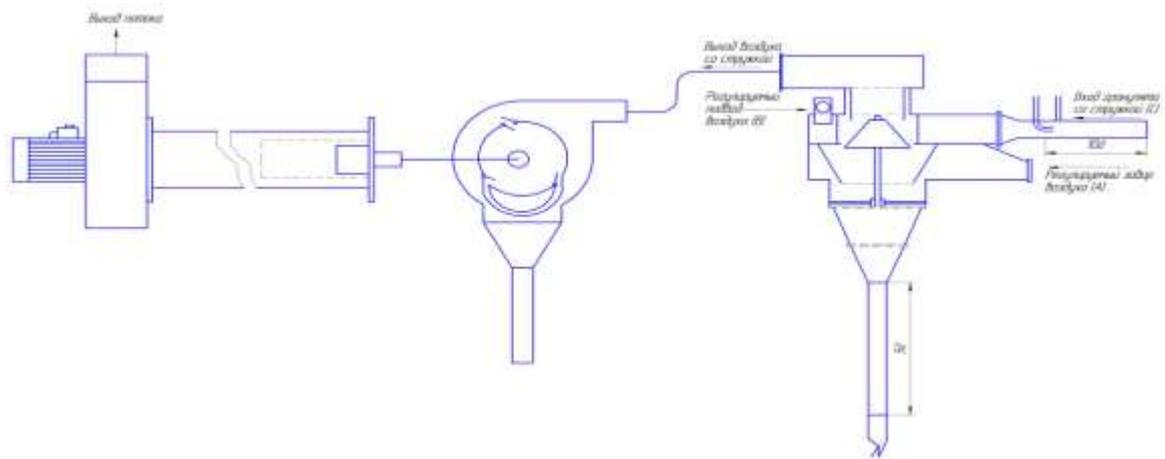


Рис. 1. Схема экспериментального устройства комплексной очистки

Таблица 1. Результаты проведения эксперимента в следующей вариации: конус в верхнем положении, шторка под углом 40° к входному потоку, воздуходувка подключена

Откр. Задвижки (вход А), %	Уровень открытия воздуходувки (вход В), %	Общая масса гранулята $M_{гр.об.}$, г	Общая масса стружки $M_{стр.об.}$, г	Масса гранулята $m_{гр}$, г		Масса стружки $m_{стр}$, г	
				1-я ступень (сепаратор)	2-я ступень (вихревая камера)	1-я ступень	2-я ступень
66	75	768,8	7,6	569,9	8,3	0,1	6,7
	50			593,8	10,1	0,1	6,8
	25			757,2	8,4	0,1	7,0
33	75			675,6	12,8	0,1	6,1
	50			755,5	13	0,2	6,6
	25			700,4	17,1	0,3	6,7

С целью повышения эффективности очистки гранулированного материала было принято решение провести ряд экспериментов с корректированием подачи воздуха в дополнительных патрубках и регулированием внутренних составных частей сепаратора. Настройка параметров проводилась до тех пор, пока результаты эксперимента станут наилучшими.

При проведении ряда экспериментов, была найдена оптимальная компоновка аппарата комплексной очистки. Результаты, приведенные в табл. 1, оказались самыми высокими по всем показателям.

Вывод. Выявлена схема компоновки экспериментального стенда с наиболее эффективной очисткой гранулята от технологических примесей. При массе смеси равной 776.4 г, масса гранулированного материала, уловленного в первой ступени, оказалась равной 757.2 г, что составляет 97.5% от общей массы смеси. Масса стружки в этой ступени приняло значение 0.1 г при изначальной массе 7.6 г, что составляет 1.3% от общей массы стружки.

Разработано и предложено новое техническое решение для эффективной очистки ПЭВД. Установка очистки гранулированного материала может быть применена в промышленности. Сконструированное техническое решение улучшает экологическую обстановку и повышает качество товарного продукта.

Литература

1. «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 г. №7-ФЗ.
2. Барский М.Д., Ревнивцев В.И., Соколкин Ю.В. Гравитационная классификация зернистого материала. М.: Недра, 1974. 232 с.
3. Малис А.Я., Демидов А.Р. Машины для очистки зерна воздушным потоком. М.: Машиностроение, 1962. 176 с.
4. А.с. № 1554985 (СССР). Способ сепарации из воздушного потока наэлектризованной примеси / М.В. Василевский, Ж.А. Анисимов, Б.Г. Свищев, Н.А. Кочетков, В.К. Гордеев. Оpubл. в Б.И., 1990, № 13.
5. А.с. № 1256816 (СССР). Устройство для очистки зерновых и гранулированных материалов от примесей / М.В. Василевский, А.Т. Росляк, Ж.А. Анисимов, Б.Г. Свищев, Н.А. Кочетков, В.К. Гордеев. Оpubл. в Б.И., 1986, № 34.
6. А.с. № 1505566 Устройство для очистки газа от пыли / М.В. Василевский, А.Д. Колмаков, Ж.А. Анисимов, А.Ф. Травников, П.Н. Зятиков, А.Т. Росляк, В.П. Дорогин. Оpubл. в Б.И., 1989, № 33.

References

1. «On Environmental Protection» dated January 10, 2002 No. 7-F3.
2. Barsky M., Revnivitsev V.I., and Sokolkin Yu.V. Gravitational classification of granular material. M.: Nedra, 1974. 232 p.
3. Malis A.Ya., Demidov A.R. Machines for cleaning grain with air flow. M.: Mashinostroenie, 1962. 176 p.

4. А.п. No. 1554985 (USSR). The method of separation from the air flow electrified impurities / M.V. Vasilevsky, Zh.A. Anisimov, B.G. Svishchev, N.A. Kochetkov, V.K. Gordeev. Publ. in B.I., 1990, No. 13.

5. А.п. No. 1256816 (USSR). A device for cleaning grain and granulated materials from impurities / M.V. Vasilevsky, A.T. Roslyak, Zh.A. Anisimov, B.G. Svishchev, N.A. Kochetkov, V.K. Gordeev. Publ. in B.I., 1986, No. 34.

6. А.п. № 1505566 A device for gas cleaning from dust / M.V. Vasilevsky, A.D. Kolmakov, Zh.A. Anisimov, A.F. Travnikov, P.N. Zyatikov, A.T. Roslyak, V.P. Dorogin. Publ. in B.I., 1989, No. 33.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАЖИГАНИЯ ЧАСТИЦЫ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Л.Е. Валиева

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия
lil.valiewa@yandex.ru

Ключевые слова: тепломассоперенос, экспериментальное исследование, водоугольное топливо, время задержки зажигания, давление окислительной среды.

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования процесса воспламенения частицы водоугольного топлива в условиях высоких давлений окислительной среды. Эксперимент проводился на оборудовании, обеспечивающем достаточно низкий уровень погрешности (не более 10%) при регистрации основных характеристик (время задержки зажигания топливных частиц t_3). Установлено, что давление среды оказывает существенное влияние на процессы тепломассопереноса в частице биоугольного топлива.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE IGNITION PROCESS OF COAL-WATER FUEL

Liliya Valieva

National Research Tomsk Polytechnic University, Russian Federation
lil.valiewa@yandex.ru

Keywords: Heat and mass transfer, experimental study, coal- water fuel, ignition delay time, oxidative pressure.

Abstract. This paper presents the results of an experimental study of the ignition process of a particle of coal-water fuel under conditions of high pressures of an oxidizing medium. The experiment was conducted on equipment that provides a fairly low level of error. It has been established that the pressure of the medium has a significant effect on the processes of heat and mass transfer in a particle of biofuel-coal.

За последние годы замечена существенная неопределенность в ценообразовании на нефтяные энергоресурсы [1]. Основным продуктом переработки нефти являются бензин и дистилляты. Автомобили являются их главными потребителями, поэтому возникают предпосылки для замены традиционных энергоносителей новыми видами топлив. Одним из перспективных является угольное топливо. Однако применение такого вида энергоносителя обладает существенными недостатками, такими как низкая теплотворная способность топлива [2, 3] и др. Поэтому наиболее приемлемым является применение в качестве топлив ДВС новых водоугольных композиций-топлив (ВУТ). Однако в настоящий момент отсутствует общая теоретическая и математическая база процессов воспламенения и горения ВУТ в условиях работы в двигателях внутреннего сгорания при высоких давлениях окислителя.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование времени задержки зажигания частицы ВУТ при различных давлениях воздуха.

Экспериментальное исследование проводилось по следующей методике. Частица био-водоугольного топлива закреплялась на металлической проволоке, размещенной в камере, и нагревалась (электрическим нагревателем) до высокой температуры. Регистрация процессов тепломассопереноса и воспламенения топливной частицы проводилось высокоскоростной видеокамерой. Данные с видеокамеры поступали на персональный компьютер для дальнейшей обработки. Для изменения давления в печи применялся компрессор (от 1 до 5 атм).

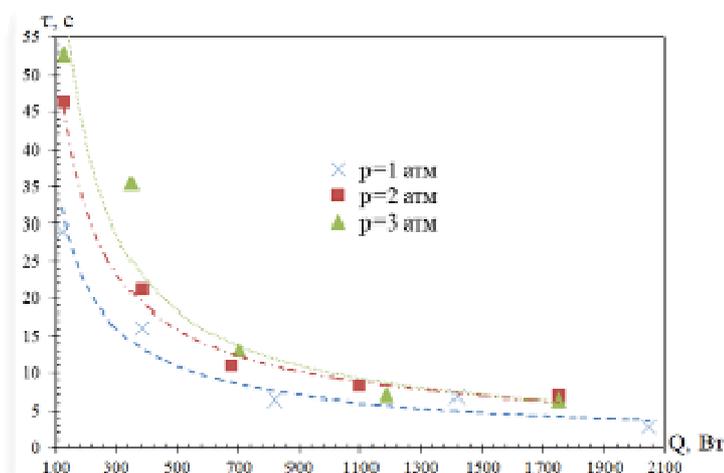


Рис. 1. Зависимость времен задержки зажигания частицы био-водоугольного топлива при различных давлениях окислительной среды от мощности нагрева

Период времени от начала теплового воздействия (момент выделения влаги из частицы) до зажигания (появление пламени) считался временем задержки воспламенения (t_3).

При проведении исследований методом наименьших квадратов определялась погрешность. Доверительный интервал определения t_3 при доверительной вероятности 0.95 не превышал 10 %.

На рис. 1 представлена зависимость времен задержки зажигания частицы био-водоугольного топлива при различных давлениях окислительной среды от интенсивности нагрева.

Не трудно заметить, что при увеличении давления окислителя время задержки зажигания капли ВУТ возрастает. Это, скорее всего, обусловлено тем, что при увеличении давления окислителя увеличивается характерная температура насыщения воды, соответственно необходимые для активного испарения влаги условия, по температурам, достигаются позже, чем при атмосферном давлении.

Литература

1. Башмаков И.А. Центр энергоэффективности – XXI век // Вопросы экономики. М., 2018, № 4. С. 49–75.
2. Gengda Li, Shuiqing Li, Qian Huang, Qiang Yao. Fine particulate formation and ash deposition during pulverized coal combustion of high-sodium lignite in a down-fired furnace // Fuel. 2015. No 143. Pp. 430–437.
3. Кузнецов Г.В., Саломатов В.В., Сыродой С.В. Влияние диффузии продуктов пиролиза угля на характеристики и условия воспламенения капель водо-угольного топлива // Физика горения и взрыва. 2018, №6. С. 30–40.

References

1. Bashmakov I.A. Energy Efficiency Center. – XXI // Economic issues 4 Moscow, 2018. Pp. 49–75.
2. Gengda Li, Shuiqing Li, Qian Huang, Qiang Yao. Fine particulate formation and ash deposition during pulverized coal combustion of high-sodium lignite in a down-fired furnace // Fuel. 2015. No 143. Pp. 430–437.
3. Kuznetsov G.V., Salomatov V.V., Syrodoy S.V. The influence of the diffusion of coal pyrolysis products on the characteristics and conditions of ignition of water-coal fuel droplets // Physics of combustion and explosion. 2018. No 6. Pp. 30–40.

РЕШЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

А.В. Доненко, В.А. Лукьяненко

ФГАОУ ВО "Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского", Россия
idonenko2013@gmail.com

Ключевые слова: нелинейные уравнения, уравнения нелинейной оптики, фракталы, дифракция.

Аннотация. В связи с усложнением функциональных характеристик современных оптических систем и появлением дифракционных оптических элементов (ДОЭ) с фрактальной структурой возникает необходимость развития систем имитационного моделирования дифракционных задач на новом классе объектов. Имитационное моделирование, являясь дополнительным инструментарием исследования задач дифракционной оптики, позволяет снять ограничения, возникающие при проведении натурального эксперимента (например, приборные ограничения регистрации высоких пространственных частот дифракционного спектра), сохраняя возможность учета стохастических факторов и неидеальностей изучаемых структур.

SOLUTION OF NONLINEAR PARABOLIC EQUATIONS FOR MODELING PHOTONIC CRYSTALS

A.V. Donenko and V.A. Lukyanenko

FSAEI of HE "VI Vernadsky Crimean Federal University", Russia
idonenko2013@gmail.com

Keywords: nonlinear equations, equations of nonlinear optics, fractals, diffraction.

In connection with the complication of the functional characteristics of modern optical systems and the appearance of diffractive optical elements (DOE) with a fractal structure, it becomes necessary to develop simulation systems for diffraction problems on a new class of objects. Simulation modeling, being an additional tool for investigating the problems of diffraction optics, makes it possible to remove the limitations that arise during a full-scale experiment (for example, instrumental limitations of recording high spatial frequencies of the diffraction spectrum), while preserving the possibility of taking into account stochastic factors and imperfections of the studied structures.

Актуальность. Исследование взаимодействия электромагнитного излучения видимого диапазона с объектами, обладающими фрактальной структурой, имеет важное практическое значение с двух точек зрения. Во-первых, исследование дифракционных полей от фрактальных объектов позволяет выявлять структурные особенности и характерные свойства этих объектов. Во-вторых, дифракция на фрактальных объектах может привести к созданию новых типов волновых фронтов, которые могут стать основой разработки новых оптических элементов. Таким образом, интеграция теории фракталов в оптическую науку позволяет расширить класс существующих ДОЭ, качество которых во многом зависит от результатов предварительного моделирования, как одного из этапов их разработки.

Цель и задачи исследования. Решение нелинейных параболических уравнений для фрактальных дифракционных картин позволяет впоследствии произвести восстановление картин в каждый промежуток времени, и на основе их математической модели построить их 3D модель.

Основные результаты. В последние годы решение таких нелинейных параболических уравнений, разрушающихся за конечное или бесконечное

время (см. эволюцию треугольника Серпинского или ковра Серпинского), т.е. режимы с обострением, стали активно изучаться, что и не могло оставить нас в стороне. Мы решили рассмотреть с математической точки зрения эволюцию фрактальной дифракционной картины, полученную в ходе эксперимента на кафедре общей физики, физико-технического института, КФУ им. В.И. Вернадского.

Однако большинство публикаций в этой области посвящено решениям, растущим до бесконечности в равномерной норме, а не рассматриваются динамические системы, приводящие к хаосу и саморазрушению системы. Данный эксперимент по исследованию дифракции на фракталах посвящен дифракции Фраунгофера, т.е. случаю, когда распределение интенсивности за объектом представляет собой не что иное, как оптическое преобразование Фурье, достаточно просто реализуемое с помощью вычислительного алгоритма.

В работе были рассмотрены теоретические и экспериментальные аспекты оптической дифракции Фраунгофера от фрактальных объектов типа ковер Серпинского, треугольник Серпинского и спиралевидного транспаранта $L=+1$. Дифракционная картина Фраунгофера, возникающая в плоскости наблюдения, является результатом оптического преобразования Фурье решетки с фрактальным узором.

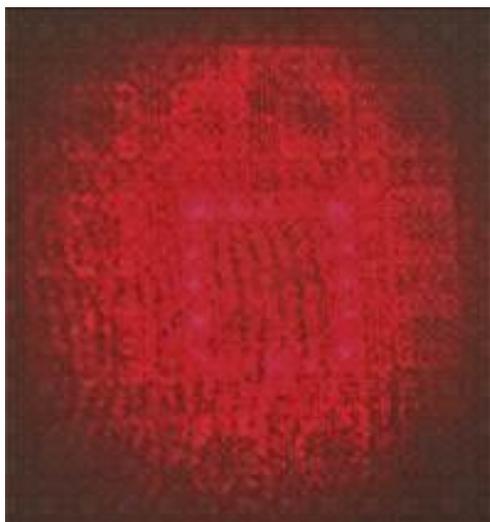


Рис. 1. Фрактальная дифракционная картина, полученная с транспарантом ковра Серпинского

Исследование фактора структуры (при возможности его извлечения из выражения интенсивности) показывает, что распределение является самоподобным, а с ростом порядка генерации фрактала, в спектре интенсивности появляются новые частотные полосы, которые являются масштабно инвариантными относительно множителя $1/3$ [2].

Экспериментальные исследования подтверждают теоретический расчет, проведенный для случая дифракции Фраунгофера, полученный в ходе эксперимента приведен на рис. 1.

Исследование фактора структуры (при возможности его извлечения из выражения интенсивности) показывает, что распределение является самоподобным, а с ростом порядка генерации фрактала, в спектре интенсивности появляются новые частотные полосы, которые являются масштабно инвариантными относительно множителя $1/3$. Экспериментальные исследования подтверждают теоретический расчет, проведенный для случая дифракции Фраунгофера для фракталов Серпинского и спиралевидного транспаранта с зарядом $L=+1$.

Выводы. Дифракционная картина претерпевает существенные изменения при увеличении степени фрактальности. Когда этот уровень низок, размер объекта мал, и его Фурье-преобразование имеет относительно грубую структуру.

Самоподобный объект с высокой степенью фрактальности позволяет генерировать излучения волн, интерференция которых приводит к образованию тонкой структуры дифракционной картины. На основе чего можно смоделировать фотонный кристалл.

Литература

1. *Ball J.M.* Singular minimizers in the calculus of variations // *Bull. Amer. Math. Soc.* (N. S.). 1984. Vol. 11. Pp. 143–146.
2. *Доненко И.Л.* Виртуальное моделирование и исследование фрактальных оптических отображений // *И.Л. Доненко, В.И. Шостка // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн – 2017. № 4. С. 553–556/*
3. *Доненко А.В.* Нелинейные параболические уравнения и их приложения // *А.В. Доненко, В.А. Лукьяненко // Дни науки КФУ им. В.И. Вернадского – 2017. №3. Т. 6. С. 327–329.*
4. *Белан Е.П., Хазова Ю.А.* Динамика стационарных структур в параболической задаче на окружности с отражением пространственной переменной // *Динамические системы. 2014. Т. 4(32), № 1–2. С. 43–58.*

Reference

1. *Ball J.M.* Singular minimizers in the calculus of variations // *Bull. Amer. Math. Soc.* (N. S.). 1984. Vol. 11. Pp. 143–146.
2. *Donenko I.L.* Virtual modeling and research of fractal optical mappings // *I.L. Donenko, V.I. Shostka // Virtual modeling, prototyping and industrial design – 2017. №4.*
3. *Donenko A.V.* Nonlinear parabolic equations and their applications // *A.V. Donenko, V.A. Lukyanenko // Days of Science KFU them. IN AND. Vernadsky – 2017. №3. Vol. 6. Pp. 327–329.*
4. *Belan E.P., Khazova Yu.A.* Dynamics of stationary structures in a parabolic problem on a circle with a spatial variable reflection. *Dynamic Systems. 2014. Т. 4 (32), No. 1–2. Pp. 43–58.*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ И ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ

А.Т. Жукжанова

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
aizhanzhukzhanova8634@gmail.com

Ключевые слова: вольфрам, химический реактор, скорость, давление, вихрь.

Аннотация. В работе рассматривается физическая и математическая модель получения вольфрама путем осаждения из парогазовой фазы с помощью восстановления его фторидов. Моделирование процесса проводится на основе решения уравнений переноса импульса, тепла и массы в осесимметричной постановке. При численном решении в переменных «вихрь–функция тока» и в переменных «скорость–давление» были получены распределения полей скоростей, температуры, концентрации и линий тока для разных режимов течения. Изучено влияние параметров течения на распределение полей характеристик потока.

NUMERICAL SIMULATION OF AERODYNAMICS AND PROCESS HEAT AND MASS TRANSFER IN CHEMICAL REACTOR

Aizhan Zhukzhanova

National Research Tomsk State University, Russian Federation
aizhanzhukzhanova8634@gmail.com

Keywords: tungsten, chemical reactor, velocity, pressure, vortex.

Abstract. The paper deals with the physical and mathematical model of tungsten production by vapor-gas phase deposition by means of its fluoride reduction. Simulation of the process is based on solving the equations of momentum, heat and mass transfer in axisymmetric formulation. With a numerical solution in the variables “vortex-current function” and in the variables “velocity-pressure” distributions of velocity fields, temperature, concentration, and streamlines were obtained for different flow regimes. The influence of flow parameters on the distribution of flow characteristics fields is studied.

Вольфрам является наиболее востребованным в промышленности тугоплавких металлов [1, 2]. Получение вольфрама и придание изделиям из него нужной формы затруднительно, поэтому существует альтернативный способ получения изделия из вольфрама путем осаждения из парогазовой фазы с помощью химической гетерогенной реакции восстановления его фторидов непосредственно с использованием 3D-печати [3]. Это позволяет получать покрытия и изделия из вольфрама любой конфигурации.

Химический реактор представляет собой цилиндрический корпус, расположенный вертикально, причем, на центральной оси располагается под-

ложка при температурах порядка 600 °С. Сверху, в осевом направлении, подается смесь, состоящая из гексафторида вольфрама и водорода. Газовая смесь достигает подложки, на которой протекает гетерогенная химическая реакция с образованием на ее поверхности чистого вольфрама необходимой формы [3]. Моделирование процесса осаждения вольфрама из парогазовой фазы основывается на решении системы уравнений Навье–Стокса для несжимаемой жидкости, в силу небольших скоростей газового потока, и уравнений переноса теплоты и вещества [4] с использованием по аналогии оригинальных граничных условий [2]. Решение полученной системы дифференциальных уравнений проводилось двумя методами в физических переменных «скорость – давление» на разнесенной разностной сетке путём расщепления полей скорости и давления по времени и в переменных «функция тока – вихрь».

Достоверность работы подтверждалась проведением тестовых расчетов на сеточную сходимость, сравнением с известным аналитическим решением для частного случая течения газового потока, сравнением численных результатов, полученных на основе двух разных подходов и сравнением численного решения задачи с известными опытными данными. В работе проведен анализ влияния геометрических и режимных параметров на распределение полей вектора скорости, температуры и концентрации.

Представленная математическая модель может быть использована для создания новых более эффективных технологических решений в области фторидного передела вольфрама.

Литература

1. *Королев Ю.М.* Экологически чистый фторидный передел в технологии вольфрама. Обоснование технологического цикла с кругооборотом фтора и водорода // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2016. № 6. С. 29–41.
2. *Шваб А.В., Брендаков Р.В., Порохнин А.Ю.* Моделирование процесса фторирования металлического вольфрама // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2018. №53. С. 116–129.
3. Патент РФ № 2641596. / *В.Н. Брендаков, А.А. Демиденко, А.В. Шваб, Н.С. Евсев, Р.В. Брендаков* // Бюл. № 2, 18.01.2018.
4. *Лойцянский Л. Г.* Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. М.: Дрофа, 2003. 840 с.

References

1. *Korolyov. Y.M.* Ecologically clean fluoride redistribution in tungsten technology. Justification of the technological cycle with fluorine and hydrogen // Izv. vuzov. Cvet. metallurgiya. 2016. No 6. Pp. 29–41.
2. *Shvab A.V., Brendakov P.V., Porohnin A.Y* Mathematical modelling of process of fluorination of metal tungsten // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika I mekhanika. 2018. No 53. Pp. 116–129.

3. Patent of RF No 2641596. / V.N. Brendakov, A.A. Demidenko, A.V. Shvab, N.S. Evseyev, R.V. Brendakov // Bul. No 2, 18.01.2018.
4. Loitsiansky L.G. Fluid and gas mechanics / L.G. Loitsiansky. M.: Drofa, 2003. 840 p.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В УСЛОВИЯХ ПЛАВЛЕНИЯ ЛЬДА ПРИ ДВИЖЕНИИ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА

Е.А. Захарова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия
eaz15@tpu.ru

Ключевые слова: криобот, лед, плавление, теплоперенос, массоперенос, моделирование.

Аннотация. Даны результаты математического моделирования процессов тепло-массопереноса, протекающих совместно, в условиях интенсивных фазовых изменений (плавления льда) при движении криобота. Учитывается пространственная неравномерность скорости плавления льда. Установлено, что скорость прохождения криобота зависит в основном от его температуры. По результатам численного моделирования было установлено значительное охлаждение поверхности криобота. Последнее связано с высоким эндотермическим эффектом плавления льда.

MATHEMATICAL MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES IN THE CONDITIONS OF ICE MELTING DURING THE MOVEMENT OF A ROBOTIC COMPLEX

E. Zakharova

National research Tomsk Polytechnic University, Russian Federation
eaz15@tpu.ru

Keywords: cryobot, ice, melting, heat transfer, mass transfer, modeling.

Abstract. The results of mathematical modeling of heat and mass transfer processes occurring together in the conditions of intensive phase changes (ice melting) during the movement of a cryobot are given. The spatial non-uniformity of the ice melting rate is taken into account. It has been established that the speed of passage of a cryobot depends mainly on its temperature. According to the results of numerical simulation, significant cooling of the cryobot surface was found. The latter is associated with a high endothermic effect of ice melting.

Особое значение для ряда естественных наук представляет изучение оледенения материков и всех видов ледников. Для изучения строения, вещественного состава, динамики ледовых отложений чаще всего используют бурение. Бурение скважин может проходить механическим, тепловым и

механическим совместно способами. Последний метод является более экологичным в сравнении с другими.

Крибот позволяет определить состав и возраст толщ льда, биологический состав подледных водоемов и наличие там микроорганизмов, тем самым внесет вклад в естественные науки.

Целью данной работы – математическое моделирование процессов теплообмена, которые происходят совместно в условиях плавления льда при движении крибота.

В работе представлены физическая и математическая постановки. Математическая постановка включает в себя 3 уравнения энергии: для системы "лед–вода", крибота и воздуха. С целью верификации модели были решены тестовые задачи.

В результате были получены температурные поля в системе "крибот–лед–воздух". Геометрические характеристики могут оказывать влияние на динамику плавления льда и движение крибота. Однако основным параметром является длина роботизированного комплекса. Исходя из полученных результатов, оптимальная высота аппарата составляет 1 м, что соответствует ранее разработанным прототипам.

Также стоит отметить, что при фазовых переходах образуется неоднородная гетерогенная структура, состоящая из жидкой и твердой фаз со значительно отличающимися характеристиками. При этом жидкая фаза обладает очень высокой теплоемкостью (4,2 кДж/(кг·К)). Комплекс вышеприведенных факторов создает тепловой барьер, тормозящий процесс плавления.

При моделировании совместно протекающих процессов тепло- и массопереноса в условиях плавления льда установлено, что скорость прохождения крибота практически не зависит от мощности его тепловыделения, геометрических характеристик и температур. Последнее обусловлено тем, что при фазовых переходах в массиве льда формируется очень узкая (практически бесконечно тонкая) зона локального теплостока (фронт плавления).

Моделирование процессов позволяет инициировать различные ситуации, возникающие при эксплуатации аппарата. Благодаря этому, можно максимально приблизиться к необходимым параметрам крибота, предотвратить возможные аварии. Численное решение требует невысоких энергетических и материальных затрат, не оказывает негативного влияния на окружающую среду.

Крибот не использует ядовитых жидкостей, не разрушает структуру льда и не влияет на флору микроорганизмов, обитающих в подледных водоемах.

Литература

1. *Васильев Н.И.* Глубокое бурение антарктического ледникового покрова как метод исследования палеоклимата // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. №76. С. 78–88.
2. *Чумаченко Е.Н., Данхэм Д. и др.* Компьютерное моделирование проникновения криобота под ледяной покров Европы // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. №6(1). С. 205–213.
3. *Weiss P., Yung K.L., Ng T.C.* Planetary and Space Science. (2008). 56.
4. *Талалай П.Г.* Проникновение в подледниковые озера: планы и реальность // Природа. 2006. №9. С. 45–53.
5. *Парфенова Г.В., Чумаченко Е.Н.* Анализ двухфазной задачи Стефана для процесса перемещения криобота // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2010. С. 232–235.

References

1. Vasiliev N.I. Deep drilling of the Antarctic ice sheet as a method for studying the paleoclimate // Problems of the Arctic and Antarctic. 2006. No. 76. Pp. 78–88.
2. *Chumachenko E.N., Dunham D. and others.* Computer simulation of the penetration of cryobot under the ice cover of Europe // Bulletin of the Nizhny Novgorod University. N.I. Lobica. 2011. No. 6(1). Pp. 205–213.
3. *Weiss P., Yung K.L., Ng T.C.* Planetary and Space Science. 56. 2008.
4. *Talalay P.G.* Penetration into the subglacial lakes: plans and reality // Nature. 2006. №9. Pp. 45–53.
5. *Parfenova G.V., Chumachenko E.N.* Analysis of the two-phase Stefan problem for the cryobot movement process // New information technologies in automated systems. 2010. Pp. 232–235.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЫ ПРИ ВДУВЕ ГАЗА С ЕЕ ПОВЕРХНОСТИ

Н.Н. Золоторёв, В.А. Архипов, С.А. Басалаев, С.Н. Поленчук

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
nikzolotorev@mail.ru

Ключевые слова: коэффициент сопротивления, твердая сферическая частица, вдув газа, объемный расход газа.

Аннотация. Рассмотрен новый метод измерения коэффициента сопротивления сферической частицы при вдуве газа с ее поверхности. Представлены результаты исследования влияния вдува газа с поверхности твердой сферической частицы на коэффициент сопротивления при варьировании соотношения скорости вдува газа и скорости обтекающей частицу потока. На основе полученных результатов показано, что значения коэффициента сопротивления при отсутствии вдува газа с поверхности частицы в исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса согласуются со стандартной зависимостью сопротивления для турбулентного режима обтекания, а при вдуве газа с по-

верхности частицы коэффициент сопротивления уменьшается (эффект более выражен при уменьшении скорости обдувающего потока). Получены зависимости изменения коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса при изменении скорости вдува газа с поверхности частицы.

TECHNIQUE OF MEASUREMENT OF A RESISTANCE COEFFICIENT FOR SPHERICAL PARTICLE AT A GAS INJECTION FROM ITS SURFACE

N.N. Zolotorev, V.A. Arkhipov, S.A. Basalaev, S.N. Polenchuk

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

Keywords: resistance coefficient, firm spherical particle, gas injection, gas volume flow.

Abstract. A new technique of measurement of a drag coefficient for the spherical particle at a gas injection from its surface is presented. Results of investigation of the effect of the gas injection from a surface of a solid spherical particle on the drag coefficient are presented. In the investigation, the ratio of the gas injection velocity and the velocity of the flow blowing around the particle was varied. Based on the obtained results, it is shown that the drag coefficient in the absence of the gas injection from the particle surface in the examined range of the Reynolds numbers is consistent with the standard drag dependence for the turbulent flow regime. At the same time, when the gas is blown from the particle surface, the drag coefficient is decreased (this effect is more pronounced with a decrease in the flow velocity). The dependences of the change in the drag coefficient on the Reynolds number with changing the velocity of the gas injection from a particle surface.

Процессы движения конденсированных (твердых или жидких) частиц в потоке газа имеют прикладное значение в ряде отраслей техники и технологии, в которых реализуются двухфазные течения рабочей среды [1]. Одной из основных характеристик, определяющих закономерности движения частиц в двухфазном потоке, является коэффициент сопротивления C_x .

Стандартная кривая сопротивления (зависимость C_x от числа Рейнольдса) и большинство теоретических и эмпирических зависимостей для C_x , приведенных в литературе, получены без учета вдува газа с поверхности частицы [2].

В ряде практически важных задач с поверхности частицы происходит интенсивный вдув газообразных продуктов испарения и/или горения частицы (движение горящих угольных частиц в топочных устройствах, горение капель жидкого топлива в камерах сгорания авиационных и ракетных двигателей, испарение капель распыленной воды при авиационном тушении пожаров и т.д.).

В условиях вдува газа с поверхности частицы в несущую среду использование стандартной кривой сопротивления приводит к погрешностям при расчете скорости движения частиц.

Опытные данные разных авторов показывают, что испарение или горение вещества частицы существенно снижает коэффициент сопротивления [3]. При анализе опубликованных результатов следует иметь в виду, что они получены, как правило, при наличии ускорения частицы. При этом выделить в чистом виде влияние потока массы от поверхности частицы достаточно трудно.

Для определения коэффициента сопротивления сферических частиц при вдуве газа с их поверхности предлагается новый метод [4]. Для реализации метода полую сферическую частицу с пористой оболочкой закрепляли на консоли, выполненной в виде полый трубки. Консоль закрепляли на шарикоподшипнике с возможностью ее вращения вокруг горизонтальной оси, расположенной перпендикулярно направлению потока обдувающего газа. Верхняя часть консоли выполнена в виде стрелки, позволяющей измерять на шкале угол поворота консоли при отклонении частицы под воздействием потока газа. Скорость обдувающего потока газа измеряли с помощью трубки Пито.

Во внутреннюю полость частицы подавали через гибкий шланг сжатый воздух из баллона через редуктор с контрольным манометром. Объемный расход вдуваемого в полость частицы воздуха измеряли турбинным расходомером СГ-6. Варьирование расхода вдуваемого через поверхность частицы воздуха позволяет определить зависимость коэффициента сопротивления сферической частицы от интенсивности вдува (числа Рейнольдса Re_s) для заданной скорости обдувающего частицу потока газа, характеризующейся числом Рейнольдса Re_0 .

Представлены результаты экспериментов по исследованию коэффициента сферической частицы при вдуве газа с ее поверхности. В экспериментах использовалась полая перфорированная сферическая частица диаметром $D_p = 40$ мм, массой $m_p = 2.71$ г. В первой серии экспериментов измеряли коэффициент сопротивления частицы при отсутствии вдува газа с ее поверхности. Во второй серии экспериментов измеряли коэффициент сопротивления частицы при вдуве газа с ее поверхности с заданным объемным расходом и с заданными значениями скорости обдувающего потока.

В данной работе представлены результаты исследования коэффициента сопротивления частицы при вдуве газа и при его отсутствии вдува. Показано, что полученные значения коэффициента сопротивления (без вдува газа) в диапазоне чисел Рейнольдса $Re_0 = (3.14 \div 9.94) \cdot 10^3$ согласуются со стандартной зависимостью [5] для турбулентного режима обтекания ($C_{x0} = 0.44$ при $Re_0 > 10^3$). При вдуве газа с поверхности частицы в исследованном диапазоне чисел Рейнольдса коэффициент сопротивления уменьшается $\sim 20\%$. Этот эффект более выражен при уменьшении скорости обдувающего потока.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-19-10014).

Литература

1. Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. Л.: Химия, 1982. 288 с.
2. Стернин Л.Е., Шрайбер А.А. Многофазные течения газа с частицами. М.: Машиностроение, 1994. 320 с.
3. Шрайбер А.А. Многофазные полидисперсные течения с переменным фракционным составом дискретных включений // Итоги науки и техники: Комплексные и специальные разделы механики. М.: ВИНТИ, 1988. С. 3–80.
4. Заявка на патент РФ. Способ определения коэффициента сопротивления сферической частицы при вдуве газа с ее поверхности, МПК G01N 21/85; B01L 1/00 / В.А. Архипов, С.А. Басалаев, К.Г. Перфильева, С.Н. Поленчук, Р.А. Юсупов, Е.А. Маслов.
5. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.

References

1. Romankov P.G., Kurochkina M.I. Hidromekhanicheskie protsesy khimicheskoy tekhnologii [Hydromechanical processes of chemical technology]. Leningrad: Khimiya Publ., 1982. 228 p.
2. Sternin L.E., Shraiber A.A. Mnogofaznye techeniya gaza s chastitsami [Multiphase flows of gas with particles]. Moscow: Mashinostroenie, 1994. 320 p.
3. Shreiber A.A. Multiphase polydisperse flows with variable fraction composition of disperse inclusions // Itogi nauki i tekhniki. Seriya: Kompleksnye i spetsialnye razdely mekhaniki. Vol. 3. VINITI, Moscow, 1988. Pp. 3–80.
4. Application for a patent of the Russian Federation. The method for determining the resistance coefficient of a spherical particle when a gas is blown from its surface, MPK G01N 21/85; B01L 1/00 / Arkhipov V.A., Basalaev S.A., Perfilyeva K.G., Polenchuk S.N., Yusupov R.A., Maslov E.A.
5. Nigmatulin R.I. The dynamics of the multiphase media // Moscow: Nauka, Part 1, 1987. 464 p.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РАЗЛОЖЕНИЯ ПОЛИУРАНАТА АММОНИЯ

В.В. Ким, В.Н. Брендаков

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
valeriyakim705@gmail.com

Ключевые слова: полиураты аммония, термическое разложение, математическая модель.

Аннотация. Рассмотрены вопросы, связанные с созданием математической модели процесса термического разложения полиуратов аммония. Путем сделанных допущений получена система уравнений, описывающая замкнутый цикл основных процессов, происходящих в барабанной вращающейся печи. Выполнены расчеты полей компонент вектора скорости и температуры. Получена расчетная зависимость степени пре-

вращения полиураната аммония от длины аппарата. Сформулированы условия оптимизации процесса разложения полиураната аммония.

MATHEMATICAL MODEL OF PROCESS OF DECOMPOSITION OF AMMONIUM POLYURANODON

Valeria Kim, Vladimir Brendakov

National research Tomsk State University, Russian Federation
valeriyakim705@gmail.com

Keywords: Ammonium polyuranate, thermal decomposition, mathematical model.

Abstract. The issues related to the creation of a mathematical model of the process of thermal decomposition of ammonium polyuranates are considered. By making the assumptions obtained a system of equations describing a closed cycle of the main processes occurring in a drum rotary kiln. The fields of the velocity and temperature vector components are calculated. The calculated dependence of the degree of conversion of ammonium polyuranate on the length of the apparatus was obtained. The conditions for the optimization of the decomposition process of ammonium polyuranate are formulated.

Атомная энергетика в настоящее время является одной из важнейших источников электрической энергии. В структуре отрасли – четыре крупных научно-производственных комплекса: предприятия ядерного топливного цикла, атомного машиностроения, ядерного оружейного комплекса и отраслевые научно-исследовательские институты.

Одним из основных промышленных методов производства оксидов урана является метод химической денитрации уранилнитрата [1, 2]. В настоящее время изучение процесса термического разложения полиуранатов аммония представляет большое практическое значение. Одним из главных конструктивных элементов данной технологии является барабанная вращающаяся печь. Термическая диссоциация полиуранатов аммония является сложным химическим процессом, и поэтому, несмотря на большое количество экспериментальных данные об этом процессе, до сих пор не существует общепринятых закономерностей, описывающих его.

Реальный эксперимент связан с большой стоимостью и высокой сложностью выполнения, в работе была поставлена цель, используя методы математического моделирования, описывающие процессы в барабанной вращающейся печи, построить математическую модель процесса разложения полиураната аммония.

При построении модели за основу был выбран аппарат, работающий на Сибирском химическом комбинате [3]. Рассматривается задача о термическом разложении полиуранатов аммония в прокалочной печи, представляющей собой круглый цилиндр с диаметром печи 0,6 м и длиной 8,8 м. Аппарат расположен под углом 2 градуса к горизонту и вращается с постоян-

ной скоростью 33,3 об/мин. Исходный продукт заполняет прокалочную печь на 3–3,5% и при температуре 1020 °K участвует в необратимой гетерогенной эндотермической реакции термического разложения до образования закиси-окиси урана. В печь подается предварительно нагретый газ, расход которого составляет от 6 до 20 м³/ч. Проведение данной эндотермической реакции в атмосфере азота повышает содержание урана в конечном продукте по сравнению с проведением того же процесса при продувке барабанной печи воздухом.

Данная работа посвящена описанию математической модели теплообмена и гидродинамических процессов внутри барабанной вращающейся печи. Математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений в частных производных, аналитическую зависимость степени превращения от длины аппарата [3], соответствующих начальных и граничных условий. Созданная математическая модель решалась численно с использованием метода конечных разностей. Разностный аналог дифференциальных уравнений записывался в виде чисто неявной схемы. Совместное решение этой системы находилось методом установления по времени с использованием алгоритма прогонки [4]. В результате проделанной работы было получено поле температур внутри печи прокаливания. Составлен и протестирован на достоверность алгоритм численного решения задачи о термическом разложении полиуранатов аммония. Из результатов численного исследования задачи прогрева печи сделан вывод о влиянии числа Рейнольдса при разных граничных условиях на распределение тепла внутри печи. Оценка степени термического разложения полиуранатов аммония показала возможность оптимизации процесса получения закиси-окиси урана.

Литература

1. Пищулин В.П., Алимпиева Е., Зарипова Л.Ф. Разработка технологии получения оксидов урана ядерной чистоты // Изв. высших учебных заведений. 2017. № 11-2. С. 86–91.
2. Жиганов А.Н., Гузеев В.В., Андреев Г.Г. Технология диоксида урана для керамического ядерного топлива. Томск: STT, 2002. 328 с.
3. Пищулин В.П., Брендаков В.Н. Математическая модель процесса термического разложения в барабанной вращающейся печи // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308. № 3. С. 106–109.
4. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.

References

1. Pishchulin V.P., Alimpieva E.A., Zaripova L.F. Development of technology for obtaining uranium oxides of nuclear purity // Izv. institutions of higher education. 2017. № 11-2. P. 86–91.

2. Zhiganov A.N., Guzeev V.V., Andreev G.G. Uranium dioxide technology for ceramic nuclear fuel. Tomsk: STT, 2002. 328 p.

3. Pishchulin V.P., Brendakov V.N. Mathematical model of the process of thermal decomposition in a drum rotary kiln // News of Tomsk Polytechnic University. 2005. Т. 308. № 3. Pp. 106–109.

4. Samarskij A.A., Vabishchevich P.N. Computational heat transfer. M.: Editorial URSS, 2003. 784 p.

АЛГЕБРАИЧЕСКОЕ ХЕДЖЕВОЕ ГИБРИДНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДЛЯ ПРИВОДОВ ТИРИСТОРА – ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПЕРЕМЕННОЙ ИНЕРЦИЕЙ

Ле Ван Тунг

Санкт-Петербургский горный университет, Россия
levantungdkt@gmail.com

Ключевые слова: лингвистический домен, хедж-алгебры, контроллер на основе хеджирования и алгебры, управление нечеткой логикой и ее приложения, управление двигателем постоянного тока.

Аннотация. В данной работе представлено решение в области управления тиристорной электроприводной системой – двигателем постоянного тока для улучшения качества управления скорости вращения двигателя. Теория хеджевой алгебры (ХА) представляет собой алгоритм проектирования, основанный на опытах людей при исследовании объекта, закон управления объектами, благодаря этому определяются параметры функции семантической аппликации, выбирается уровень измерения непрозрачности сферы и приближенное рассуждение, основанное на методе интерполяции с реальной кривой. Поэтому этот метод управления подходит для объектов с переменными параметрами, в этом случае рассматривается момент инерции двигателя (J). В настоящее время метод проектирования хеджево-алгебраического контроллера (ХАК) параметры α и β выбираются произвольно, поэтому конструкция системы еще не оптимальна [1]. В статье представлен способ определения оптимальных значений α и β для контроллера по критерию интегрирования.

HYBRID HEDGE ALGEBRAS BASED CONTROL OF THYRISTOR CONVERTER DC MOTOR DRIVE SYSTEM WITH THE VARIABLE MOMENT OF INERTIA

Le Van Tung

Saint-Petersburg mining university, Russia
levantungdkt@gmail.com

Keywords: Linguistic domain, Hedge-Algebras, Hedge-Algebras-based Controller, fuzzy control and its applications, control of DC motor.

Abstract. This paper presents a new solution to control thyristor-dynamic electric drive system for improving the quality of engine speed control. This solution applies HA-Hedge Algebras theory which is an algorithm of design based on human experience of objects and their control rules, from which, we can identify parameters of quantitative semantic function, select the degree of fuzzy measure and make an approximative argument based on interpolation method of real curves. Therefore, the controller is well suitable for objects with variable parameters, which is the moment of inertia of the engine. The HAC controller design method now selects the parameters α and β are not the optimal design [1]. The article presents a method for finding the optimal parameters α and β for the controller through the criterion of integration.

Хотя в настоящее время классический регулятор PID используется в большинстве автоматически управляющих систем, он обычно применяется только для объектов с определенными параметрами или линейных объектов. Таким образом, качество регулирования скорости фактически не большое, например, если объект управления является двигателем постоянного тока с переменным параметром (J). Чтобы преодолеть недостатки классического регулятора, в настоящее время изучается и широко используется интеллектуальный регулятор, а именно: регулятор нечеткой логики, хеджевая алгебра. Развитие теории нечеткой логики привело к возникновению теории хеджевой алгебры, которая ограничивала некоторые недостатки нечеткой логики, например, отсутствие логического алгоритма, отсутствие необходимости построения зависимой функции, а сосредоточено определяются параметры семантической функции за счёт выбора уровня изменения непрозрачности хеджеров и приближенного рассуждения на основе метода классической интерполяции с реальной кривой. Однако в настоящее время теория хеджевой алгебры имеет недостаток – это произвольный выбор параметров α и β , поэтому погрешность контроллера будет зависеть от интерполяционного алгоритма семантической кривой [2, 3].

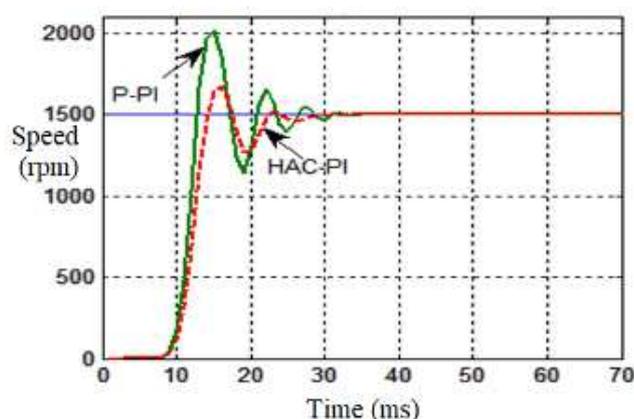


Рис.1 Результаты расчетов

В статье представлен способ комбинации регулятора PI с контроллером ХАК для управления скоростью вращения двигателя, основная особен-

ность НА – обеспечение системе быстрой стабилизации с изменением параметров объекта (в этом случае – момент инерции двигателя (J)) и удаление отрицательных факторов, влияющих на систему. Причем отклонительный сигнал $e(t)$ изменяется в широком диапазоне, это очень удобно при вводе параметров контроллера ХА, информации обрабатываются для создания разумного основного значения регулятора. PI в токовой цепи, а также сдачи метода определения оптимальных параметров α и β для улучшения качества системы при изменении J .

Динамическое и статическое качество системы управления двигателем постоянного тока можно оценивать индивидуально или в смешанных стандартах. В этом случае используется интегральный стандарт для оценки качества системы, так как очень удобен при вычислении, нахождении оптимальных коэффициентов α и β для контроллера.

При изменении значений параметров α , β в условии $\alpha + \beta = 1$, когда J_1 , J_2 достигают наименьшего значения, найдены оптимальные значения параметров α , β .

Из полученных результатов исследования, расчетов и моделирования на Matlab и Simulink очевидно, что при изменении момента инерции J двигателя скорость двигателя тоже изменяется. Однако, при использовании хеджевого алгебраического контроллера в скоростной цепи одновременно с контроллером PI в токовой цепи, качество выходного результата системы улучшается. Качественные параметры контроля, как статическое отклонение, амплитуда регулирования скорости двигателя, количество колебаний системы электропровода намного лучше, чем при использовании контроллера P в сочетании с классической PI, особенно амплитуда регулирования скорости двигателя и количество колебаний. На основании результатов моделирования на программе Matlab видно, что при $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.5$, тогда $J_1 = 1.1313648178246 = J_{1min}$ и $J_2 = 8.5720088469371 = J_{2min}$, при $\gamma = 1$. Скорость двигателя не имеет перерегулирования, время отклика составляет 0.3(с), а статическое отклонение равно нулю.

Представлен новый метод построения контроллера, это использование хеджевой алгебраической теории. Хеджевый алгебраический гибридный контроллер с соответствующей структурой и параметрами, скорость двигателя контролируется ближе заданной скорости при изменении момента инерции J . С использованием интегрального стандарта определяются оптимальные параметры α , β хеджевого алгебраического контроллера. Методы проектирования проверяются результатами моделирования. Этим доказывается правильность алгоритма и процесс построения гибридного хеджевого алгебраического контроллера для тиристорных приводов – двигателя постоянного тока. В статье также приведены новые методы определения оптимальных значений параметров контроллеров ХА при проектировании автоматических систем в промышленной отрасли.

Литература/References

1. *Jun Keun Ji, Yong Seok Lee.* Design of current and speed controller for dc motor drive system using dspace system; 2006. Vol. 7(3). Pp. 338–343.
2. *Ho N.C., Long N.V.* Fuzziness measure on complete hedge algebras and quantifying semantics of terms in linear hedge algebras, *Fuzzy Sets and Systems*; 2007. Vol 158(4). Pp. 452–471.
3. *Ho N.C., Vu Nhu Lan, Le Xuan Viet,* Optimal hedge-algebras-based controller: Design and application, *Fuzzy Sets and Systems*; 2008. Vol. 159. pp. 968–989.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ В НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

К.Г. Перфильева, В.А. Архипов, С.А. Басалаев, С.Н. Поленчук

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
k.g.perfiljeva@yandex.ru

Ключевые слова: коэффициент сопротивления, твердые сферические частицы, неизотермические условия, гравитационное осаждение, вязкая жидкость.

Аннотация. Представлены метод и результаты экспериментального исследования процесса осаждения твердых сферических частиц в вязкой жидкости в неизотермических условиях при малых числах Рейнольдса ($Re < 1$). Для определения зависимости коэффициента сопротивления от разности температур частиц и жидкости разработана специальная установка. Проведена серия экспериментов, по результатам которых получено снижение коэффициента сопротивления на 38% при максимальной разности температур частиц и жидкости 280 °С.

RESEARCH OF THE DRAG COEFFICIENT OF SPHERICAL PARTICLES AT NON-ISOTHERMAL CONDITIONS

K.G. Perfilieva, V.A. Arkhipov, S.A. Basalaev, S.N. Polenchuk

National research Tomsk State University, Russian Federation
k.g.perfiljeva@yandex.ru

Keywords: drag coefficient, solid spherical particles, non-isothermal conditions, gravitational sedimentation, viscous fluid.

Abstract. The method and results of an experimental study of the deposition of solid spherical particles in a viscous fluid under non-isothermal conditions at low Reynolds numbers ($Re < 1$) are presented. To determine the dependence of the drag coefficient on the temperature difference between particles and a liquid, a special installation has been developed. As a result of a series of experiments, a decrease in the drag coefficient by 38% was obtained with a maximum temperature difference between particles and a liquid of 280 °C.

Процесс движения частиц в поле силы тяжести имеет важное практическое значение в задачах экологии, в угольной промышленности, при ликвидации последствий катастрофических явлений техногенного или природного характера, в теплоэнергетике, в процессах химической технологии и в целом ряде других отраслей техники и технологии [1].

Одной из основных характеристик, определяющих закономерности движения частиц в двухфазном потоке, является входящий в уравнение движения коэффициент сопротивления среды движению частиц C_x [2]. Стандартная кривая сопротивления и подавляющее большинство зависимостей для C_x , приведенных в литературе для усложненных условий обтекания частиц, получены в изотермических условиях (равенство температур частиц и несущей среды).

В ряде технических систем и технологических процессов движение частиц в несущей среде происходит в неизотермических условиях. При этом температура частиц может быть существенно выше или ниже температуры среды. В этих условиях использование стандартной кривой сопротивления приводит к существенным погрешностям при расчете скорости движения частиц. Это связано с изменением физических свойств (в первую очередь вязкости) среды в пограничном слое вблизи частицы, входящих в число Рейнольдса.

Для определения коэффициента сопротивления твердых сферических частиц при их гравитационном осаждении в вязкой жидкости в неизотермических условиях предлагается новый метод [3]. Установка для реализации метода состоит из призматической кюветы с вязкой жидкостью, устройства нагрева частицы, устройства ввода эталонной и нагретой частиц в жидкость и системы визуализации процесса осаждения частиц.

В эксперименте предварительно нагревали одну из частиц в контейнере до заданной температуры, которую измеряли термопарой, соединенной через усилитель с осциллографом. После нагрева частицы ее вводили в отверстие неподвижной пластины за счет свободного падения при удалении стопора электромагнитным приводом. Затем подвижную пластину с помощью электромагнитного привода смещали в горизонтальном направлении до совмещения отверстий в подвижной и неподвижной пластинах. При этом эталонная и нагретая частицы осаждались в вязкой жидкости с нулевой начальной скоростью. Полученные с видеокамеры данные обрабатывались на компьютере с целью определения скорости осаждения каждой из частиц времяпролетным методом.

Представлены результаты экспериментов по исследованию влияния температуры нагретой частицы на коэффициент сопротивления при малых числах Рейнольдса. В экспериментах использовались стальные шарики диаметром 3.0, 8.87 и 17.47 мм. В качестве вязкой жидкости использовалось силиконовое масло ПМС-10000. Приведен видеоряд процесса осаждения нагретого и эталонного шариков диаметром $D_p = 17.47$ мм, по ко-

тому построен график зависимости пройденного нагретыми до 300 °С и эталонными частицами расстояния от времени t . Получены характеристики осаждения частиц в изотермических и неизотермических условиях. Показано, что в изотермических условиях измеренные значения коэффициента сопротивления соответствуют зависимости для эталонной частицы. При нагреве шариков происходит снижение коэффициента сопротивления, а при их разных диаметрах снижение происходит относительно одинаково.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-19-10014).

Литература

1. Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. Л.: Химия, 1982. 288 с.
2. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.
3. Заявка на патент РФ. Способ определения коэффициента сопротивления твердых сферических частиц в неизотермических условиях, МПК G01N 21/85; B01L 1/00 / В.А. Архипов, С.А. Басалаев, К.Г. Перфильева, В.И. Романдин, С.Н. Поленчук.

References

1. Romankov P.G. and Kurochkina M.I. 1982 *Hydromechanical processes of chemical technology* (New York: Hemisphere)
2. Nigmatulin R.I. 1991 *Dynamics of Multiphase Media* (New York: Hemisphere) 244 p.
3. Arkhipov V.A., Basalaev S.A., Perfil'eva K.G., Romandin V.I. and Polenchuk S.N. 25.10.2018. The method for determining the drag coefficient of solid spherical particles in non-isothermal conditions (Application No. 2018137798 with priority of 19.12.2016 for RF Patent G01N 21/85; B01L 1/00) [in Russian].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПАРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ НИЖЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КИПЕНИЯ В ЖИДКОСТЯХ С РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНЬЮ МИНЕРАЛИЗАЦИИ

А.В. Полянская, Е.Е. Бульба

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
avp69@tpu.ru

Ключевые слова: степень минерализации, массовая скорость испарения, давление насыщения, парциальное давление, коэффициент аккомодации.

Аннотация. Проведено экспериментальное исследование влияния степени минерализации на характеристики процесса испарения со свободной поверхности воды при температурах в диапазоне от 318 до 363 К. Полученные численные значения коэффициентов аккомодации и парциального давления паров могут использоваться исследо-

вателями, формирующими математические модели тепло- и массообменных процессов, сопровождающихся фазовыми переходами жидкость–пар.

EXPERIMENTAL STUDY OF EVAPORATION PROCESSES AT TEMPERATURES BELOW BOILING POINT IN LIQUIDS WITH DIFFERENT DEGREE OF MINERALIZATION

Alina Polyanskaya, Elena Bulba

National research Tomsk Polytechnic University, Russian Federation
avp69@tpu.ru

Keywords: degree of mineralization, mass rate of evaporation, pressure of saturation, water, accommodation coefficient

Abstract. Experimental study of the influence of the degree of mineralization on the characteristics of the evaporation process from the free surface of water at temperatures ranging from 318 to 363 K was conducted. The obtained numerical values of the coefficients of accommodation and partial pressure can be used by researchers who form mathematical models of heat and mass transfer processes accompanied by liquid–vapor phase transitions.

Несмотря на огромное количество выполненных научных работ, посвященных изучению процессов парообразования, нет удовлетворительного согласия между опытом и моделями. Четкие сведения о характеристиках процесса испарения различного типа воды, например, численные значения коэффициента аккомодации, отсутствуют или их найти очень сложно. Задача экспериментального исследования характеристик процесса испарения со свободной поверхности весьма актуальна [1, 2, 3].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния степени минерализации воды на основные характеристики процесса испарения со свободной поверхности (массовая скорость испарения, парциальное давления паров, коэффициент аккомодации).

При проведении экспериментов используется сушильная камера типа SU-32, мощностью 4,5 кВт, предназначенная для сушки различных материалов (например, древесины). Максимальная рабочая температура в камере может достигать 200 °С. Нагрев в рабочей камере обеспечивается проволочными нагревателями, которые размещены по контуру нагрева, что обеспечивает равномерный нагрев поверхности рабочей камеры. В верхней части камеры располагаются отверстия для выхода паров влаги и для установки температурного датчика (термопары).

В камеру помещали сосуд с определенной площадью испарения, его масса заранее измерялась на лабораторных весах. Сосуд наполнялся образцами воды объемом 80 мл. В камере устанавливалась необходимая для проведения эксперимента температура, контролируемая с помощью ПИД-регулятора (при достижении заданной температуры нагрев автоматически

прекращается). Сосуд с жидкостью размещался в сушильной камере. По истечении заданного интервала времени (10 минут) сосуд взвешивался для определения количества испарившейся жидкости. Эксперимент повторялся не менее 3 раз для постоянных температур.

В качестве экспериментальных образцов использовалась вода пяти различных степеней минерализации: вода дистиллированная ГОСТ 6709-72 (со степенью минерализации 5 мг/л), вода талая снеговая из г. Юрга, Кемеровской обл. (48–66 мг/л), вода водопроводная из г. Томск, Томской обл. (333 мг/л), вода минеральная «Ессентуки №17» (10000–14000 мг/л), вода оз. Соленое из с. Завьялово, Алтайского края (115000 мг/л).

Массовая скорость испарения определялась поверхностной плотностью потока пара, поступающего за единицу времени в газовую фазу с единицы поверхности жидкости. Все полученные результаты экспериментов прошли обработку согласно теории погрешностей: отбракованы промахи и определены доверительные интервалы.

Получены зависимости массовой скорости испарения воды от температуры через различные промежутки времени. В работе представлены результаты экспериментов в диапазоне температур 318–363 К. Анализируя их (рис. 1), можно сделать вывод, что степень минерализации не оказывает влияния на процесс испарения, так как все кривые находятся в одном доверительном интервале (с доверительной вероятностью 0,95).

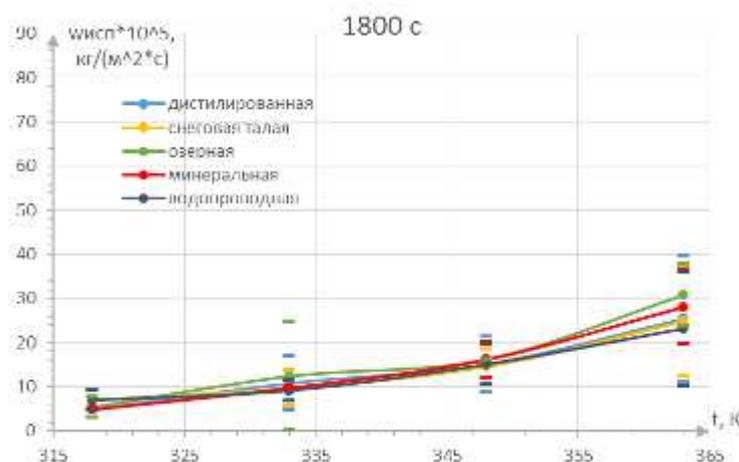


Рис. 1. Зависимость массовой скорости испарения от температуры через 1800 сек

На следующем этапе проведены исследования зависимости массовой скорости испарения от времени при различных температурах, с целью обоснования заключения о стационарности процесса испарения жидкости в условиях выполненных экспериментов. Из анализа кривых можно говорить о том, что степень минерализации не влияет на время установления стационарного процесса испарения.

На заключительном этапе с использованием полученных экспериментальных значений массовых скоростей испарения из уравнения Герца–Кнудсена [4] был определен коэффициент аккомодации для всех образцов воды при четырех температурах. Входящее в выражение для коэффициента аккомодации парциальное давление паров было найдено на основании молекулярно-кинетической теории.

Проанализировав полученные с использованием молекулярно-кинетической теории результаты расчета парциального давления паров воды и коэффициента аккомодации для образцов воды пяти различных степеней минерализации при четырех температурах, можно проследить следующие закономерности: с ростом температуры увеличивается парциальное давление паров, а коэффициент аккомодации уменьшается. Это объясняется тем, что с увеличением температуры становится больше молекул, обладающих высокой кинетической энергией, которые уже не конденсируются на свободной поверхности испарения.

Численные значения коэффициентов аккомодации, полученные экспериментальным образом в данной работе, потенциально могут использоваться в численных исследованиях процессов тепломассопереноса с фазовыми превращениями, а также они станут дополнением к эмпирической базе, к которой неизбежно обращаются в теплотехнике.

Литература

1. Плаксина Ю.Ю., Винниченко Н.А., Лапшин В.Б., Уваров А.В. Анализ конвективного движения воды и воздуха вблизи границы раздела сред // Ломоносовские чтения. 2012. С. 126–128.
2. Орвос М., Сзабо В., Пус Т. Скорость испарения со свободной поверхности нагретой жидкости // Прикладная механика и техническая физика. 2016. Т. 57. №6. С. 168–179.

References

1. Bower S., Saylor J. The effects of surfactant monolayers on free surface natural // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2011. Pp. 5348–5358.
2. Bulba E.E. The accommodation coefficient of the liquid at temperatures below the boiling [Electronic resource] / E.E. Bulba // European Physical Journal Web of Conferences (EPJ Web of Conferences). 2015. Vol. 82: Thermophysical Basis of Energy Technologies. Title screen.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ ПОТОКОМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

М.В. Пурин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия
mvp21@tpu.ru

Ключевые слова: плавление, теплоперенос, лазерное излучение, испарение.

Аннотация. Проведено математическое моделирование процессов теплопереноса, протекающих совместно в условиях интенсивных фазовых превращений (плавление и испарение металлов) при лазерном воздействии на металлическую пластину. В результате исследования установлено, что мощность лазера оказывает существенное влияние на динамику процесса плавления. Проведено исследование влияния мощности лазерного излучения на концентрацию паров металла в газовой области. Результаты данного исследования могут быть полезны при определении параметров и режимов сварки металлов.

MATHEMATICAL MODELING OF METAL PLATE HEATING BY LASER RADIATION

Mikhail Purin

National Research Tomsk Polytechnic University, Russian Federation
mvp21@tpu.ru

Keywords: Melting, heat transfer, laser radiation, evaporation.

Abstract. Mathematical modeling of heat transfer processes occurring jointly under conditions of intense phase transformations (melting and evaporation of metals) during laser action on a metal plate was carried out. The study found that the laser power has a significant impact on the dynamics of the melting process. An investigation is made of the effect of laser power on the metal vapor concentration in the gas region. The results of this study may be useful in determining the parameters and modes of welding metals.

Лазерная обработка металлов имеет весомое значение для промышленности, где высокая точность обработки и отсутствие механических повреждений на обрабатываемом изделии играют большую роль. Дороговизна и сложность натуральных экспериментов вынуждают использовать для исследования процессов лазерного плавления аппарат математического моделирования, позволяющий проводить вычисления без материальных затрат. При лазерном воздействии на металл происходит изменение структуры материала, его теплофизических характеристик. Изменения происходят в строго ограниченной области, где и формируется фронт плавления [1]. Существующие методы решения многофронтной задачи Стефана, осно-

ванные на явном выделении фронта плавления, сложны и требуют значительных вычислительных мощностей [2], поэтому цель работы – математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса, протекающих совместно, в условиях интенсивных фазовых превращений (плавления и испарения) металла при воздействии лазером.

В работе приведены физическая и математическая постановка задачи. Физическая постановка заключается в следующем: металл в области паде-ния лазерного луча нагревается и при достижении температуры фазового перехода плавится. Фронт плавления продвигается вглубь материала, образуя гетерогенную структуру с различающимися теплофизическими характеристиками. При продолжающемся нагреве инициируется процесс испарения металла в газовую область. Пары металла формируют во внешней среде парогазовую смесь, оказывающую существенное влияние на характеристики переноса излучения.

Математическая постановка включает в себя обезразмеренные уравнения энергии для металла и газовой области, уравнение диффузии в газовой области, уравнение переноса излучения, а также соответствующие начальные и граничные условия.

В результате выполнения работы получены температурные поля в системе «газ–металл». На рис. 1 приведена зависимость концентрации C паров металла в газовой области от интенсивности падающего излучения.

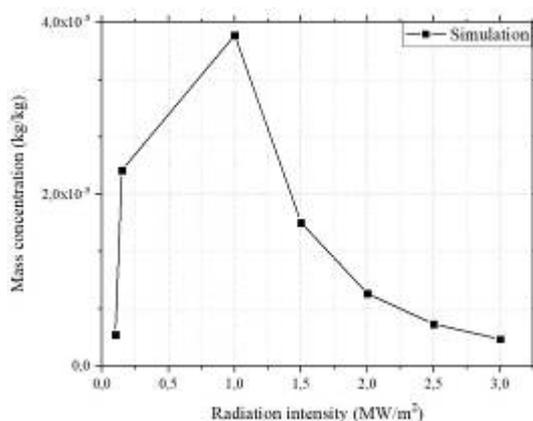


Рис. 1. Зависимость концентрации паров металла в газовой области от интенсивности падающего излучения

При увеличении интенсивности падающего излучения концентрация паров металла в газовой области увеличивается до критического значения, а затем начинает снижаться. Это можно объяснить интенсивным оттоком паров металла из рассматриваемой области, вследствие существенно возрастающего коэффициента диффузии. Согласно [3], коэффициент диффузии нелинейно зависит от температуры. При непрерывном увеличении интенсивности излучения, начиная с некоторого момента времени, коэффициент диффузии становится настолько большим, что происходит интен-

сивный отток паров металла и концентрация снижается. Установлено, что мощность лазерного излучения оказывает влияние на параметры плавления.

Литература

1. Григорьянц А.Г. Лазерная резка металлов: учеб. пособие для вузов / А.Г. Григорьянц, А.А. Соколов. М.: Высш. шк., 1988. 127 с.
2. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 1965. 5:5. С. 816–827.
3. Королёва О.Н., Мажукин В.И. Математическое моделирование лазерного плавления и испарения многослойных материалов // Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 2006. 46:5. С. 887–901.

References

1. Grigoryants A.G. Laser cutting of metals: Proc. manual for universities / A.G. Grigoryants, A.A. Sokolov. Moscow: High school, 1988. 127 p.
2. Samarsky A.A., Moiseenko B.D. Cost-effective pass-through scheme for the multidimensional Stefan problem, U.S.S.R. Comput. Math. Math. Phys., 1965. 5:5. Pp. 816–827.
3. Koroleva O.N., Mazhukin V.I. Mathematical modeling of laser melting and evaporation of multilayer materials, Comput. Math. Math. Phys., 2006. 46:5. Pp. 887–901.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ ПАРАФИНОВ В СКВАЖИНАХ, ВСКРЫВАЮЩИХ ПАЛЕЗОЙСКИЕ ОТЛОЖЕНИЯ

А.А. Серебрянников

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия
serebriannikov.alexandr@yandex.ru

Ключевые слова: палеозойские отложения, асфальтены, парафины, кристаллизация, осложнения, скважина.

Аннотация. Одной из серьезных проблем, с которой столкнулись нефтедобывающие компании Томской области, занимающиеся промышленной разработкой палеозойских коллекторов, является высокое содержание парафиновых соединений в нефти. В данной работе была определена глубина кристаллизации парафинов на фонде добывающих скважин, вскрывающих палеозойские отложения. Полученные значения глубины кристаллизации парафинов варьируются в пределах от 2 до 218 м от устья скважин. Проанализирована зависимость глубины кристаллизации парафинов от массового дебита действующих скважин по нефти. Полученная зависимость использовалась для определения минимального массового дебита скважины по нефти, при котором исключается выпадение парафиновых образований в стволе скважины.

THE STUDY OF CONDITIONS FOR THE FORMATION OF PARAFFIN CRYSTALS IN WELLS OPENING PALEOZOIC SEDIMENTS

A.A. Serebryannikov

National Research Tomsk Polytechnic University, Russian Federation
serebriannikov.alexandr@yandex.ru

Keywords: paleozoic deposits, asphaltenes, paraffins, crystallization, complications, well.

Abstract. One of the serious problems faced by the Tomsk region oil producing companies engaged in the industrial development of Paleozoic reservoirs is the high content of paraffinic compounds in oil. In this work, the depth of crystallization of paraffins was determined at the production wells, revealing Paleozoic sediments. The obtained values of the crystallization depth of paraffins vary from 2 to 218 m from the wellhead. The dependence of the depth of crystallization of paraffins on the mass flow rate of existing wells in oil is analyzed. The resulting relationship was used to determine the minimum mass flow rate of the well for oil, which eliminates the loss of paraffin formations in the wellbore.

Процесс подъема высокопарафинистой нефти на поверхность сопровождается кристаллизацией и выпадением асфальтосмолистопарафиновых отложений (АСПО) в подземном оборудовании, вследствие чего снижается продуктивность добывающих скважин [1]. Основной причиной образования АСПО является снижение температуры потока жидкости, движущейся по стволу скважины, до температуры начала кристаллизации парафинов, при которых парафиновые соединения начинают выделяться из нефти и осаждаются на поверхности насосно-компрессорных труб и погружного оборудования [2].

В настоящее время известно большое количество методов предупреждения, либо удаления уже образовавшихся АСПО (химические, физические, тепловые) [3]. Однако эффективность их применения зависит от правильного прогнозирования выделения парафиновых отложений из потока нефти. Под прогнозированием в данном случае понимается определение температуры кристаллизации парафинов и глубины выпадения их в стволе скважины. Методология, используемая в данной работе, связана с появлением трехфазного потока жидкости в скважине в результате появления в газированной жидкости кристалликов парафина. При движении потока жидкости по стволу скважины частицы парафинов адсорбируются на внутренней поверхности насосно-компрессорных труб, образуя слой асфальтосмолистопарафиновых веществ. [4].

В работе [5] предлагается использовать формулу распределения температуры по стволу фонтанной скважины для прогнозирования глубины начала кристаллизации парафиновых соединений:

$$t(h) = t_{пл} - \frac{t_{пл} h}{H_{вдп}} \left[1 - \frac{(1 - 0,87 e^{-0,003 Q_M}) \rho_{нд}}{\rho_{нпл}} \right] \quad (1)$$

Из уравнения (1) можно определить глубину начала кристаллизации парафинов в фонтанной скважине:

$$H_{кр} = H_{вдп} - \frac{(t_{пл} - t_{кр}) H_{вдп} \rho_{нпл}}{t_{пл} [\rho_{нпл} - (1 - 0,87 e^{-0,003 Q_M}) \rho_{нд}]} \quad (2)$$

где $t(h)$ – температура в скважине на глубине h , °С; $H_{кр}$ – точка начала кристаллизации парафина от устья, м; $t_{пл}$ – пластовая температура, °С; $t_{кр}$ – температура кристаллизации парафина, °С; Q_M – массовый дебит нефти, т/сут; $H_{вдп}$ – глубина верхних дыр перфорации, м; $\rho_{нпл}$ – плотность пластовой нефти, кг/м³; $\rho_{нд}$ – плотность дегазированной нефти, кг/м³.

За основу исследования взято нефтегазоконденсатное месторождение Томской области, на котором выделено три объекта разработки, один из которых нефтяной и сложен породами доюрского фундамента, представленные двумя типами разрезов: карбонатными и эффузивно-карбонатными. Особенностью геологического строения данного объекта разработки является то, что он имеет сложную блоковую структуру, которая является совокупностью нескольких сообщающихся залежей и отдельно обособленных. Одной из причин выбытия добывающих скважин данного объекта в неработающий фонд является высокое содержание АСПО в оборудовании, зарастание НКТ и выкидных линий.

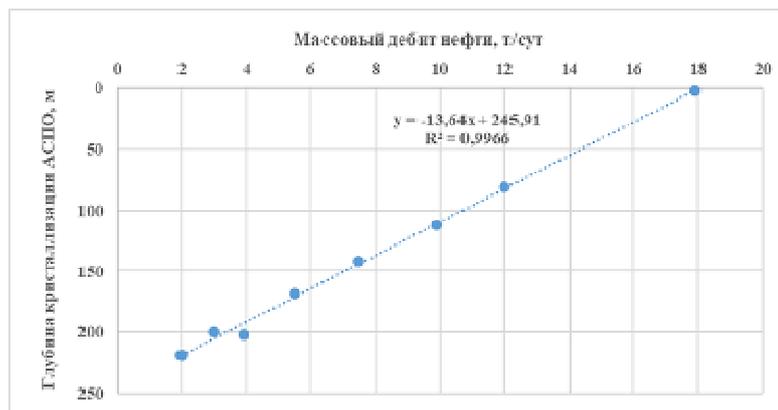


Рис. 1. Зависимость глубины кристаллизации АСПО от массового дебита нефти

Так как температуру кристаллизации парафина для нефти рассмотренного месторождения в лабораторных условиях не определяли, для расчетов глубины начала кристаллизации парафинов в скважинах было взято среднее значение температуры кристаллизации парафинов по месторождениям-

аналогам, расположенным в пределах Западной Сибири (30 °С) [5]. Рассмотренный в ходе работы фонд добывающих скважин, в основном, представлен фонтанными скважинами, работающими на режиме истощения пластовой энергии. Система ППД на объекте разработки не организована, а единичные скважины, оборудованные электроцентробежными насосами (ЭЦН) было решено не учитывать при анализе в связи с небольшими периодами работы и многочисленными отказами.

По результатам расчетов был построен график зависимости глубины начала кристаллизации парафинов в фонтанных скважинах, вскрывающих палеозойские отложения, от массового дебита нефти (рис. 1), на котором можно увидеть ярко выраженную зависимость данных параметров: чем ниже массовый дебит нефти, тем раньше начинается парафинообразование в фонтанных скважинах. Проведя через все построенные точки линию тренда и получив уравнение для полученной зависимости, был подсчитан минимальный массовый дебит нефти, при котором в стволе скважины не будет происходить выпадение АСПО. Значение минимального массового дебита нефти составило 18 т/сут. В условиях рассматриваемого месторождения всего две фонтанных скважины работают с дебитом по нефти свыше 18 т/сут, поэтому можно с большой долей вероятности прогнозировать возникновение проблем с выпадением АСПО на всем действующем фонде скважин.

В итоге, для рассмотренного месторождения стоит рекомендовать комплекс методов борьбы с отложениями парафинов в нефтяных скважинах. Выбор конкретного метода должен быть основан на более тщательном и полном исследовании физико-химических свойств пласта и насыщающего его флюида в лабораторных условиях на специализированном оборудовании. Полученные в результате данной работы расчеты могут быть использованы при проектировании геолого-технических мероприятий на проблемном фонде скважин и при подготовке к выполнению комплекса работ по предупреждению или устранению выпадения АСПО. Полученная в работе зависимость массового дебита нефти от глубины начала кристаллизации парафинов позволяет сделать экспресс-оценку о возможности выпадения АСПО на конкретной добывающей скважине. Значение глубины начала кристаллизации парафина может быть использовано при планировании работ по спуску скребков в стволы скважин, при химической обработке скважин ингибиторами парафиноотложений, либо при тепловом воздействии на отложения специальными нагревателями.

Литература

1. Акчурина В.А., Марьин В.И., Демахин А.Г. Химические методы удаления и предотвращения образования АСПО при добыче нефти. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2001. 156 с.

2. *Белкина С.А., Нагаева С.Н.* Причины образования асфальтосмолопарафинистых отложений в НКТ // Вестник Югорского государственного университета. 2016. №3. С. 7–11.

3. *Персиянцев М.Н.* Добыча нефти в осложненных условиях. М.: ООО «НедраБизнесцентр», 2000. 653 с.

4. *Деева Т.А., Камартдинов М.Р., Кулагина Т.Е., Шевелев П.В.* Современные методы разработки месторождений на поздних стадиях. Томск, 2006. 286 с.

5. *Мищенко И.Т., Сахаров В.А., Грон В.Г., Богомольный Г.И.* Сборник задач по технологии и технике нефтедобычи. М.: Недра, 1984. 272 с.

References

1. *Akchurin V.A., Marin V.I., Demakhin A.G.* Chemical methods for removing and preventing the formation of paraffin in oil production. Saratov: Publishing house GosUNTs "College", 2001. 156 p.

2. *Belkina S.A., Nagaeva S.N.* The reasons for the formation of asphalt-resinous paraffin deposits in the tubing // Bulletin of Ugra State University. 2016. №3. Pp. 7–11.

3. *Persiyantsev M.N.* Oil production in complicated conditions. LLC "NedraBusiness Center", 2000. 653 p.

4. *Deeva, T.A., Kamartdinov, M.R., Kulagina, T.E., Shevelev, P.V.* Modern methods of development of deposits in the later stages. Tomsk, 2006. 286 p.

5. *Mishchenko I.T., Sakharov V.A., Gron V.G., Bogomolny G.I.* Collection of tasks on technology and technology of oil production. M.: Nedra, 1984. 272 p.

ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПРОЦЕССА СЕПАРАЦИИ В ШНЕКОВОЙ ЦЕНТРИФУГЕ

А.Е. Соломаха

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
solomahaartem@yandex.ru

Ключевые слова: центробежная сила, численный метод, вязкое течение, осаждение частицы.

Аннотация. В работе рассматривается физическая модель шнековой осадительной центрифуги. Записана математическая модель и приводится численный метод ее решения. Приведены результаты тестовых расчетов. Хорошее согласование результатов расчетов с аналитическим решением подтверждает адекватность созданной модели. Решение задачи течения вязкой несжимаемой жидкости строится в переменных «скорость – давление». Сформулированы начальные и граничные условия. Производится расчет времени осаждения твердых частиц различных размеров и пройденного ими расстояния под действием центробежной силы.

ENGINEERING METHOD OF CALCULATION OF SEPARATION PROCESS IN SCREW CENTRIFUGE

Artem Solomakha

National research Tomsk State University, Russian Federation
solomahaartem@yandex.ru

Keywords: centrifugal force, numerical method, viscous flow, particle deposition.

Abstract. The paper deals with the physical model of the auger precipitation centrifuge. The mathematical model is written down and the numerical method of its solution is given. The results of test calculations are presented. Good agreement of the calculation results with the analytical solution confirms the adequacy of the created model. The solution of the problem of viscous incompressible fluid flow is constructed in the "velocity – pressure" variables. Initial and boundary conditions are formulated. The time of deposition of solid particles of different sizes and the distance traveled by them under the action of centrifugal force is calculated.

Осадительные центрифуги имеют широкое применение в различных отраслях: в лабораторной практике, в сельском хозяйстве для очистки зерна, выдавливания мед из сот, выделение жира из молока, в производстве для обогащения руд, разделения изотопов урана в газообразном соединении гексафторида урана.

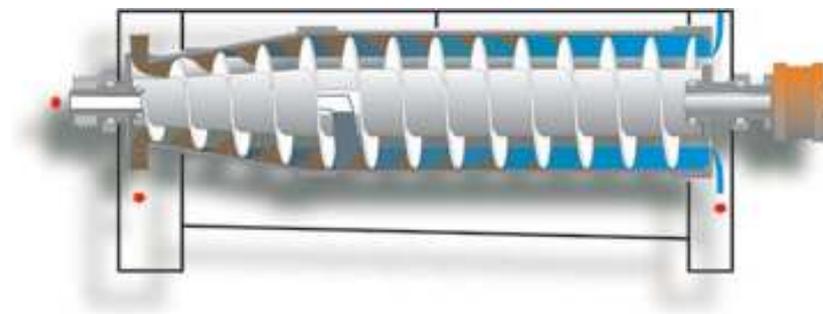


Рис. 1. Схема шнековой осадительной центрифуги

В работе рассматривается численное моделирование течения суспензии на основе системы уравнений Навье–Стокса, записанных в цилиндрической системе координат. На первом этапе моделирования была решена гидродинамическая задача течения вязкой несжимаемой жидкости в круглой трубе.

Одним из эффективных способов решения уравнений движения несжимаемой среды в переменных «скорость – давление» является метод физического расщепления по времени полей скорости и давления.

В работе численная модель, представляющая собой систему дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка, аппроксимировалась методом конечных разностей. Полученная система алгебраи-

ческих уравнений решалась численно на разнесенной разностной сетке при заданных начальных и граничных условиях. Неявная схема уравнений записывалась в «дельта» форме и решалась с помощью численного метода продольно-поперечной прогонки.

Для оценки адекватности созданной численной модели были выполнены тестовые расчеты течения в трубе. Хорошее соответствие между численными и аналитическими решениями позволяют сделать вывод о возможности использования данную численную модель в дальнейших численных исследованиях режимов работы шнековой осадительной центрифуги.

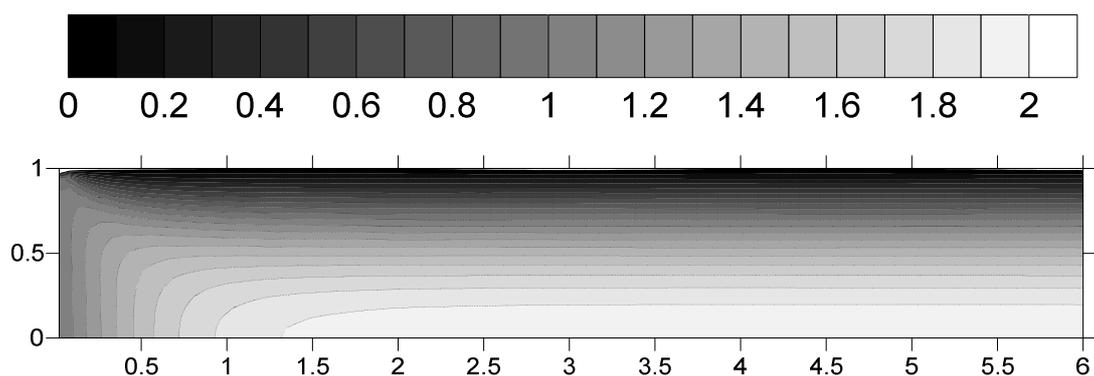


Рис. 2. Распределение компоненты скорости U_z при $Re=10$, $R\omega=0$

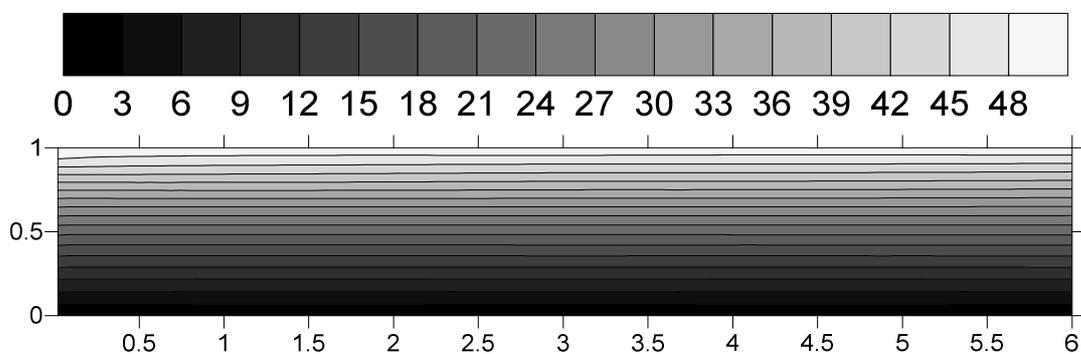


Рис. 3. Распределение компоненты скорости U_ϕ при $Re=50$, $R\omega=50$

Вторым этапом работы была оценка времени осаждения твердых частиц различного диаметра, расположенных в различных точках области течения по радиусу аппарата в области установившегося течения суспензии.

Используя уравнения движения частиц в цилиндрической системе координат, записанные для единичной частицы с допущением, что точка начального положения частицы находится в области установившегося течения суспензии, рассчитывается время осаждения такой единичной ча-

стицы. Далее находится расстояние, пройденное частицей вдоль области течения несущей среды.

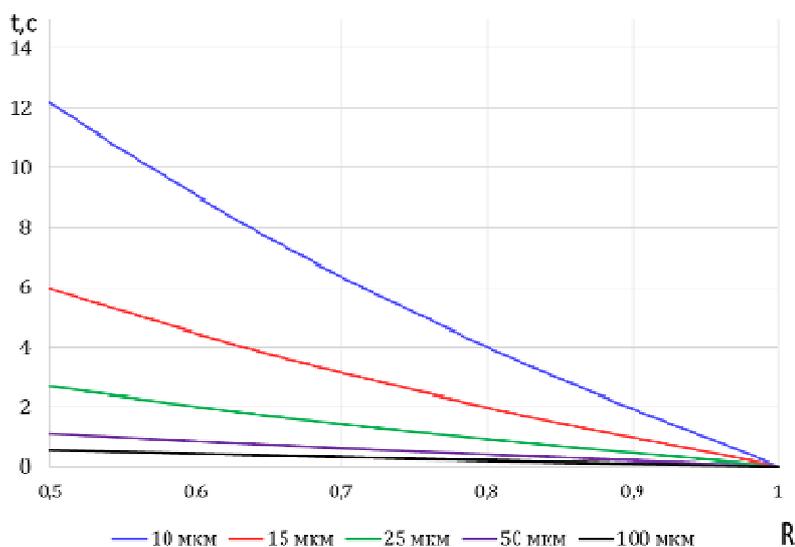


Рис. 4. Зависимость времени осаждения частицы от её диаметра и начального положения

Из найденных результатов видно, что частицы, имеющие меньший диаметр, имеют большее время осаждения, чем частицы с большим диаметром. Это позволит оценить массу осажденного осадка и его распределение по длине аппарата

Литература

1. Руденко К.Г., Шемаханов М.М. Обезвоживание и пылеулавливание. 1981. 351 с.
2. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. 1980. 29 с.
3. Соломаха А.Е., Брендаков В.Н. // Известия вузов. Физика. № 12/2. 2018. С. 93–98.
4. Чорин А.Ю. Численное решение уравнения Навье–Стокса // Math. Comput. 1968. № 22. 745 с.
5. Соломаха А.Е., Брендаков В.Н. Инженерный метод оценки времени осаждения частиц в шнековой центрифуге: сб. научных трудов Всероссийской конференции «Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2018» по направлению Инновационные ядерные технологии. 2018. С. 75–76.

References

1. Rudenko K.G. and Shemahanov M.M. Dehydration and dust collection. 1981. 351 p.
2. Roach P. Computational fluid dynamics 1980. 29 p.
3. Solomakha A.E. and Brendakov V.N. Russian Physics // Journal. Vol. 12/2. 2018. Pp. 93–98.
4. Chorin A.J. Numerical solution of Navier–Stokes equation // Math. Comput. 1968. Vol. 22. 745 p.
5. Solomakha A.E. and Brendakov V.N. Conference proceedings Scientific session МЕРНi – 2018 Towards innovative nuclear technologies. 2018. Pp. 75–76.

К ИССЛЕДОВАНИЮ ВИБРАЦИИ МАТЕРИАЛОВ С ПОКРЫТИЯМИ ПРИ НАЛИЧИИ ДЕФЕКТОВ

И.С. Телятников¹, А.В. Павлова²

¹Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, Россия
ilux_t@list.ru

²Кубанский государственный университет, Россия
pavlova@math.kubsu.ru

Ключевые слова: покрытие, трещина, вибрация, деформируемое основание, включение.

Аннотация. Исследуется задача об установившихся с заданной частотой колебаниях покрытия на упругом основании. В качестве составляющих покрытия рассматриваются двумерные деформируемые пластины с усредненными по толщине параметрами. По границе между пластинами проходит бесконечная трещина. Рассмотрены две модели основания: однородный упругий слой с заземленной нижней гранью и двухслойный пакет, содержащий плоское жесткое включение в плоскости раздела упругих свойств подложки. При решении задач использованы метод собственных функций и дифференциальный метод факторизации. Для основания, не содержащего дефектов, представлен способ определения основных характеристик напряженно-деформированного состояния структуры с покрытием в виде двух контактирующих вдоль прямолинейной трещины пластин. Для основания с дефектом типа жесткого включения возникает необходимость решения системы интегральных уравнений первого рода, связывающих перемещения на границе раздела слоев и в плоскости контакта покрытия и подложки со скачком напряжений в области включения.

THE INVESTIGATION OF VIBRATION OF MATERIALS WITH COATINGS IN THE PRESENCE OF DEFECTS

I. Telyatnikov¹, A. Pavlova²

¹Federal research center the Southern scientific center of the Russian academy of sciences,
Russian Federation
ilux_t@list.ru

²Kuban State University, Russian Federation
pavlova@math.kubsu.ru

Keywords: coating, crack, vibration, deformable base, inclusion.

Abstract. We investigated the problem of steady-state oscillations of a coating on an elastic foundation with a given frequency. We considered two-dimensional deformable plates with averaged thickness parameters as components of the coating. An endless crack passes along the boundary between the plates. We considered two models of the base: a homogeneous elastic layer with a clamped lower edge and a two-layer packet containing a rigid inclusion in the plane of separation of the elastic properties of the substrate. In solving problems we used the eigenfunctions method and the differential factorization method. For a base without defects the presented method allows to determine the main characteristics of the stress-

strain state of a structure with a coating in the form of two plates contacting along a rectilinear crack. For a foundation with a defect such as a rigid inclusion, it becomes necessary to solve a system of integral equations of the first kind that connect the displacements at the interface of the layers and in the plane of contact between the coating and the substrate with a stress-jump in the inclusion area.

Широкое использование в инженерной практике композиционных материалов, нередко имеющих покрытия, требует учета специфических особенностей их механического поведения. При исследовании напряженно-деформированного состояния тел с составными покрытиями особенно актуальной является проблема развития математических методов, достаточно полно описывающих поверхностные явления и краевые эффекты вблизи стыковочных границ покрывающих пластин и оболочек.

Рассматривается задача об установившихся с заданной частотой ω (зависимость от времени всех неизвестных и заданных функций задачи описывается множителем $\exp(-i\omega t)$) колебаниях покрытия на упругом основании. В качестве составляющих покрытия рассматриваются двумерные деформируемые пластины с усредненными по толщине параметрами. По границе между пластинами проходит бесконечная трещина. Горизонтальная плоскость декартовой системы координат совмещена со срединной поверхностью покрытия, ось OZ направлена вверх. Колебания пластин Кирхгофа, идеально контактирующих с деформируемой подложкой, описываются линеаризованной системой дифференциальных уравнений относительно смещений срединной поверхности. На берегах трещины могут быть заданы различные граничные условия [1].

Рассмотрены две модели основания: однородный упругий слой с защемленной нижней гранью и двухслойный пакет, содержащий плоское жесткое включение, расположенное в плоскости раздела упругих свойств подложки. Физико-механические свойства каждого из слоев подложки характеризуются упругими константами Ламе и плотностью материала. Движение точек упругого основания описывается вектором амплитуд смещений, удовлетворяющим системе дифференциальных уравнений Ламе. В области включения заданы равные на обоих берегах перемещения. Вне области включения в плоскости раздела выполняются условия непрерывности напряжений и перемещений. Нижняя грань пакета сцеплена с недеформируемым основанием.

При исследовании задачи об установившихся колебаниях деформируемого материала с покрытием использован метод собственных функций [2]. Для основания, не содержащего дефектов, представлен способ определения основных характеристик напряженно-деформированного состояния структуры с покрытием в виде двух контактирующих вдоль прямолинейной трещины пластин. Для дефектного основания рассмотрено сплошное покрытие.

Рисунок 1 иллюстрирует смещения поверхности слоя с составным покрытием под действием сосредоточенной вертикальной гармонической нагрузки, приложенной к правой пластине для случая неизменных свойств в направлении одной из осей плоскости покрытия. В качестве граничных условий на стыке пластин приняты условия «вязкого контакта». Расчеты проведены для модельных безразмерных параметров системы при различных свойствах пластин: слева – более жесткая правая пластина; справа – левая.

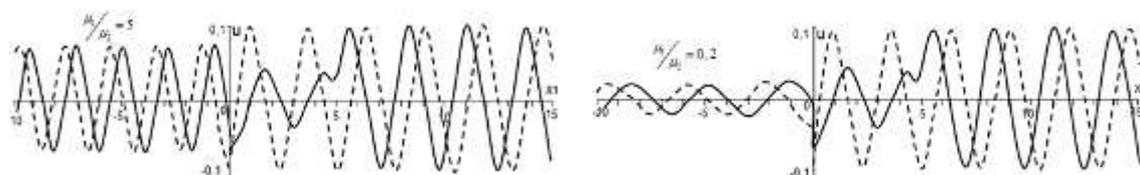


Рис. 1. Комплексные амплитуды смещения поверхности системы

Для построения соотношений, связывающих перемещения и напряжения на поверхности подложки с дефектом, применено обобщение интегрального подхода – дифференциальный метод факторизации [3], позволяющий учитывать взаимное влияние физико-механических и геометрических параметров задачи. В качестве достоинства предложенного подхода следует отметить его тесную связь с методом интегральных преобразований в областях с плоскопараллельными границами.

Для основания с дефектом типа жесткого включения применение алгоритма дифференциального метода факторизации приводит к необходимости решения системы интегральных уравнений первого рода, связывающих перемещения на границе раздела слоев и в плоскости контакта покрытия и подложки со скачком напряжений в области включения, решения которых для частных случаев областей, занимаемых дефектами, могут быть построены с помощью факторизационных методов Винера–Хопфа или фиктивного поглощения. Применение теории «вирусов» вибропрочности [4] позволяет построить матрицу Грина для подложки с множественными включениями, расположенными в параллельных плоскостях.

Отдельные части исследования выполнены в рамках ГЗ ЮНЦ РАН (проект 01201354241) и при поддержке РФФИ (проект 18-01-00124 «Развитие математических моделей и методов исследования волновых и деформационных процессов в геологических структурах»).

Литература

1. Вольмир А.С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек. М.: Наука, 1972. 432 с.
2. Телятников И.С. К моделям и методам изучения взаимодействия литосферных структур в области разломов // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2016. № 2. С. 78–89.

3. Babeshko V.A., Babeshko O.M., Evdokimova O.V. On integral and differential factorization methods // Doklady Mathematics. 2006. Vol. 74(2). Pp. 762–766.
4. Babeshko V.A., Buzhan V.V., Williams R.T. Solid by an Array of Rigid Planar Inclusions // Doklady Physics. 2002. Vol. 47(2). Pp. 156–158.

References

1. Volmir A.S. Nonlinear Dynamics of Plates and Shells, Moscow: Nauka Press, Russia, 1972. 432 p. (in Russian)
2. Telyatnikov I.S. To models and methods of studying the interactions of lithospheric structures in the area of the faults // Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation. 2016. № 2. Pp. 78–89. (in Russian)
3. Babeshko V.A., Babeshko O.M., Evdokimova O.V. On integral and differential factorization methods // Doklady Mathematics. 2006. Vol. 74(2). Pp. 762–766.
4. Babeshko V.A., Buzhan V.V., Williams R.T. Solid by an Array of Rigid Planar Inclusions // Doklady Physics. 2002. Vol. 47(2). Pp. 156–158.

ДИСКРЕТНАЯ МОДЕЛЬ ГОРЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ БЕЗГАЗОВОЙ СМЕСИ TI+AL И NI+AL

Т.И. Худякова, В.Г. Прокофьев

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия.
Отдел структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН
tai_hudikova@mail.ru

Ключевые слова: горение, многокомпонентная безгазовая смесь, химическая печь, элементарная ячейка.

Аннотация. Синтез в режиме горения неорганических материалов или СВС относится к гетерогенному типу протекания экзотермических реакций. Тем не менее большинство теоретических представлений о протекании высокотемпературного синтеза основано на гомогенном приближении. В работе предложена и численно исследована двумерная дискретная модель горения многокомпонентной безгазовой смеси, состоящей из двух типов ячеек: TI+AL и NI+AL. Все ячейки имеют квадратную форму и один размер, задающий масштаб гетерогенности системы. На границах между ячейками задаются сопряженные граничные условия теплообмена. Методом численного моделирования проведен анализ влияния размера элементарной ячейки на скорость горения системы с регулярным (упорядоченным) распределением ячеек. При проведении расчетов было обнаружено, что с увеличением размера элементарной ячейки время горения значительно увеличивается, т.е. уменьшается средняя скорость горения образца. При малом размере ячейки (масштабе гетерогенности) фронт горения становится однородным, тем самым увеличивая скорость прохождения химической реакции.

DISCRETE MODEL OF THE COMBUSTION OF A MULTICOMPONENT GASLESS MIXTURE TI + AL AND NI + AL

T.I. Khudyakova, V.G. Prokofiev

National research Tomsk State University, Russian Federation.
Department of Structural Macrokinetics, Tomsk Scientific Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tomsk.
tai_hudikova@mail.ru

Keywords: combustion, multicomponent gas-free mixture, chemical oven, unit cell.

Abstract. Synthesis in the mode of combustion of inorganic materials or SHS refers to a heterogeneous type of exothermic reactions. However, most theoretical ideas about the course of high-temperature synthesis are based on a homogeneous approximation. A two-dimensional discrete combustion model of a multicomponent gas-free mixture consisting of two types of cells: TI + AL and NI + AL was proposed and numerically investigated. All cells have a square shape and one size, which sets the scale of heterogeneity of the system. At the boundaries between the cells, the conjugate boundary conditions of heat transfer are specified. The influence of the size of the unit cell on the burning rate of a system with a regular (ordered) cell distribution was analyzed using a numerical simulation method. During the calculations, it was found that with an increase in the size of the unit cell, the burning time increases significantly, i.e. decreases the average burning rate of the sample. With a small cell size (scale of heterogeneity), the combustion front becomes homogeneous, thereby increasing the rate of passage of a chemical reaction.

Предметом изучения данной работы является горение многокомпонентной безгазовой смеси TI+AL и NI+AL. Образец представляет собой регулярное чередование элементарных ячеек с различными теплофизическими параметрами, которые состоят из безгазовых смесей TI+AL и NI+AL, соответственно. При таком чередовании смесей TI+AL и NI+AL достигается эффект «химичкой печки», что позволяет провести реакцию в ячейках TI+AL без дополнительного внешнего источника тепла, вследствие протекания более сильной экзотермической реакции взаимодействия NI+AL.

Целью исследования. Изучение влияния размера элементарной ячейки на вид и скорость горения системы. Исследование явления погасания гетерогенной смеси реагентов в окрестности теплового и концентрационного пределов распространения проведено в работе [1]. Было выяснено, что при исследовании самоподдерживающихся волн горения необходимо учитывать флуктуации пространственного распределения реагентов. Также были найдены критические показатели, характеризующие асимптотическое поведение волны горения вблизи пределов погасания. В работе [2] рассмотрено горение гетерогенных смесей с зависимостью скорости реакции от температуры, описываемой ступенчатой функцией.

Методология. Образец представляет собой регулярное чередование элементарных ячеек с различными теплофизическими параметрами, кото-

рые состоят из безгазовых смесей TI+AL и NI+AL, соответственно. При таком чередовании смесей TI+AL и NI+AL достигается эффект «химической печки», что позволяет провести реакцию в ячейках TI+AL без дополнительного внешнего источника тепла, вследствие протекания более сильной экзотермической реакции взаимодействия NI+AL.

Математическая модель горения многокомпонентной безгазовой смеси включает в себя безразмерные уравнение теплопроводности и уравнение химической кинетики.

$$\frac{\partial \theta_{i,j}}{\partial \tau} = S_{i,j} \left(\frac{\partial^2 \theta_{i,j}}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \theta_{i,j}}{\partial \psi^2} \right) + p_{i,j} W(\theta_{i,j}, \eta_{i,j}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \eta_{i,j}}{\partial \tau} = \Gamma_{i,j} W(\theta_{i,j}, \eta_{i,j}) \quad (2)$$

Приведенная система дополняется сопряженными граничными условиями теплообмена между ячейками, условиями на внешних границах образца прямоугольной формы и начальными условиями. Численное решение уравнения (1) получено методом покоординатного расщепления с использованием неявной схемы. Для аппроксимации тепловых потоков использовались центральные разности.

Результаты численного решения задачи были получены температурные поля для образца с различными размерами элементарной ячейки. Чтобы выяснить при каких безразмерных значениях размера элементарной ячейки происходит наиболее быстрое горение образца, была проведена серия расчетов для различного значения размера ячейки $d=4; 8; 16; 32$. В ходе численного решения задачи были получены и проанализированы температурные поля для образца с различными размерами элементарной ячейки. Расчеты показали, что с увеличением размера элементарной ячейки время горения значительно увеличивается, т.е. уменьшается средняя скорость горения образца. Как видно из рис. 1, при практически одинаковом значении безразмерного времени прохождения химической реакции, фронт горения проходит более значительное расстояние в системе с меньшим масштабом гетерогенности. С увеличением размера элементарной ячейки время горения значительно увеличивается, т.е. уменьшается средняя скорость горения образца. При малом размере ячейки (масштабе гетерогенности) фронт горения становится однородным, тем самым увеличивая скорость прохождения химической реакции.

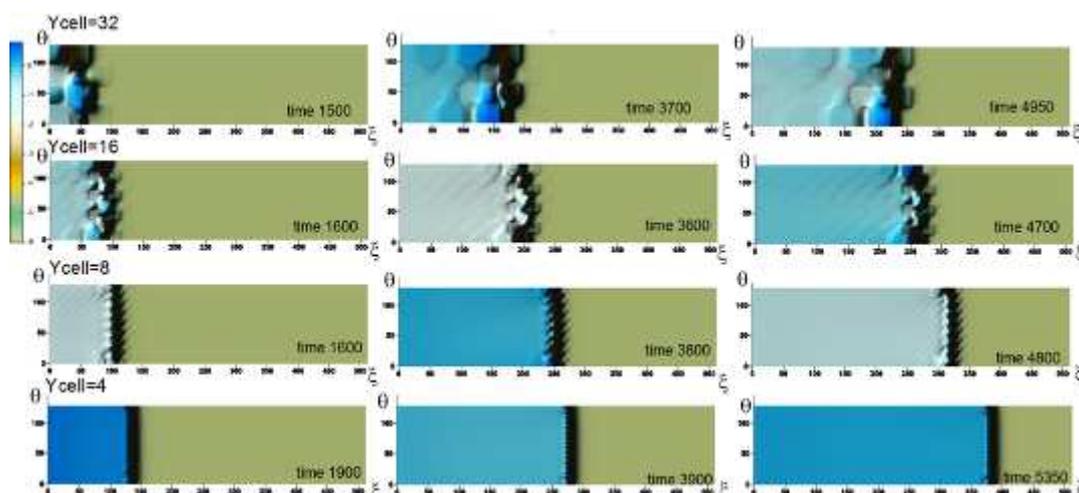


Рис. 1. Температурное поле образца в зависимости от масштаба гетерогенности (Y_{cell} – размер элементарной ячейки, $\Lambda_A = \frac{\lambda_A}{\lambda_D} = 0.1341$, $Ar = 0.1$, $\theta_0 = -6$, $L=512$, $Y=128$)

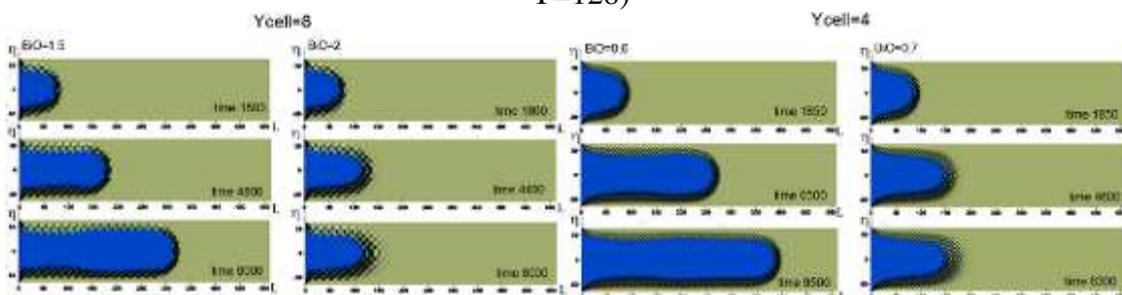


Рис. 3. Концентрационное поле образца (Y_{cell} – размер элементарной ячейки, $\Lambda_A = \frac{\lambda_A}{\lambda_D} = 0.1341$, $Ar = 0.1$, $\theta_0 = -6$, $L=512$, $Y=128$)

Также были найдены пределы горения ячеистой системы при внешнем теплоотводе с поверхности образца – увеличение размера элементарной ячейки способствует расширению пределов горения образца.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-03-00081.

Литература/ References

1. Grinchuk P.S. Combustion of heterogeneous systems with a stochastic spatial structure near the limits of propagation // Physical Engineering Journal. 2013. Т. 86, No. 4. From 819–830.
2. Grinchuk P.S., Rabinovich O.S. Percolation phase transition during combustion of heterogeneous mixtures. // Physics of combustion and explosion. 2004. Т. 40, № 4. С. 41–53.
3. Krishenik P.M., Rogachev S.A., Shkadinsky K.G. Unsteady transformations in thin two-component films: a model taking into account random particle size distribution // Intern. J. of SHS. 2012. Vol. 21, № 2. P. 75–82.

МЕТОДЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ПАРАМЕТРОВ ПРИ НАСТРОЙКЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Н.В. Шапошникова, Я.С. Ганжа

Сибирский государственный университет науки и технологий
им. академика М.Ф. Решетнева
shapninel@yandex.ru, yanavaio@yandex.ru

Ключевые слова: нейронная сеть, предварительная обработка данных, методы предварительной обработки данных.

Аннотация. В данной статье говорится о широком применении нейросетевых технологий в различных областях человеческой деятельности. Представлены преимущества использования нейронной сети, её особенности работы. Приведены различные методы предварительной обработки данных. Представлены метод сглаживания эмпирических данных, метод масштабирования, метод факторного анализа. Рассматриваются их особенности и различия. Показаны результаты исследования влияния методов предварительной обработки данных на эффективность работы нейронной сети на примере задачи классификации Ирисов.

METHODS PREPROCESSING SETTINGS WHEN SETTING UP A NEURAL NETWORK

N.V. Shaposhnikova, Y.S. Ganzha

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology (Reshetnev University)
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
hapninel@yandex.ru, yanavaio@yandex.ru

Keywords: neural network, data preprocessing, data pre-processing methods.

Abstract. This article deals with the widespread use of neural network technologies in various fields of human activity. The advantages of using a neural network, its features work. Various methods for preprocessing are given. The method of smoothing empirical data, the method of scaling, the method of factor analysis are presented. We consider their features, the differences between them. The results of the study of the impact of data preprocessing methods on the efficiency of the neural network are presented on the example of the Iris classification problem.

В настоящее время нейросетевые технологии широко применяются в различных областях человеческой деятельности. Основное преимущество нейронной сети (НС) – самообучение. Данное свойство позволяет НС справляться со сложными задачами, решение которых на сегодняшний день считается трудоемким.

Однако эффективность работы НС напрямую зависит от формы представления данных, содержания и пр. Именно для этого существуют методы

предварительной обработки, которые позволяют существенно улучшить входные данные и упростить процесс обучения. По этой причине актуально исследовать современные методы, которых часто используются при работе с НС.

Любые методы обработки данных, так или иначе, используются для структурирования и анализа существующей информации [1]. Задач по анализу информации много, мы рассмотрим именно методы, которые эффективно работают для решения задач по структурированию данных [1]

Метод сглаживания эмпирических данных представляет собой замену данной таблицы опытных точек другой таблицей близких точек, лежащих на достаточно гладкой кривой [2]. Сглаживание производится с помощью многочленов, приближающих по методу наименьших квадратов выбранные группы опытных точек [2]. Для нелинейных зависимостей, близких к параболическим или содержащих отрезки парабол, нелинейное сглаживание гораздо более эффективно, чем линейное, но и здесь гладкость кривой сглаживания невелика [2]. Формулы сглаживания многочленами более высоких степеней почти не применяются, формулы сглаживания по большому числу точек применяются крайне редко, так как они оставляют плохо сглаженными слишком большое количество точек по краям таблицы [2].

Недостатками метода считаются чувствительность к ошибкам, неустойчивость к выбросам, неудобные для расчетов формулы, медленное достижение относительно точного результата, большая погрешность.

Достоинства метода в простоте и не сложной технической реализации [2].

В целом сглаживание является эффективным инструментом предварительной обработки исходных данных. Затем можно использовать более тонкие методы их обработки [2].

Метод масштабирования. Масштабирование заключается в умножении передаваемого значения на фактор масштабирования и добавлении некоторого смещения. Механизм ограничения гарантирует то, что результат масштабирования не превысит верхнюю или нижнюю границу. Это ограничение – еще одно дополнение к тем жестким ограничениям, которые накладывает передаточная функция [3]. Масштабирование (нормализация) входных данных – это процесс, при котором все входные данные проходят процесс "выравнивания", т.е. приведения к интервалу [0,1] или [-1,1] [4]. Если не провести нормализацию, то входные данные будут оказывать дополнительное влияние на нейрон, что приведет к неверным решениям. В общем виде формула нормализации (1) выглядит так [4]:

$$y = \frac{(x - x_{\min})(d2 - d1)}{x_{\max} - x_{\min}} + d1 \quad (1)$$

где x – значение, подлежащее нормализации; $x_{\max} - x_{\min}$ – интервал значений x ; $[d_2; d_1]$ – интервал, к которому будет приведено значение x .

Метод факторного анализа. В случае наличия большого числа параметров (более 100) можно сгруппировать параметры и анализировать уже не каждый параметр в отдельности, а группы параметров как единый комплексный параметр (фактор) [5]. В основе факторного анализа лежит идея о том, что за сложными взаимосвязями явно заданных признаков стоит относительно более простая структура, отражающая наиболее существенные черты изучаемого явления, а «внешние» признаки являются функциями скрытых общих факторов, определяющих эту структуру [5].

Применение факторного анализа позволяет уменьшать (редуцировать) число рассматриваемых параметров, находить осмысленные группы параметров, каждая из которых будет являться одним самостоятельным параметром [5].

Спецификой этого метода является то, что при объединении параметров в факторы каждый фактор аккумулирует в себе общие закономерности во всех параметрах, отбрасывая особенности каждого параметра в отдельности [5].

Факторный анализ позволяет решить две важные проблемы исследователя: описать объект измерения всесторонне и в то же время компактно [5]. С помощью факторного анализа возможно выявление скрытых переменных факторов, отвечающих за наличие линейных статистических корреляций между наблюдаемыми переменными.

Таблица 1. Результаты тестирования методов обработки данных с различными настройками НС для решения задачи классификации

Метод	Количество нейронов на слое						Среднее
	20		60		100		
	Количество слоев НС						
	2		4		8		
	Метод обучения НС						
	ГА	Back- прогр.	ГА	Back- прогр.	ГА	Back- прогр.	
	Точность классификации на обучающей выборке на тестовой выборке, %						
Сглаживание	32,8 30,1	29,1 24,5	30,5 28,7	27,8 25,5	25,8 21,2	23,9 19,4	28,3 29,98
Факторный анализ	41,5 36,9	36,8 30,8	50,6 47,2	52,7 50,7	89,2 85,5	88,6 81,5	56,9 66,72
Масштабирование	74,4 68,2	71,4 70,4	79,8 65,8	78,3 70,8	83,4 80,7	82,2 78,9	78,2 86,96
Среднее по алгоритму обучения	49,6 45,1	45,8 41,9	53,6 47,2	52,9 59	66,1 59,2	64,9 59,9	

Основные цели факторного анализа заключаются в определении взаимосвязей между переменными (классификация переменных), сокращении числа необходимых для описания данных переменных [5].

Анализ влияния методов предварительной обработки данных и параметров НС был осуществлен в разработанной программной системе. Для исследования эффективности разработанного подхода использовалась задача классификации Ирисов.

Результаты тестирования методов обработки данных с различными настройками НС для решения задачи классификации представлены в табл. 1. По результатам, приведенным в таблице, можно судить об эффективности и целесообразности применения в задачах обработки данных. Исследования показали важность и необходимость предварительной обработки для повышения качества обучения НС. Без качественных данных не будет качественных результатов их анализа.

Литература

1. *Алексёнок А.А.* Поиск взаимозависимостей и классификация объектов эмпирического социологического исследования // Известия ТулГУ. Гуманитарные науки. 2010. №1.
2. Метод «сглаживание» [Электронный ресурс]: <http://www.mate.oglib.ru/bgl/796/129.html>
3. Технология искусственных нейронных сетей [Электронный ресурс]: <http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2006/>
4. Нейронные сети: От теории к практике [Электронный ресурс]: <https://www.mql5.com/en/articles/497>
5. *Бююль А., Цёфель П.* SPSS: Искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей. СПб.: ООО «ДиасофтЮП», 2002. 603 с.

References

1. *Alekseenok A.A.* Search for interdependencies and classification of objects of empirical sociological research // Izvestiya TulGU. Humanitarian sciences. 2010. № 1.
2. The method of "smoothing" [Electronic resource]: <http://www.mate.oglib.ru/bgl/796/129.html>
3. Technology of artificial neural networks [Electronic resource]: <http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2006/>
4. Neural networks: From theory to practice [Electronic resource]: <https://www.mql5.com/en/articles/497>
5. *Byyul A., Cefel P.* SPSS: The art of information processing. Analysis of statistical data and the restoration of hidden patterns. SPb.: : ООО "DiSoftTUP", 2002. 603 p.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ РАЗЛАДКИ ВО ВРЕМЕННЫХ РЯДАХ

А.О. Шерстобитова, Т.В. Емельянова

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
annasherstobitova06@gmail.com

Ключевые слова: модели временных рядов, разладка, механизм генерации.

Аннотация. Рассматривается проблема разделения временных рядов произвольной природы на сегменты, порожденные одним механизмом, а также обнаружения момента смены одного механизма генерации другим.

SEQUENTIAL DETECTION OF CHANGEPOINTS IN TIME SERIES

A.O. Sherstobitova, T.V. Emelyanova

National Research Tomsk State University, Russian Federation
annasherstobitova06@gmail.com

Keywords: time series models, changepoint, generation mechanism.

Abstract. We consider the problem of separating time series of arbitrary nature into segments generated by one mechanism, as well as detecting the moment of changing one generation mechanism by another.

В анализе данных актуальной задачей является обработка неоднородных временных рядов, порожденных различными механизмами генерации. В конце XX в. была высказана идея о том, что задача обнаружения изменений в любой вероятностной характеристике случайного процесса может быть сведена к задаче обнаружения изменений математического ожидания в специальном диагностическом процессе, построенном на основе исходного ряда данных [1]. Эта идея позволяет обнаружить изменение любых вероятностных характеристик, а также осуществлять сегментацию временного ряда. В работе рассматривается проблема сегментации временных рядов произвольной природы на однородные сегменты. Кроме того, решается задача обнаружения точного момента смены одного механизма генерации другим на примере модели ARCH(2).

Пусть $X = \{x(t)\}_{t=1}^N$ – временной ряд с неизвестными моментами смены механизма генерации $t_i, i = 2, \dots, k$. Механизмы генерации ряда неизвестны.

Отрезки ряда $[t_i, t_{i+1}]$, $t_1 = 1, t_{k+1} = N$, которые генерируются одним и тем же механизмом, называем однородными. Б. С. Дарховским была сформулирована и доказана теорема [2], согласно которой связь ε -сложности функции

гельдерова класса, заданной конечным набором своих отсчетов на равномерной решетке с погрешностью аппроксимации ε характеризуется парой действительных чисел (A, B) , называемых коэффициентами сложности [2].

Ключевая идея предлагаемой методологии заключается в предположении о том, что на i -м сегменте $[t_i, t_{i+1}]$ временного ряда X_t для $t_i \leq t, t+n < t_{i+1}$ коэффициенты сложности удовлетворяют соотношению

$$R(j) = R_i + \xi^i(j), \quad (1)$$

где R_i – математическое ожидание последовательности $R(j)$ на отрезке $[t_i, t_{i+1}]$, а $\xi^i(j)$ – последовательность случайных величин.

На практике часто необходимо знать номер наблюдения, на котором происходит смена механизма генерации либо фиксируется аномальное поведение данных, не характерное для наблюдаемого ряда данных. В связи с этим предлагается модификация метода сегментации Б.С. Дарховского, которая позволяет получить конкретный номер наблюдения, с зафиксированной аномалией. В каждом эксперименте генерируется ряд данных, затем выполняется разделение полученного ряда на «окна» размера n . Каждое «окно» обрабатывается методом наименьших квадратов и определяются коэффициенты зависимости (A, B) . Далее с помощью скользящего окна выполняется обнаружение момента изменения механизма генерации («разладки») ряда. При помощи алгоритма, основанного на статистике

$$Y(s, \delta) = \left(\frac{(N_1 - s)s}{N_1^2} \right)^\delta \left(\frac{1}{s} \sum_{k=s+1}^{N_1} z(k) - \frac{1}{N_1 - s} \sum_{k=s+1}^{N_1} z(k) \right), \quad (2)$$

где $0 \leq \delta \leq 1, 1 \leq s \leq N_1 - 1, N_1 = \left[\frac{N}{n} \right], Z = \{z(k)\}_{k=1}^{N_1}$ – реализация компонент диагностической последовательности R [1], определяются моменты «разладки».

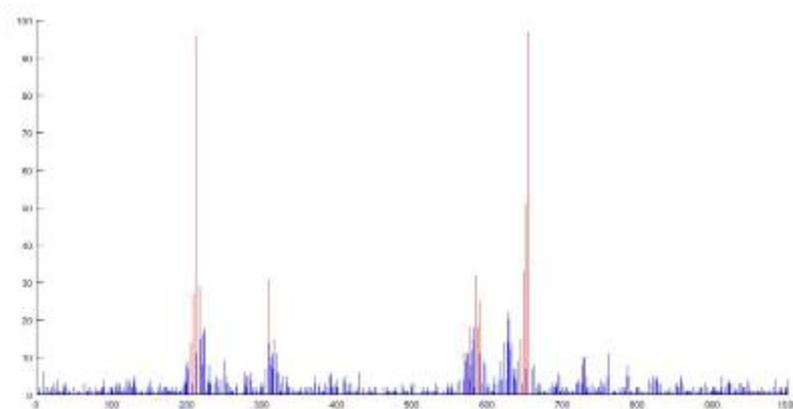


Рис. 1. Результаты численного моделирования: обнаружение точного момента смены механизма генерации для модели ARCH (2)

В работе проведено имитационное моделирование, результаты которого показали, что алгоритм сегментации Б.С. Дарховского позволяет не только выполнить сегментацию ряда данных на подмассивы, порожденные разными механизмами генерации, но и выполнить обнаружение аномалий в ряде данных и получить точное значение момента смены одного механизма генерации другим.

Литература

1. *Бродский Б.Е., Дарховский Б.С.* Непараметрическая статистическая диагностика: проблемы и методы. Dordrecht: Kluwer, 2000.
2. *Дарховский Б.С., Пирятинская А.* Новый подход к проблеме сегментации временных рядов произвольной природы // Труды института математики им. Стеклова, № 287. С. 54–67.

References

1. *Brodsky B.E., Darkhovsky B.S.* Non-parametric statistical diagnosis: Problems and methods. Dordrecht: Kluwer, 2000.
2. *Darkhovsky B.S., Piryatinska A.* New approach to the segmentation problem for time series of arbitrary nature: Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics. 2014. Vol. 287. Pp. 54–67.

Именной указатель

А

Абдразаков А.К. 61
Алигасанова К.Л. 79, 87
Азин А.В. 205
Ананьева М.В. 39, 47, 51, 54
Антонов Д.В. 208
Архипов В.А. 228, 237
Ахметов А.Ж. 212
Ахметшин Л.Р. 123

Б

Барашиков В.Н. 81
Банников М.В. 137
Басалаев С.А. 228, 237
Бахтигараев Н.С. 180
Белоусова Н.С. 42
Беляев С.А. 84
Блинкова Е.В. 177
Бордовицына Т.В. 13, 197
Боровиков С.С. 215
Брендаков В.Н. 231
Будаев А.Ю. 44
Бульба Е.Е. 239
Бургомистренко Р.Ю. 79, 87

В

Валиева Л.Е. 218
Васильев А.С. 90
Верещагин С.В. 191

Г

Газенаур Н.В. 39, 47, 51, 54
Галкина В.В. 39, 47, 51, 54
Галушина Т.Ю. 185
Ганжа Я.С. 260
Гимаева Н.Р. 157
Глазырин В.П. 23
Глотов О.Г. 42
Горбенко Т.И. 140
Гуськов А.В. 42, 58, 69
Гриф Е.М. 58
Гынгазов Д.В. 61

Д

Даутбаева Д.Б. 126
Доненко А.В. 160, 220
Дульнев А.И. 44

Ж

Жуков А.С. 147
Жукжанова А.Т. 224

З

Загородкин О.Н. 126
Захарова Е.А. 226
Зелепугин С.А. 143, 150
Золоторёв Н.Н. 228

Е

Евсеев Н.С. 93
Емельянова Т.В. 264
Еремин И.В. 87
Еремина Г.М. 96
Ерошенко А.Ю. 137

И

Иващенко Я.О. 128

К

Казанцева Е.А. 128
Капралова А.С. 64
Каравацкий А.К. 131
Ким В.В. 231
Комарова Е.Г. 128
Костюшин К.В. 79, 106, 114
Кульков А.С. 134

Л

Лага Е.Ю. 163
Ле Ван Тунг 234
Левкина П.А. 180, 183
Летнер О.Н. 185
Лукьяненко В.А. 220

М

Макаров П.В. 212
Малюга Н.В. 99
Матвеев С.А. 64
Матыко К.С. 102
Марицкий Н.Н. 99
Майнагашева А.А. 189
Майрамбекова А.М. 137
Маслов Е.А. 32, 163
Матвеев С.А. 118
Мацкевич В.В. 163

Милевский К.Е. 58, 61, 72
Микушина В.А. 134
Мурзина К.Э. 118
Мухин Л.Н. 13

Н

Назарова В.П. 90

О

Онищук С.Ю. 166
Орлов М.Ю. 23
Орлов Ю.Н. 23, 66
Орлова М.П. 140
Орлова Ю.Н. 66

П

Павлова А.В. 253
Парпура Д.И. 96
Пашков С.В. 27
Перфильева К.Г. 237
Полянская А.В. 239
Пономарев С.В. 99, 131, 205
Попов А.А. 143
Поленчук С.Н. 228, 237
Постникова Е.С. 191
Пристай А.М. 111
Прокофьев В.Г. 256
Пурин М.В. 243

Р

Разва А.С. 215
Рикконен С.В. 205

С

Савкина Н.В. 32
Самбаров Г.Е. 194
Серебрянников А.А. 245
Середа М.С. 106, 114
Скибина Н.П. 32, 169

Смолин И.Ю. 102, 134, 212
Соломаха А.Е. 249
Сюсина О.М. 194

Т

Темербеков В.М. 109
Телятников И.С. 253
Толынбеков А.Б. 147
Томилова И.В. 177, 197

У

Уванов М.И. 69
Угольков М.А. 163

Ф

Фазылов Т.В. 111
Фарапонов В.В. 32, 163
Федотов А.Н. 163

Х

Халеменчук В.П. 72
Хребтова М.С. 172
Худякова Т.И. 256

Ч

Чазов В.В. 180
Червакова А.В. 106, 114
Чернышов М.В. 64, 118
Чувашов И.Н. 200

Ш

Шапошникова Н.В. 260
Шевченко М.Ю. 81
Шерстобитова А.О. 264

Я

Янов Д.В. 150

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	9
-------------------	---

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

<i>Бордовицына Т.В.</i> Основные особенности динамики окололунных объектов	13
<i>Мухин Л.Н.</i> Возможности трудоустройства выпускников вузов физико-математических направлений подготовки	18
<i>Орлов М.Ю., Глазырин В.П., Орлов Ю.Н.</i> Исследование разрушения льда при ударных и взрывных нагрузках	23
<i>Пашков С.В.</i> Вероятностный подход при моделировании задач динамического разрушения.....	27
<i>Скибина Н.П., Савкина Н.В., Фарапонов В.В., Маслов Е.А.</i> Численный анализ газодинамических параметров при сверхзвуковом обтекании модели в рабочей части импульсной аэродинамической установки.....	32

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

<i>Ананьева М.В., Галкина В.В., Газенаур Н.В.</i> Двухфотонное поглощение излучения второй гармоники неодимового лазера прессованными таблетками пентаэритриттетранитрата	39
<i>Белюсова Н.С. Глотов О.Г., Гуськов А.В.</i> Исследование траектории свободного падения частиц при горении монолитных частиц титана	42
<i>Будаев А.Ю., Дульнев А.И.</i> Экспериментальная оценка баллистической стойкости защитных структур с использованием сверхвысокомолекулярного полиэтилена.....	44
<i>Галкина В.В., Газенаур Н.В., Ананьева М.В.</i> Взрывное разложение PETN, сенсibiliзировавшего наночастицами меди и оксида меди.....	47
<i>Галкина В.В., Газенаур Н.В., Ананьева М.В.</i> Моделирование спектральных зависимостей оптических свойств композитов на основе прозрачной матрицы и наночастиц кобальта	51
<i>Газенаур Н.В., Ананьева М.В., Галкина В.В.</i> Модель микроочагового инициирования лазерным импульсом конденсированных взрывчатых веществ	54
<i>Гриф Е.М., Гуськов А.В., Милевский К.Е.</i> Кумулятивный заряд кольцевой формы Облицовки.....	58
<i>Гынгазов Д.В., Абдразаков А.К., Милевский К.Е.</i> Обзор методов ликвидации снежных лавин.....	61
<i>Капралова А.С., Матвеев С.А., Чернышов М.В.</i> Устройство комбинированного типа для подавления поражающих факторов детонации конденсированного вещества.....	64
<i>Орлова Ю.Н.</i> Исследование процесса подрыва заснеженного ледяного покрова эмульсионной взрывчаткой.....	66
<i>Уванов М.И., Гуськов А.В.</i> Моделирование взрывного нагружения стали Гадфильда в программном комплексе Ansys	69
<i>Халеменчук В.П., Милевский К.Е.</i> Пробитие пробойником гомогенной брони	72

Секция 2. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ, ПРОГРАММЫ И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД

<i>Алигасанова К.Л., Костюшин К.В., Бургомистренко Р.Ю.</i> Программа расчета потерь на трение и рассеяние в соплах ракетных двигателей	79
<i>Барашков В.Н., Шевченко М.Ю.</i> Упругопластическое напряженно-деформированное состояние и прочность толстостенной трубы при действии внутреннего давления	81
<i>Беляев В.А.</i> Решение бигармонического уравнения в нерегулярных областях методом коллокации и наименьших квадратов	84
<i>Бургомистренко Р.Ю., Алигасанова К.Л., Еремин И.В.</i> Разработка программы расчета для определения распределения тепла в многослойных пластинах	87
<i>Васильев А.С., Назарова В.П.</i> Разработка методики расчета конструкций из композитных материалов.....	90
<i>Евсеев Н.С.</i> Моделирование процесса классификации порошков нитридов металлов	93
<i>Ермина Г.М., Парпура Д.И.</i> Исследование влияния параметров тонкого покрытия на механическое поведение системы “покрытие–подложка” при измерительном индентировании	96
<i>Марицкий Н.Н., Малюга Н.В., Пономарев С.В.</i> Численное моделирование элементов пьезопроводов	99
<i>Матыко К.С., Смолин И.Ю.</i> Изучение влияния пористости и морфологии пор на механические характеристики пористых керамик методами численного моделирования	102
<i>Середа М.С., Червакова А.В., Костюшин К.В.</i> Программа расчета нестационарных рабочих характеристик в камерах сгорания РДТТ	106
<i>Темербеков В.М.</i> Расчет взаимодействия ударных волн со сферами различного диаметра в водородо-воздушной смеси	109
<i>Фазылов Т.В., Пристай А.М.</i> Численное моделирование процесса соударения ударника с жесткой стенкой при низкоскоростном ударе	111
<i>Червакова А.В., Костюшин К.В., Середа М.С.</i> Разработка инженерного приложения для расчета основных параметров течения газа в сопле Лавалея с учетом противодавления.....	114
<i>Чернышов М.В., Матвеев С.А., Мурзина К.Э.</i> Теоретическое обоснование реактивного двигателя комбинированного типа.....	118

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

<i>Ахметшин Л.Р.</i> Влияние кумулятивной пластической деформации в формировании структуры металлов с ГПУ решеткой.....	123
<i>Загородкин О.Н., Даутбаева Д.Б.</i> Модификация структуры алюминия методом интенсивной пластической деформации	126
<i>Иващенко Я.О., Комарова Е.Г., Казанцева Е.А.</i> Изучение структурно-морфологических свойств микродуговых стронций-кремний-содержащих кальцийфосфатных покрытий	128
<i>Каравачкий А.К., Пономарев С.В.</i> Экспериментальное исследование температурных деформаций композиционных шнуров.....	131
<i>Микушина В.А., Смолин И.Ю., Кульков А.С.</i> Исследование прочностных характеристик алюмооксидной керамики с различным значением пористости	134

<i>Майрамбекова А.М., Ерошенко А.Ю., Банников М.В.</i> Исследование усталостного разрушения титана VT1-0 и сплава ZR-1 мас. % Nb в режиме гигацикловой усталости.....	137
<i>Орлова М.П., Горбенко Т.И.</i> Влияние добавки KNO ₃ на термодинамические характеристики смесевой композиции.....	140
<i>Попов А.А., Зеленугин А.С.</i> Характер разрушения металло-интерметаллидных слоистых композиционных материалов при скоростях удара до 5000 м/с	143
<i>Толынбеков А.Б., Жуков А.С.</i> Горение хрома в спутном потоке азотосодержащего газа	147
<i>Янов Д.В., Зеленугин С.А.</i> Численный расчет процесса динамического канально-углового прессования медных образцов.....	150

Секция 4. БАЛЛИСТИКА И НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА

Подсекция 4.1. БАЛЛИСТИКА

<i>Гимаева Н.Р.</i> Теоретическое исследование газодинамических параметров при обтекании призмы при разных углах атаки.....	157
<i>Доненко И.Л.</i> Создание фрактальных баллистических траекторий для усовершенствования точностных характеристик артиллерийских систем залпового огня	160
<i>Мацкевич В.В., Фараонов В.В., Маслов Е.А., Угольков М.А. Федотов А.Н., Лага Е.Ю.</i> Экспериментальное исследование распределения температуры в канале модельного прямоточного воздушно-реактивного двигателя при обтекании сверхзвуковым потоком.....	163
<i>Онищук С.Ю.</i> Определение удельного заряда, необходимого для увода космического мусора с помощью силы Лоренца по спирали Архимеда.....	166
<i>Скибина Н.П.</i> Численный расчет параметров сверхзвукового обтекания модели в рабочей части импульсной аэродинамической установки.....	169
<i>Хребтова М.С.</i> Вопрос о стабилизации давления форсирования при выстреле	172

Подсекция 4.2. Небесная механика

<i>Блинкова Е.В., Томилова И.В.</i> Орбитальная эволюция объектов, движущихся в окрестности резонанса 1:3 с вращением земли, в условиях наложения резонансов различных типов.....	177
<i>Левкина П.А., Бахтигараев Н.С., Чазов В.В.</i> Характеристики объектов космического мусора по данным поисковых наблюдений в обсерватории на пике Терскол	180
<i>Левкина П.А.</i> Результаты наблюдений избранных объектов космического мусора в ИНАСАН.....	183
<i>Летнер О.Н., Галушина Т.Ю.</i> Исследование динамики астероида 137924 2000 VD19, имеющего малое перигелийное расстояние.....	185
<i>Майнагашева А.А.</i> Программный инструмент для моделирования метеороидных потоков	189
<i>Постникова Е.С., Верещагин С.В.</i> Поиск метеорных потоков, порожденных кометами с 1983 H1(ИРАС-АРАКИ-АЛЬКОКА), с 1979 Y1 (БРЭДФИЛДА), 1P/ГАЛЛЕЯ И 141P/МАЧХОЛЬЦА 2	191
<i>Самбаров Г.Е., Сюсина О.М.</i> Динамика ядра метеорного потока Квадрантиды между 1750 и 2020 годами.....	194

<i>Томилова И.В., Бордовицына Т.В.</i> Эффект и резонанс Лидова–Козаи в динамике околорунных объектов	197
<i>Чувашов И.Н.</i> Оценка вероятности столкновения объектов космического мусора	200

Секция 5. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

<i>Рикконен С.В., Азин А.В., Пономарев С.В.</i> Применение виброструйной гидродинамической технологии сохранения текучести углеводородных топлив и нефтепродуктов в условиях Сибири и Арктики	205
<i>Антонов Д.В.</i> Экспериментальное исследование процессов микровзрыва падающих двухжидкостных капель при интенсивном нагреве	208
<i>Ахметов А.Ж., Смолин И.Ю., Макаров П.В.</i> Численное исследование напряжений и неупругих деформаций в зонах коллизии в районе Енисейского кряжа	212
<i>Боровиков С.С., Разва А.С.</i> Усовершенствование системы очистки гранулированного полиэтилена от технологических примесей	215
<i>Валиева Л.Е.</i> Экспериментальное исследование процесса зажигания частицы водоугольного топлива	218
<i>Доненко А.В., Лукьяненко В.А.</i> Решение нелинейных параболических уравнений для моделирования фотонных кристаллов	220
<i>Жукжанова А.Т.</i> Численное моделирование аэродинамики и процесса тепломассопереноса в химическом реакторе	224
<i>Захарова Е.А.</i> Математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса в условиях плавления льда при движении роботизированного комплекса	226
<i>Золоторёв Н.Н., Архипов В.А., Басалаев С.А., Полечук С.Н.</i> Метод измерения коэффициента сопротивления сферической частицы при вдуве газа с ее поверхности	228
<i>Ким В.В., Брендаков В.Н.</i> Математическая модель процесса разложения полиурната аммония	231
<i>Ле Ван Тунг.</i> Алгебраическое хеджевое гибридное управление для приводов тиристора – двигатель постоянного тока с переменной инерцией	234
<i>Перфильева К.Г., Архипов В.А., Басалаев С.А., Полечук С.Н.</i> Исследование коэффициента сопротивления сферических частиц в неизотермических условиях ...	237
<i>Полянская А.Вяч., Бульба Е.Е.</i> Экспериментальное исследование процессов парообразования при температурах ниже температуры кипения в жидкостях с различной степенью минерализации	239
<i>Пурин М.В.</i> Математическое моделирование нагрева металлической пластины потоком лазерного излучения	243
<i>Серебрянников А.А.</i> Исследование условий образования кристаллов парафинов в скважинах, вскрывающих палеозойские отложения	245
<i>Соломаха А.Е.</i> Инженерный метод расчета процесса сепарации в шнековой центрифуге	249
<i>Телятников И.С., Павлова А.В.</i> К исследованию вибрации материалов с покрытиями при наличии дефектов	253
<i>Худякова Т.И., Прокофьев В.Г.</i> Дискретная модель горения многокомпонентной безгазовой смеси $Ti+Al$ и $Ni+Al$	256
<i>Шапошникова Н.В., Ганжа Я.С.</i> Методы предварительной обработки параметров при настройке нейронной сети	260
<i>Шерстобитова А.О., Емельянова Т.В.</i> Последовательное обнаружение разладки во временных рядах	264
ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ	267

CONTENTS

PREFACE	10
----------------------	----

PLENARY SESSION

<i>Bordovitsyna T.V.</i> The main features of the near lunar object's dynamics.....	13
<i>Mukhin L.N.</i> Opportunities of employment of graduates – physicists and mathematicians	18
<i>Orlov M.Yu., Glazyrin V.P. and Orlov Yu.N.</i> Study destruction of ice at shock and explosive loads	23
<i>Pashkov S.V.</i> Probabilistic approach in modeling dynamic fracture problems.....	27
<i>Skibina N.P., Savkina N.V., Faraponov V.V., Maslov E.A.</i> Numerical analysis of gasdynamic parameters of supersonic flow around model in experiment chamber of aerodynamic wind tunnel.....	32

Session 1. EXPLOSION, DETONATION PHENOMENA AND PROPERTIES OF MATTER AT HIGH-INTENSIVE

<i>Ananyeva M.V., Galkina V.V., Gazenaur N.V.</i> Two-photon absorption of second harmonic of neodymium laser by pressed pillet pentaerythrite tetranitrate	39
<i>Belousova N. S., Glotov O. G., Guskov A.V.</i> Study of the free falling particles trajectory at the burning monolithic titanium particles	42
<i>Budaev A.Yu., Dulnev A.I.</i> Experimental ballistic resistance evaluation of protective structures using ultra high molecular weight polyethylene.....	45
<i>Galkina V.V., Gasenaur N.V. Ananyeva M.V.</i> Explosive decomposition of PETN, sensitized by nanoparticles of copper or copper oxide	47
<i>Galkina V.V., Gazenaur N.V. Ananyeva M.V.</i> Simulation of the spectral regularities of the optical properties of composites based on transparent matrix and cobalt nanoparticles	51
<i>Gazenaur N.V., Ananyeva M.V., Galkina V.V.</i> Hot-spot model of laser initiation of condensed explosives.....	55
<i>Grif E. M., Guskov A., Milevskij K.</i> Cumulative charge with a ring-shaped liner	58
<i>Gyngazov D.V., Abdrazakov A.K., Milevsky K.E.</i> Review of methods for the elimination of snow avalanches	62
<i>Kapralova A.S., Matveev St.A. and Chernyshov M.V.</i> Combined device for suppression of damaging effects of detonation of the condensed media	64
<i>Orlova Yu.N.</i> Snow covered ice subjected explosive loading. UNDEX results 2019	67
<i>Uvanov M.I., Guskov A.V.</i> Modeling of explosive loading of Gadfilled steel in the program complex.....	70
<i>Khalemenchuk V., Milevsky K.</i> Punch homogeneous armor	72

Session 2. NUMERICAL METHODS, ALGORITHMS, CODES, AND ACCURATE SOLUTIONS OF THE CONTINIUM MECHANICS

<i>Aligasanova K.L., Kostyushin K.V., Burgomistrenko R.Yu.</i> The program of calculation of friction losses and scattering in the nozzles of rocket motors.....	79
<i>Barashkov V.N., Shevchenko M.Yu.</i> Elastoplastic stress-strain state and strength of thick-walled pipe under the action of internal pressure	82

<i>Belyev V.</i> Solving the biharmonic equation in irregular domains by the least squares collocation method	85
<i>Burgomistrenko R.Yu., Aligasanova K.L., Eremin I.V.</i> The development of a program of calculation to determine the heat distribution in multilayered plates	88
<i>Vasilyev A., Nasarova V.P.</i> Development of methods of calculation of structures made of composite Materials	90
<i>Evseev N.</i> Modeling the process of classification of powders of metal nitrides	94
<i>Eremina G., Parpura D.</i> Investigation of the Influence of Parameters of Thin Coating on Mechanical Behavior of the System "Coating–Substrate" in instrumented Indentation.....	96
<i>Maritsky N., Malyuga N.V., Ponomarev S.V.</i> Numerical analysis of the elements of piezoactuators	100
<i>Matyko K., Smolin I.Yu.</i> Study of the effect of porosity and pore morphology on the mechanical characteristics of porous ceramics using numerical simulation methods	103
<i>Sereda M., Chervakova A., Kostyushin K.</i> Program for calculation of performance characteristics in the combustion chamber of solid fuel rocket engines	106
<i>Temerbekov V.M.</i> Calculation of shock waves interaction with various diameter spheres in a hydrogen-air mixture.....	109
<i>Fazylov T., Pristay A.</i> Numerical modeling of the impact of projectile with a rigid wall under low-velocity impact	111
<i>Chervakova A., Kostyushin K., Sereda M.</i> Development of engineering application for calculation of basic parameters of gas flow in a laval nozzle taking into account backpressure	114
<i>Chernyshov M.V., Matveev St.A., Murzina K.E.</i> Theoretical basis for air-breathing jet engine of the combined type	118

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

<i>Akhmetshin L.</i> The influence of cumulative plastic deformation in the formation of metals structure with GPU lattice	123
<i>Zagorodkin O., Dautbaeva D.</i> Modification of aluminum structure by severe plastic deformation.....	126
<i>Ivaschenko Ya.O., Komarova E.G., Kazantseva E.A.</i> Study of the structural and morphological properties of micro-arc strontium-silicon-containing calcium phosphate coatings	129
<i>Karavatskiy A., Ponomarev S.V.</i> Experimental research of the temperature deformation of composition cords.....	132
<i>Mikushina V.A., Smolin I.Yu., Kulkov A.S.</i> The study of the strength characteristics of alumina ceramics with different porosity values	135
<i>Mairambekova A.M., Eroshenko A.Yu., Bannikov M.V.</i> Study of the fatigue failure of titanium VT1-0 and ZR-1 WT. % NB ALLOY in the gigacycle fatigue mode	137
<i>Orlova M.P., Gorbenko T.I.</i> The effect of the additive KNO ₃ on the thermodynamic characteristics of the mixed composition	140
<i>Popov A.A., Zelepugin A.S.</i> Fracture behavior of metal–intermetallic laminate composites at impact velocities of up to 5000 m/s.....	144
<i>Tolynbekov A., Zhukov A.</i> The combustion of Cr in co-flow of nitrogen containing gas	147
<i>Yanov D.V., Zelepugin S.A.</i> Numerical computation of dcap of copper samples.....	151

Session 4 BALLISTICS AND MECHANICS

Session 4.1 BALLISTICS

<i>Gimayeva N.</i> Theoretical study of gas-dynamic parameters in the flow around a prism at different angles of attack	157
<i>Donenko I.</i> Creation of fractal ballistic trajectories for improvement of accuracy characteristics of artillery systems of volley fire	160
<i>Matskevich V.V., Faraponov V.V., Maslov E.A., Ugolkov M.A., Fedotov A.N., Laga E.Yu.</i> Experimental study of the temperature distribution in the channel of a model ramjet with supersonic flow	164
<i>Onishchuk S.Y.</i> Determination of the specific charge required to remove the spacecraft using Lorentz force in the Archimedes spiral	167
<i>Skibina N.</i> Numerical calculation of parameters for supersonic flow around body in working part of wind tunnel	170
<i>Khrebtova M.M.</i> The issue of boost pressure stabilisation during firing	172

Session 4.2 CELESTIAL MECHANICS

<i>Blinkova E., Tomilova I.</i> Orbital evolution of objects moving in the environment of a 1: 3 resonance with earth rotation, under conditions of impact of resonances of different types	177
<i>Levkina P., Bakhtigaraev N.S., Chazov V.V.</i> Characteristics of space debris objects using search observations at the Terskol peak observatory	181
<i>Levkina P.</i> The results of observations of selected space debris objects in the INASAN	183
<i>Letner O., Galushina T.</i> The study of the dynamics of the asteroid 137924 2000 BD19 with a small perihelion distance	186
<i>Maynagasheva A.</i> Software tool for modeling meteoroid streams	189
<i>Postnikova E., Vereshchagin S.</i> Search for meteor streams generated by comets C 1983 H1(Iras-Araki-Alcock), c 1979 Y1(Breadfield), 1P/Halley and 141P/Machholz.....	191
<i>Sambarov G., Syusina O.</i> The dynamics of the core of the quadrantids meteor shower between AD 1750 AND 2020	194
<i>Tomilova I., Bordovitsyna T.</i> Lidov–Kosai effect and resonance in dynamics of near Lunar objects objects	197
<i>Chuvashov I.</i> Evaluation of the probability of collision of space debris objects	200

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

<i>Rikkonen S.V., Azin A.V., Ponomarev S.V.</i> Application of vibro–jet hydrodynamic technology to preserve the fluidity of hydrocarbon fuels and petroleum products in Siberia and the Arctic	205
<i>Antonov D.</i> Experimental research of microexplosion of falling two–fluid drops at intensive heating	209
<i>Akhmetov A., Smolin I., Makarov P.</i> The numerical investigation of the stresses and non–elastic strains in the collision zones in the Yenisei Ridge	212
<i>Borovikov S.S., Razva A.S.</i> Improvement of a granulated polyethylene cleaning system from technological impurities	215
<i>Valieva L.</i> Experimental study of the ignition process of coal-water fuel	218
<i>Donenko A., Lukyanenko V.A.</i> Solution of nonlinear parabolic equations for modeling photonic crystals.....	221

<i>Zhukzhanova A.</i> Numerical simulation of aerodynamics and process heat and mass transfer in chemical reactor	224
<i>Zakharova E.</i> Mathematical modeling of heat and mass transfer processes in the conditions of ice melting during the movement of a robotic complex.....	226
<i>Zolotarev N., Arkhipov V.A., Basalaev S.A., Polenchuk S.N.</i> Technique of measurement of a resistance coefficient for spherical particle at a gas injection from its surface.....	229
<i>Kim V., Brendakov V.</i> Mathematical model of process of decomposition of ammonium polyuranodon	232
<i>Le Van Tung .</i> Hybrid hedge algebras based control of thyristor converter dc motor drive system with the variable moment of inertia	234
<i>Perfilieva K.G., Arkhipov V.A., Basalaev S.A., Polenchuk S.N.</i> Research of the drag coefficient of spherical particles at non-isothermal conditions.....	237
<i>Polyanskaya A., Bulba E.</i> Experimental study of evaporation processes at temperatures below boiling point in liquids with different degree of mineralization.....	240
<i>Purin M.</i> Mathematical modeling of metal plate heating by laser radiation.....	243
<i>Serebryannikov A.A.</i> The study of conditions for the formation of paraffin crystals in wells opening paleozoic sediments	246
<i>Solomakha A.E.</i> Engineering method of calculation of the separation process in a screw centrifuge.....	250
<i>Telyatnikov I., Pavlova Al.</i> The investigation of vibration of materials with coatings in the presence of defects	253
<i>Khudyakova T.I., Prokofiev V.G.</i> Discrete model of the combustion of amulti component gas lessmixture TI + AL and NI + AL	257
<i>Shaposhnikova N.V., Ganzha Y.S.</i> Methods preprocessing settings when setting up a neural network.....	260
<i>Sherstobitova A.O., Emelyanova T.V.</i> Sequential detection of changepoints in time series.....	264

СПОНСОРЫ И ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ



Российский Фонд
Фундаментальных
Исследований (РФФИ)
Адрес: Россия, 119991,

Москва,

Ленинский проспект, 32а, 20–21 этаж,
В–334, ГСП–1.

Т–н: (499) 586–00–45,
Факс: (495) 938–19–31,
<http://www.rfbr.ru>

eLIBRARY.RU

Российский информационный портал
в области науки, медицины, технологии
и образования.

На платформе аккумулируются полные
тексты и рефераты научных статей и пуб-
ликаций. По состоянию на январь 2014 г.

в базе данных **eLIBRARY.ru** насчиты-
валось 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 универси-
тета был утверждён приказом ректора
ТГУ

за № 527 от 13 ноября 2009 г.

Россия, 634050, Томск,
пр. Ленина, 36
<http://smu.tsu.ru/OSovet>

**АССОЦИАЦИЯ
«СОЮЗВЗРЫВПРОМ»**

ООО Кузбасское специализированное
управление по производству буровзрывных
работ «КузбассСпецВзрыв», производство
взрывных работ и доставка взрывных ма-
териалов до места проведения
взрывных работ

Россия, 650905,
г. Кемерово, ул. Баха, 15А,
Тел/факс (3842) 71–25–34,
бухг. 71–25–38,
E–mail: ksv158@mail.ru,
kuzbassv@mail.ru



**КОМПЬЮТЕРНЫЕ
СИСТЕМЫ**

Научное издание

VIII Всероссийская молодежная научная конференция
«Актуальные проблемы современной механики
сплошных сред и небесной механики»
26–28 ноября 2018 г., Томск

Подписано в печать 08.07.2019 г.
Формат 60x84¹/₁₆... Тираж 100 экз.

ISBN 978-5-6040102-8-0



9 785604 010280