

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Национальный исследовательский Томский государственный университет НИИ прикладной математики и механики ТГУ



Х Всероссийская научная конференция с международным участием «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2020», 18–20 ноября 2020

X All-Russian Scintific Conference with international participation «Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics – 2020», November 18–20, 2020

> Томск 2021

УДК 539.3.004 ББК 22.25; 22.251.22.62 M43

Х Всероссийская научная конференция с международным участием «Актуаль-М43 ные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2020», 18–20 ноября 2020 г.: Материалы конференции / под ред. М.Ю. Орлова. – Томск: Изд-во «Красное знамя». 2021. – 338 с.

ISBN 978-5-6045081-7-6

Представлены пленарные и секционные доклады молодых ученых, изложенные на конференции «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики», прошедшей в г. Томске 18–20 ноября 2020 г.

Для научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов.

УДК 539.3.004 ББК 22.25; 22.251.22.62

ISBN 978-5-6045081-7-6

© Томский государственный университет, 2021 © Издательство «Красное знамя», 2021 Editor Maxim Yu. Orlov National Research Tomsk State University Scientific 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 2019» IXth International Youth Scientific Conference Tomsk, Russia, 18–20 November 2020



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

Sponsoring organizations The Ministry of Education and Science Russia National Research Tomsk State University

> @Tomsk State University Printed in the Russian Federation

X All-Russian Scintific Conference with international participation «Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics – 2020», November 18–20, 2020: The conference proceedings / Ed. M.Yu. Orlov. – Tomsk: Izdatelstvo "Krasnoe znamya", 2021. – 338 p.

ISBN 978-5-6045081-7-6

The book is intended for researcher in field continuum mechanics and celestial mechanics.

© Tomsk State University, 2021 © Izdatelstvo "Krasnoe znamya", 2021

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ:

Со-Председатели:

А.А. Глазунов (НИИ ПММ ТГУ) Э.Р. Шрагер (ТГУ)

Члены программного комитета:

В.А. Архипов (НИИ ПММ ТГУ), Т.В. Бордовицына (НИИ ПММ ТГУ), В.И. Биматов (ТГУ), В.Г. Бутов (НИИ ПММ ТГУ), А.Н. Васильев (СПбПУ), А.Н. Ищенко (НИИ ПММ ТГУ), А.Б. Ворожцов (ТГУ), В.П. Глазырин (НИИ ПММ ТГУ), И.В. Еремин (НИИ ПММ ТГУ), С.Н. Кульков (ТГУ), С.Н. Милейко (ИФТТ РАН), С.В. Разоренов (ТГУ), В.А. Скрипняк (ТГУ), А.В. Шваб (ТГУ), Э.Р. Шрагер (ТГУ)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

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

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

М.Ю. Орлов (НИИ ПММ ТГУ), Н.В. Савкина, к.ф.-м.н., доцент ТГУ; А.А. Козулин, к.ф.-м.н., доцент ТГУ; В.А. Порязов, аспирант ТГУ; А.П. Хрусталев, магистрант ТГУ; Н.С. Евсеев (НИИ ПММ ТГУ), А.М. Пристай, студент ТГУ; Т.В. Фазылов студент ТГУ; К.Г. Перфильева магистрант ТГУ; Е.А. Маслов, к.ф.м.н (НИИ ПММ ТГУ); С.А. Басалаев, к.ф.м.н (НИИ ПММ ТГУ), веб-мастер «Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics – 2020»

Co-Chairs:

Anatoly Glazunov, Ph.D., professor, TSU Ernst Shrager, Ph.D., professor, TSU

Program Committee Members:

V. Arhipov (SRI AMM), T. Bordovitsyna (SRI AMM), V. Bimatov (TSU),

V. Butov (SRI AMM), A. Vorozhtsov Vice-rector of TSU, A. Vasilev (SPbPolyTechU),

V. Glazyrin (SRI AMM), A. Ishchenko (SRI AMM), Iv. Eremin (SRI AMM)

A. Kraynov (TSU), S. Kul'kov (TSU), S. Mileyko (ISPP 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., Universite Joseph Fourier (France),

Yulie Bai, Ph.D, Beijing University of Technology (China),

Abraham Christian, Ph. D. National University of Singapore (Singapore),

U. Johnson Alengaram, Prof. Dr., University of Malaya (Malasia),

Iqbal M.A. Ph.D. Dr. Indian Institute of Technology Roorkee (India),

Al. Filkov, Ph.D. The University of Melbourne,

Mikko Hokka, Ph.D.Tampere University Technology (Finland),

Chengqing Wu, Ph D University of Technology Sydney, (Australia),

Mohamed Abderaouf Louar, Ph. D Royal Military Academy, (Belgium)

Organazing and Technical Committee Members:

M. Orlov (Ph.D., SRI AMM, Committee Chair), A Pristai, T. Fyzylov (TSU Conference Technical Secretary), N. Savkina, A. Kozulin, EV. Poryazov, A. Chrustalev, N. Evseev, K. Perfileva, E. Maslov, S. Basalaev (webmaster)

ОРГАНИЗАЦИИ

НИ Томский государственный университет,

НИИ прикладной математики и механики ТГУ,

НИ Томский политехнический университет,

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

Новосибирский государственный технический университет,

Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН, НИИ механики МГУ,

Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН,

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,

Новосибирский государственный университет,

Томский научный центр Сибирского отделения РАН,

Институт теоретической и прикладной механики им. Христиановича СО РАН,

Кемеровский государственный университет,

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,

Уральский государственный университет путей сообщения,

Новокузнецкий институт (филиал) ФБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»,

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Институт сильноточной электроники СО РАН,

Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема,

Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН,

Пермский государственный национальный исследовательский университет,

Балтийский федеральный университет им. И. Канта,

Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова,

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,

Уральский федеральный университет,

Ярославский государственный университет,

Математический институт Словацкой академии наук,

Институт астрономии Российской академии наук,

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет,

Крыловский государственный научный центр,

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,

Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ,

ООО ШахтЭксперт-Системы,

TOO KazTechInnovations,

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,

Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН,

ООО Газпром Трансгаз, Томск,

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН Кубанский государственный университет

ORGANIZATIONS

National research Tomsk State University,

Scientific Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University,

National Research Tomsk Polytechnic University,

Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of RAS, Novosibirsk State Technical University,

Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion Siberian Branch of RAS,

Institute of mechanics Lomonosov Moscow State University,

Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of RAS,

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS,

Novosibirsk State University,

Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of RAS,

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of RAS,

Kemerovo State University,

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,

Ural State University of Railway Transport,

The Novokuznetsk branch of the Kemerovo State University,

Federal Research Center for Information and Computational Technologies,

National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,

Bauman Moscow State Technical University,

Institute of High Current Electronics SB RAS,

Sholom-Aleichem Priamursky State University,

Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy, Far Eastern Branch of RAS,

Perm State National Research University,

Immanuel Kant Baltic Federal University,

Kalashnikov Izhevsk State Technical University,

Keldysh Institute of Applied Mathematics,

Ural Federal University,

Yaroslavl State University,

Mathematical Institute of the Slovak Academy of Sciences,

Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences,

Novosibirsk State University of Architecture and Civil engineering,

Krylov State Research Centre,

State Marine Technical University,

TOO KazTechInnovations,

Snezhinsk Physics and Technology Institute MEPhI (SPTI MEPHI),

LLC Mining Expert Systems, Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of RAS Gazprom Transgaz, Tomsk, Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the RAS, Kuban State University

введение

Настоящая книга - сборник избранных докладов Х Всероссийской научной конференции с международным участием «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики-2020». Хотя наше мероприятие проходило в условиях пандемии в дистанционном режиме, мы заслушали более 100 докладов из 40 научных организаций. Участниками нашего юбилейного мероприятия были и зарубежные ученые из Словакии, Ирана, Казахстана, Сербии и Индии. Впервые, на секционных заседаниях выступили научные коллективы из НИИ механики МГУ, ИПМ им. А.Ю. Ишлинского, ИГТУ им. М.Т. Калашникова и др. Как и в прошлом году, большинство работ поддержаны различными научными фондами, в том числе РНФ, РФФИ и др. По результатам конференции было опубликовано 5 томов избранных статей в ведущих международных издательствах и проиндексированы в базах Скопус и ВебофСайнс. Мы сделали несколько видео для молодых участников нашей конференции в образовательных целях. Своеобразный рекорд (по количеству иногородних участников) был поставлен первой секцией. Самой массовой уже несколько лет можно назвать последнюю секцию (более 35 докладов).

Мы благодарим всех очных и заочных участников, рецензентов, председателей секций, членов программного и организационного комитетов конференции за помощь в проведении мероприятия. Также благодарим членов международного научного комитета конференции и надеемся на дальнейшее сотрудничество!

Всего наилучшего и до новых встреч, Орлов М.Ю.

EDITOR'S PREFACE

This book contained selected papers of the X All-Russian Scientific Conference with International participation "Current Issues of Continuum Mechanics and Celestial Mechanics-2020". Although our event was held in the context of a pandemic in remote mode, we heard more than 100 reports from 40 scientific organizations. Foreign scientists from Slovakia, Iran, Kazakhstan, Serbia and India also participated in our anniversary event. For the first time, scientific teams from the Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University, the Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, the Kalashnikov Izhevsk State Technical University, and others spoke at the breakout sessions. As in the previous year, most of the works are supported by various scientific foundations, including the Russian Scientific Fund, the Russian Foundation for Basic Research, and others. As a result of the conference, 5 volumes of selected articles were published in leading international publishers and indexed by Scopus and WoS. For the first time, we made several videos for early bird researcher for educational purposes. A kind of record (for the number of nonresident participants) was set by the first session. The last session (more than 35 reports) can be called the most popular for several years.

We would like to thank all participants, reviewers, section chairmen, members of the conference program and organizing committees for their help in organizing the event. Also thank the members of the international scientific committee of the conference and look forward to further cooperation!

> All the best and see you again, Orlov M.Yu.

Секция 1 Взрывные, детонационные процессы и свойства вещества при высокоэнергетических воздействиях

Председатель:

к.ф.-м.н. М.Ю. Орлов

Прикладная механика Газовая динамика Гео-механика Термодинамика Тепломассоперенос Горение и детонация

Session 1 Explosion and detonation processes and properties of matter under high energy impacts

Chair:

Ph.D. Maxim Yu. Orlov

Theoretical and Applied Mechanics Engineering Thermodynamics, Heat and Mass Transfer, Engineering Fluid, Numerical and Computational Physics, Fluid- and Aerodynamics

ВЛИЯНИЕ УГЛА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СНАРЯДА С СЕТОЧНОЙ ПРЕГРАДОЙ

Л.Р. Ахметшин^{1,2}, А.Г.Кушнарев¹, С.В. Пашков¹

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия ²Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, Россия E-mail: akhmetshin.lr@gmail.com

Ключевые слова: высокоскоростное взаимодействие, сеточная преграда, разрушение.

Аннотация. Рассматривается задача взаимодействия высокоскоростного твердого сферического ударного элемента, имитирующего микрометеороид и комбинированного защитного экрана, включающего в себя сеточную преграду. Сеточный слой выполнен из стальной проволоки методом плетения. В результате численного моделирования методом SPH получены результаты поведения защитного экрана и снаряда при разрушении. Проведено сравнение эффективности нескольких вариантов многослойного экрана равной удельной массы с разными углами ориентации сеточного слоя. При небольшом значении угла гофры, разрушение снаряда после контакта с сеточной преградой характеризуется образованием высокоскоростных осколочных потоков, выбрасываемых по направлению удара. При увеличении угла осколочные потоки становятся менее выраженными, возрастает эффект истирания ударника на сетке. Во всех случаях наблюдается уменьшение энергии движущихся частиц за счет активного рассеяния масс осколков.

INFLUENCE OF THE ANGLE INTERACTION OF THE PROJECTILE WITH THE WIRE MESH

L. Akhmetshin^{1,2}, A. Kushnarev¹, S. Pashkov¹

¹National Research Tomsk State University, Russian Federation ²Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of RAS, Russian Federation E-mail: akhmetshin.lr@gmail.com

Keywords: high-velocity numerical modeling, mesh barrier, fracture.

Abstract. The problem of interaction of the high-velocity solid spherical shock element simulating a micrometeoroid and the combined protective screen including the mesh barrier is considered. The mesh layer is made of steel wire by weaving method. As a result of numerical modeling by SPH method the results of the behavior protective wire mesh and projectile are obtained. The effectiveness of several variants of multilayer screen of equal specific mass with different angles of the protective screens orientation is compared. When the angle of the mesh bumper is small, the destruction of the projectile after impact with the mesh bumper is characterized by the formation of high-velocity fragmentation flows ejected in the direction of impact. As the angle increases, the fragmentation flows become less pronounced and the ef-

fect of projectile abrasion on the mesh increases. In all cases, a decrease in the energy of the moving particles is observed due to the active scattering of fragment masses.

Введение. Взаимодействие высокоскоростных ударников, имитирующих микрометеороиды с защитными экранами, является предметом исследования уже достаточно длительное время. Повышение эффективности противометеороидной защиты космических аппаратов связано с оптимальным соотношением массы и надежности, поскольку утяжеление конструкции космического аппарата, как правило, недопустимо из-за ряда ограничений, закладываемых при его проектировании.

Перспективным выглядит использование в качестве элементов комбинированного экрана металлической сетки, позволяющей уменьшить общий вес защитного экрана космического корабля при сохранении его эффективности [1]. Особую эффективность демонстрируют защитные экраны в виде гофрированной металлический сетки, в которых степень дробления ударника может увеличиться более чем в два раза [2] за счёт эффекта «тёрки» на наклонной сетке и увеличения времени взаимодействия.

Целью данной работы являлось оценка влияния угла наклона гофры на эффективность условного гофрированного сеточного экрана при взаимодействии микрометеороида с комбинированным защитным экраном.

Математическая постановка. Численное моделирование в трехмерной геометрии было выполнено на основе полной системы уравнений МДТТ методом гладких частиц (SPH) с помощью лицензионного пакета LS-DYNA. Отсутствие конечно элементной сетки позволяет методом SPH естественно моделировать фрагментацию взаимодействующих элементов и движение облака осколков при высокоскоростном ударе, отмечается хорошая корреляция с натурными испытаниями [3].

В большинстве высокоскоростных экспериментов в качестве частицы, выступающей снарядом, используется шарик из Al-сплава, так как он по размеру и плотности близко соответствует хондритам, наиболее распространённым на околоземной орбите микрометоероидам. Поэтому в качестве материалов, используемых в данной работе, выбраны сплав алюминия – снаряд, бампер, сталь – сеточная преграда. Для описания механического поведения снаряда и сеточной преграды при высокоскоростном взаимодействии взято уравнение состояние Ми–Грюнайзена, как функция скорости частицы vs(vp) определяет давление для сжатых материалов, а в качестве определяющих соотношений, описывающих поведение упругопластического тела взята модель Джонсона–Кука. Подобная модель, используемая в данной работы, встречается в работах авторов [4]. Верификация модели подтверждается в работах [5].

Результаты и обсуждение. Высокоскоростное взаимодействие снаряда с многослойной разнесённой преградой (гофрированный сеточный слой,

бампера) проводилось по нормали, при различных углах ориентации сеточного слоя.

Гофрированный сеточный слой моделируется участком сетки под соответствующим наклоном. При нулевом угле гофры φ (угол отклонения сеточного слоя от плоскости комбинированной преграды), сеточный слой расположен в плоскости преграды. Расчёты проводились для $\varphi = 0^{\circ}$, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°.

Сравнение эффективности разных защитных экранов имеет смысл только при условии совпадения их массы. Поэтому, при изменении угла гофры (то есть угла наклона сетки), для сохранения удельной (в плоскости экрана, перпендикулярно направлению удара) плотности, диаметр проволок пересчитывается относительно угла гофры.

Для моделирования высокоскоростного взаимодействия снаряда с сеточной преградой граничные условия прикладывались следующим образом: на нижней (жесткое фиксирование) и верхней (перемещение по оси Y и свободное перемещение по осям X и Z) границах.

Расчеты показывают, что при небольшом угле гофры, разрушение снаряда начинается с его передней части сразу после контакта и характеризуется образованием струй (высокоскоростных осколочных потоков), выбрасываемых по направлению удара. Струи, образованные после соударения, выбрасываются не по нормали, а рассеиваются под некоторым углом, что, в свою очередь, увеличит площадь поражения. Это главная особенность фрагментации при взаимодействии с сеточной преградой. Количество струй коррелирует с количеством ячеек, попадающих на снаряд. Энергия движущихся частиц уменьшается из-за активного рассеяния масс осколков.

По мере увеличения угла ϕ , «струи» становятся менее выраженными, возрастает эффект «истирания» ударника на сетке, при этом скорость вылетающих «струй» преимущественно направлена по нормали к сеточному бамперу. Тем самым большая часть осколочного облака отклоняется от направления удара и размазывается запреградный импульс. Это приводит к уменьшению пробивающей способности ударника, в частности, для данной задачи уменьшается размер отверстия, пробиваемого в бампере. Дополнительно можно отметить увеличение массы фрагментов, скользящих вдоль сеточного слоя, вплоть до рикошета неразрушенной части при больших углах наклона гофры.

Теоретическая оценка показывает, что высокоскоростное взаимодействие алюминиевого снаряда с сеточной преградой, а также со слоями бамперов может привести к достаточному разогреву до температуры плавления. Очевидно, что в экспериментах нагрев должен привести к резкому падению сопротивления материала снаряда.

Данное научное исследование выполнено при частичной поддержке Российского научного фонда (грант № 16-19-10264).

Литература/References

1. Myagkov N.N., Shumikhin T.A. 2019 AIMS Materials Science 6(5), 685–696.

2. Dobritsa D.B., Pashkov S.V., Khristenko Yu.F. 2020 Cosmic Research 58(2), 105-110.

3. Becker M., Seidl M., Mehl M., Souli M., Legendre J.-F. 2019 12th European LS-DYNA Conference, Koblenz, Germany.

4. *Myagkov N.N., Shumikhin T.A., Ponomarev A.V.* 2017. Mechanics of Composite Materials and Constructions 22(3), 452–463.

5. Akhmetshin L.R., Moskvichev E.N., Skripnyak V.V. 2019 IOP Conf Ser: Mater Sci Eng 511 012013

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ПОРИСТЫХ ЧАСТИЦ ТИТАНА

Н.С. Белоусова^{1,2}, О.Г. Глотов^{1,2}, А.В. Гуськов¹

¹ Новосибирский государственный технический университет, Россия ² Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук, Россия E-mail: nata.bel.94@mail.ru

Ключевые слова: частица титана, горение в воздухе, фрагментация, остатки сгорания.

Аннотация. Разработана методика создания горящих пористых частиц титана 500– 700 мкм. Исследовано их горение в свободном падении в воздухе. При помощи видеосъёмки определены времена горения частицы, времена начала и окончания фрагментации, закономерности движения частиц, в частности, их скорость и координата в момент начала фрагментации, зависимость размера частиц и типа фрагментации. Отобраны и исследованы остатки сгорания частиц, в них обнаружены: 1) объекты со структурой аэрогеля с габаритным размером до тысячи микрон, состоящие из цепочек оксидных сферул со средним диаметром 85 нм; 2) сферические частицы оксида с размерами единиц-десятков микрон; 3) сферические остатки материнских частиц с размерами до сотен микрон.

INVESTIGATION OF POROUS TITANIUM PARTICLES COMBUSTION

N. Belousova^{1,2}, O. Glotov^{1,2}, A. Guskov¹

¹Novosibirsk State Technical University, Russian Federation ²Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation E-mail: nata.bel.94@mail.ru

Keywords: Titanium particle, combustion in air, fragmentation, residue of combustion.

Abstract. A technique for creating of 500–700 microns burning porous titanium particles was developed. The combustion of the particles in free fall in air was investigated. With the help of video filming, the burning times of the particles, the beginning and the ending times

of fragmentation, the laws of particles motion, particular, their velocity and coordinate at the moment of the fragmentation beginning were determined. The particles combustion remnants were selected and investigated, and the following were found in them: 1) objects with an airgel structure with an overall size of up to a thousand microns, consisting of oxide spherules chains with the 85 nm mean diameter; 2) spherical oxide particles with sizes of units to tens of microns; 3) spherical remnants of parent particles up to hundreds of microns in size.

Введение. Горение частиц титана в воздухе в последнее время привлекает пристальное внимание исследователей [1–2], рассматриваются возможные перспективы применения титана в качестве энергетического компонента в ракетном топливе и во взрывчатых смесях индустриального назначения, а также в качестве модификатора горения смесевых композиций.

Методология. Данная работа продолжает наши исследования [3–4] горения крупных (до 500 микрометров) частиц титана в свободном падении в воздухе. Частицы в [3] были монодисперсными агломератами, сформированными из большого количества мелких частиц неправильной формы. В [4] мы использовали модифицированный подход, который даёт возможность получать изначально монолитные горящие частицы титана с диаметром до 700 микронов. Особенность этого подхода – возможность «тонкой настройки» начального размера частиц, что позволило изучить закономерности процесса фрагментации в зависимости от размера частиц. В частности, был определён граничный диаметр частиц, разделяющий качественно различные режимы фрагментации, имеющие вид звездообразного взрыва или еловой ветки.

Основные результаты. Исследуемые в работе пористые осференные образцы частиц титана с размерами порядка сотен микрометров, были получены методом механоактивации в шаровой мельнице АГО-2 и их можно рассматривать как новый вид титанового металлического горючего. Особенностью горения этих частиц, как и всех титановых частиц и титановых агломератов, является фрагментация, которая может происходить в двух режимах, а именно: либо в виде однократного взрыва горящей частицы со звездообразным разлётом фрагментов, либо в виде растянутого во времени отстрела множества мелких частиц-фрагментов от материнской частицы с сохранением последней. В этом режиме фотографическое изображение трека горящей частицы с отлетающими фрагментами по форме напоминает еловую ветвь, рис. 1. Режим «еловая ветвь» наблюдали в [4] для агломератов диаметром 300, 390 и 480 мкм. Режим «звезда» наблюдали для частиц 240 и 280 мкм в [5] и частиц в диапазоне 20–125 мкм в [6].





Заключение. В работе представлены данные морфологического и гранулометрического анализов исходных частиц методами оптической и электронной микроскопии. Эксперименты по горению пористых частиц проведены в той же постановке, как в [3] и [4]. Определены времёна горения частиц в зависимости от диаметра, а также данные о фрагментации частиц и о конденсированных продуктах горения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 19-03-00294 («аспиранты»).

Литература/References

1. Weiser V., Neutz J., Eisenreich N., Roth E., Schneider H., Kelzenberg S. Development and characterization of pyrotechnic compositions as counter measures against toxic clouds // Energetic Materials: Performance and Safety. 36th Int. Annual Conf. of ICT & 32nd Int. Pyrotechnics Seminar, June 28 – July 1, 2005, Karlsruhe, Germany. ICT, 2005. P. 102-1–102-12.

2. *Matias T., Duraes L., Andrade-Campos A., Mendes R.* Prediction and experimental Al, Mg, Ti and Zr derived oxides and spinel formation by detonation // 41st Int. Annual Conference of ICT. Energetic Materials for High Performance, Insensitive Munitions and Zero Pollution. Germany, Karlsruhe, June 29 – July 2, 2010. P. 95-1–95-16.

3. *Glotov O.G.* Combustion of spherical titanium agglomerates in air. I. Experimental approach // Combustion, Explosion, and Shock Waves, Vol. 49, No. 3, 2013. P. 299–306.

4. *Belousova N.S., Glotov O.G., Guskov A.V.* Study of the free falling particles trajectory at the burning monolithic titanium particles // Journal of Physics Conference Series, Vol. 1214, No. UNSP 012010, 2019. P. 1–7. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1214/1/012010/pdf

5. *Molodetsky I.E., Dreizin E.L., Vicenzi E.P., Law C.K.* Phases of titanium combustion in air // Combustion and Flame. 1998. Vol. 112. P. 522–532.

6. *Shafirovich E., Soon Kay Teoh, Arvind Varma*. Combustion of levitated titanium particles in air // Combustion and Flame. 2008. Vol. 152. P. 262–271.

ДИНАМИКА УДАРНОЙ ВОЛНЫ В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ СРЕДЕ. НЕОДНОМЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА

А.Н. Богданов

НИИ механики МГУ, Россия E-mail: bogdanov@imec.msu.ru

Ключевые слова: газовая динамика, ударная волна, стратифицированная среда, асимптотические разложения, нелинейные процессы.

Аннотация. Определение возможности ослабления интенсивности ударных волн в газовой среде относится к числу актуальных, в связи с приложениями, задач. Одним из способов воздействия на рассматриваемый процесс может быть создание на пути следования волны газовых неоднородностей. В настоящей работе получена аналитическая зависимость скорости распространения ударной волны произвольной интенсивности от распределения плотности и температуры (при постоянном давлении) перед ее фронтом. Предложен метод расчета изменения интенсивности ударной волны при ее прохождении слоя стратификации. Показана роль локальных и интегральных эффектов воздействия на волну малых возмущений, как заданных в среде, так и порожденных взаимодействием волны с неоднородной средой. Рассмотрен ряд смежных частных задач динамики ударных волн.

SHOCK WAVE DYNAMICS IN A STRATIFIED MEDIUM. UNDIMENSIONAL FEATURES OF THE PROCESS

A. Bogdanov

Institute of mechanics Lomonosov Moscow State University, Russian Federation E-mail: bogdanov@imec.msu.ru

Keywords: gas dynamics, shock wave, stratified medium, asymptotic expansions, nonlinear processes.

Abstract. Determining the possibility of attenuation the intensity of shock waves in a gaseous medium is one of the topical problems in connection with applications. One of the ways to influence the process under consideration can be the creation of gas inhomogeneities along the path of the wave. In this work, we obtained an analytical dependence of the propagation velocity of a shock wave of arbitrary intensity on the distribution of density and temperature (at a constant pressure) ahead of its front. A method for calculating the change in the intensity of the shock wave during its passage through the stratification layer is proposed. The role of local and integral effects of the action on the wave of small perturbations, both given in the medium and generated by the interaction of the wave with an inhomogeneous medium, is shown. Some related particular problems of shock wave dynamics are considered. Математические постановки задач газовой динамики такого рода являются очередным шагом в развитие классических исследований по динамике ударных волн в однородной среде [1]. Сложность их решения в общем случае первоначально определила путь поиска частных решений в определенных условиях.

Представленный в докладе аналитический подход к определению параметров нелинейного возмущения (ударной волны) произвольной интенсивности, распространяющегося в газообразной среде с заданным распределением параметров (стратификацией, как в направлении распространения возмущения, так и поперек ему), основан на предложенном автором ранее [2] подходе к изучению процессов динамики ударных волн в неоднородной среде. Подбор и развитие методов исследования задач такого рода изложены в превосходной монографии Дж. Уизема [3], где весьма оригинальным методом получено решение первой в ряду задач такого рода – движение сильной ударной волны по слою одномерной продольной стратификации. В настоящей работе новым методом получена не известная формула Уизема, а гораздо более общий результат, частным случаем которого (для ударных волн большой интенсивности), к тому же не имевшим по признанию самого его автора должного обоснования, является результат Уизема.

Полученные в настоящей работе результаты допускают уточнение учетом следующих членов разложения.

Эволюция ударных волн в неоднородной среде определяется не только локальными и интегральными факторами, но и является принципиально нелинейным процессом. Падение ударной волны на слой повышенной плотности является принципиально другой задачей, нежели отражение волны от слоя пониженной плотности, в первом случае назад в исходную среду отражается ударная волна, во втором – отраженная волна есть волна разрежения и определяющие рассматриваемый процесс соотношения другие. Но и сам процесс отражения ударной волны от границы двух сред имеет принципиальное отличие от прогрессии ударной волны через стратифицированный слой, поскольку последняя определяется интегральными воздействиями из-за взаимодействия ударной волны с локальными возмущениями, хотя и приходящими на фронт ударной волны сзади, но порожденными самой исследуемой волной в такой среде. Эти воздействия по мере прохождения стратифицированного слоя могут становиться все более весомыми.

В настоящей работе рассмотрены также вопросы образования и развития предвестника при движении ударной волны в области с каналом нагретого газа.

Работа выполнена в соответствии с планом исследований НИИ механики МГУ (тема AAAA-A19-119012990113-1) при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-01-00793).

Литература

1. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1981. 448 с.

2. Богданов А.Н. Динамика ударных волн в средах с продольной стратификацией // Доклады РАН. Т. 491. С. 5–6.

3. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977.

References

1. Sedov L.I., Volkovets A.G. Similarity and Dimensional Methods in Mechanics. Auflage CRC Press 1993. 496 p.

2. Bogdanov A.N. Dynamics of Shock Waves in Media with Longitudinal Stratification // Doklady Physics, Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation), Vol. 65, N_{2} 3. P. 83–84.

3. Whitham G.B. Linear and Nonlinear Waves. John Wiley & Sons. 1974. 635 p.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ В РЕЖИМЕ СПУТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Н.С. Евсеев^{1.2}, М.Х. Зиатдинов², В.И. Романдин²

¹Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Россия ²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия E-mail: evseevns@gmail.com

Ключевые слова: фильтрационное горение, спутный поток газа, азото-аргонная смесь, нитриды металлов, нитрид хрома.

Аннотация. Горение в условиях спутной фильтрации осуществлялось на оригинальном проточном CBC-реакторе, который позволяет исследовать горение порошков металлов и сплавов в режиме принудительной спутной фильтрации в потоке азотосодержащего газа. Такой способ обладает высокой энергоэффективностью и позволяет получать нитриды без использования высоких давлений. Приведены результаты экспериментальных исследований по горению порошка хрома в спутном потоке азотосодержащего газа. В работе приведены температурные профили, полученные при горении порошка хрома в условиях естественной и спутной фильтрации. Установлено, что при горении хрома вследствие отсутствия области догорания и стремительного охлаждения продуктов горения набегающей газовой смесью, продукты синтеза в своем составе не содержат мононитрид CrN, а представлены нитридом Cr₂N.

STUDY OF COMBUSTION OF METAL POWDERS IN CO-FLOW FILTRATION MODE

N. Evseev^{1.2}, M. Ziatdinov², V. Romandin²

¹Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation ²National Research Tomsk State University, Russian Federation E-mail: evseevns@gmail.com

Keywords: filtration combustion, co-flow, nitrogen-argon mixture, metal nitrides, chromium nitride.

Abstract. Combustion under conditions of co-flow filtration was carried out on an original flow-through SHS reactor, which allows one to study the combustion of metal and alloy powders in the forced co-filtration mode in a nitrogen-containing gas flow. This method is highly energy efficient and allows the production of nitrides without the use of high pressures. The results of experimental studies on the combustion of chromium powder in a cocurrent flow of nitrogen-containing gas are presented. The paper presents the temperature profiles obtained during the combustion of chromium powder under conditions of natural and concurrent filtration. It was found that during the combustion of chromium, due to the absence of the afterburning region and the rapid cooling of the combustion products by the oncoming gas mixture, the synthesis products do not contain CrN mononitride in their composition, but are represented by Cr_2N nitride.

Объектом исследования настоящей работы является фильтрационное горение металлических порошков в условиях принудительной спутной фильтрации, а также структура и свойства продуктов, полученных в результате фильтрационного горения. На сегодняшний день в промышленности для получения нитридов металлов используются, в основном, печной способ, плазмохимический синтез и самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС). Основными недостатками печного способа и плазмохимического синтеза являются большие энергозатраты и дорогостоящее оборудование. Метод СВС позволяет достичь высокой производительности при малых энергетических затратах, однако, требует использования реакторов высокого давления. Традиционно самораспространяющийся высокотемпературный синтез нитридов и фильтрационное горение металлических порошков в азоте экспериментально исследуются в условиях естественной фильтрации в реакторах высокого давления, где за счет перепада давления реакционный газ поставляется в область горения. Существует иной вид фильтрационного горения, при котором реагирующий газ принудительно подводится в зону горения и движется в направлении горения через продукты реакции вслед движущемуся фронту горения [1].

Материалы и методика эксперимента. В качестве исходных материалов были использованы порошки хрома марки ПХ1С дисперсностью 63–80 мкм.

Процесс горения в условиях спутной фильтрации осуществлялся на проточном лабораторном CBC-реакторе. Реакционная камера представляла собой кварцевую трубку, внутренний диаметр которой равнялся 1,6·10⁻² м. Высота порошкового слоя достигала 0,04 м. Верхняя часть порошка приводилась в контакт с электрической спиралью. С помощью редуктора реакционный газ из баллона подавался в кварцевую трубку. Зажигание образца осуществлялось подачей электрического импульса на спираль, которая приводилась в контакт с поверхностью образца. В результате формировался фронт горения, который распространялся вдоль образца.

Результаты. Так, при горении хрома в условиях естественной фильтрации было выделено 4 зоны горения, состоящие из: *1* – зоны прогрева; *2* – реакционной области; *3* – области догорания; *4* – области охлаждения продуктов реакции (рис. 1, *a*). Полученные экспериментальные данные согласуются с работой [2].



Рис. 1. Типичные температурные профили, полученные при горении порошка хрома в условиях естественной (*a*) и спутной фильтрации: *б* – нормальная волна; *в* – инверсная волна

При горении хрома в условиях спутной фильтрации было обнаружено отсутствие области догорания, тем самым было выделено три зоны горения (рис. 1, δ): 1 – зона прогрева; 2 – зона реакции; 3 –зона охлаждения. В случае формирования структуры инверсной волны горения (рис. 1, ϵ), зону прогрева можно разделить на две области: зону со стремительным повышением температуры (обозначена 1) и зону с медленным повышением

температуры (обозначена 1^*). В зоне реакции происходит формирование нитрида Cr_2N .

Установлено, что при горении хрома вследствие отсутствия области догорания и стремительного охлаждения продуктов горения набегающей газовой смесью, продукты синтеза в своем составе не содержат мононитрид CrN, который образуется в условиях естественной фильтрации в реакторе высокого давления, что говорит о качественных отличиях продуктов горения, полученных в условиях естественной и спутной фильтрации. Таким образом, при горении хрома в потоке азотосодержащего газа в условиях спутной фильтрации в продуктах содержится нитрид Cr₂N. Количество остаточного хрома меняется в зависимости от режимных параметров, таких, как расход газовой смеси и доля аргона в азотосодержащем газе. Так, при горении порошка хрома в потоке азота с удельным расходом 12 см³/(с·см²), продукты горения состояли преимущественно из нитрида Cr₂N (97,1 масс. %) и 2,9 масс. % хрома. При удельном расходе азота 8 см³/(с·см²) продукты горения были представлены только нитридом Cr₂N.

Установлено, что и в случае сжигания порошка хрома в условиях естественной и спутной фильтрации, продукты горения сохраняют исходную структуру. Синтезированные образцы представляют легкоразрушимый спёк серого цвета. Измельчение продуктов горения приводит к получению частиц исходного размера [3].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта «Перспектива» № 19-38-60036.

Литература

1. *Aldushin A.P.* New results in the theory of filtration combustion // Combustion and Flame. Vol. 94. Is. 3. P. 308–320.

2. Браверман Б.Ш., Зиатдинов М.Х., Максимов Ю.М. О сверхадиабатическом разогреве при горении хрома в азоте // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 6. С. 50–52.

3. Evseev Nikolay, Ziatdinov Mansur, Romandin Vladimir, Zhukov Alexander, Tolynbekov Aidos, Ryzhikh Yuliya. Process of Obtaining Chromium Nitride in the Combustion Mode under Conditions of Co-Flow Filtration // Processes. 2020, 8(9), 1056.

References

1. *Aldushin A.P.* New results in the theory of filtration combustion // Combustion and Flame. Vol. 94. Is. 3. P. 308–320.

2. Braverman B., Ziatdinov, M., Maksimov Y. Superadiabatic heating in combustion chromium in nitrogen. // Combust. Explos. Shock Waves. 1999. Vol. 35. P. 645–647.

3. Evseev N., Ziatdinov M., Romandin V., Zhukov A., Tolynbekov A., Ryzhikh Yu. Process of Obtaining Chromium Nitride in the Combustion Mode under Conditions of Co-Flow Filtration // Processes. 2020, 8(9), 1056.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ СПЛАВОВ С ЗОЛОТОМ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

К.К. Маевский

¹Институт гидродинамики СО РАН им. М.А. Лаврентьева, Россия ² Новосибирский государственный университет, Россия E-mail: konstantin.hydro@yandex.ru

Ключевые слова: уравнение состояния, ударная адиабата, термодинамическое равенство, металлические композиты, сплавы, золото.

Аннотация. Представлены результаты численных экспериментов по моделированию ударно-волнового нагружения для сплавов, содержащих золото Au в качестве компонента, с помощью термодинамически равновесной модели TEC (thermodynamic equilibrium components). Модель позволяет учитывать возможность наличие полиморфного фазового перехода при ударно-волновом воздействии рассматриваемых материалов, что существенно для достоверного моделирования термодинамических параметров, как чистых веществ, так и композитов и сплавов, содержащих такие материалы. Получено хорошее согласие этих модельных расчетов с данными разных авторов, которые определяются на основе эксперимента. Модель позволяет описать ударноволновое нагружение сплошных и пористых сплавов различных составов, состоящих из золота Au в сочетании со свинцом Pb или германием Ge, таких, как Au-Pb, Au-Ge. Полученные результаты позволяют в перспективе целенаправленно создавать необходимые условия для синтеза новых материалов. Данная модель позволяет осуществлять целенаправленный выбор составов композитов, славов и соотношений их компонентов с целью получения заданных характеристик при ударно-волновом нагружении сплошных и пористых материалов.

NUMERICAL SIMULATION OF THERMODYNAMIC PARAMETERS FOR GOLD ALLOYS UNDER SHOCK-WAVE LOADING

K. Maevskii^{1,2}

¹ Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Russian Federation ² Novosibirsk State University, Russian Federation E-mail: konstantin.hydro@yandex.ru

Keywords: Equation of state, shock adiabata, thermodynamic equation, metals composites, alloys, gold.

Abstract. The results of numerical experiments on modeling shock-wave loading of alloys containing gold as a component using thermodynamically equilibrium model TEC (thermodynamic equilibrium components) are presented. The model allows to take into account the possibility of polymorphic phase transition under shock-wave loading of the materials, which is essential for reliable modeling of thermodynamic parameters of both pure substances and composites, alloys based on them. The good agreement of these model calcula-

tions with the data of different authors, which are determined on the basis of experiment, is obtained. The model allows us to describe the dynamic loading of solid and porous alloys of different compositions consisting of Au in combination with lead Pb or germanium Ge, such as Au–Pb, Au–Ge. The results obtained allow in the future to purposefully create the necessary conditions for the synthesis of new materials. This model allows to carry out purposeful choice of compositions of alloys and ratios of their components for the purpose of reception of the set characteristics at shock-wave loading of solid and porous materials.

Представлены результаты численных экспериментов по моделированию ударно-волнового нагружения сплавов, содержащих золото Au в качестве компонента, с помощью термодинамически равновесной модели TEC (thermodynamic equilibrium components). Модель позволяет учитывать возможность наличие полиморфного фазового перехода при ударно-волновом воздействии рассматриваемых материалов, что существенно для достоверного моделирования термодинамических параметров, как чистых веществ, так и композитов и сплавов, содержащих такие материалы. Используемая методика позволяет описать ударно-волновое нагружение сплошных и пористых сплавов различных составов, состоящих из золота Au в сочетании со свинцом Pb или германием Ge, таких, как Au–Pb, Au–Ge.

Одна из задач при создании материалов с заданными свойствами, заключается в том, что необходимо целенаправленно изменять термодинамические параметры для реализации необходимых условий ударноволнового синтеза. Для этого проводятся исследования сжимаемость многокомпонентных сплавов и смесей различных составов, при этом большой интерес вызывают группы металлических композиций, элементы которых испытывают полиморфный фазовый перехода при ударно-волновом воздействии, некоторые такие сплавы, в частности сплав Au–Ge, описаны [1]. Моделирование материалов с такими компонентами проводится для развития перспективного направления с целью получения материалов с заданными свойствами.

Для описания термодинамических параметров сплавов и смесей при ударно-волновом воздействии использовалась модель TEC ударноволнового нагружения с учетом наличия газа в порах [2, 3]. Данная модель позволила описать термодинамические параметры в широком диапазоне давлений при ударно-волновом нагружении, в том числе и тех смесей, компоненты которых испытывают полиморфный фазовый переход. Модель основана на предположении, что все компоненты материала при ударно-волновом нагружении находятся в термодинамическом равновесии, которое предполагает равенство скоростей, давлений и температур. Для расчета ударно-волнового воздействия на такие образцы используются параметры уравнения состояния только их компонентов.

Результаты моделирования термодинамических параметров и данные, полученные на основании экспериментов из [4, 5] приведены на рис. 1 в переменных давление *P* – массовая скорость *U* для сплавов Au в сочетании

с Ge имеющие следующие массовые доли wt% Au(94.2)Ge(5.8), Au(92.1)Ge(7.9), Au(90.7)Ge(9.3). Для наглядности расчеты и данные показаны со сдвигом по значению давления 100 Гпа. Учет пористости в рамках рассматриваемой модели для сплавов Au–Ge позволил достоверно описать имеющиеся экспериментальные данные без существенных погрешностей. Такой подход необходим для данных сплавов в связи с тем, что Ge испытывает фазовый переход при тех значениях давления, которые достигались в рассматриваемых экспериментах. Как было показано в [2, 3], в этом случае надо рассматривать для Ge фазу высокого давления. С учетом большего значения плотности фазы высокого давления, по сравнению с начальной плотностью, расчет необходимо проводить с учетом уменьшения объёма, в этом случае исследуемый образец рассматривается как пористый материал.



l - wt% Au(94.2)Ge(5.8); 2 - wt% Au(92.1)Ge(7.9); 3 - wt% Au(90.7)Ge(9.3)

Получено хорошее согласие модельных расчетов с данными, которые определяются на основе эксперимента, при этом отсутствует отклонение для расчетных данных с данными экспериментов, которое возникает при использовании смесевых моделей [1]. Данная модель может быть полезной при определении составов смесей и соотношений их компонентов для получения заданных характеристик при ударно-волновом нагружении сплошных и пористых сплавов и смесей.

Литература/References

1. High-Velocity Impact Phenomena / Ed. Kinslow R. Academic Press, New York, 1970.

2. Maevskii K.K. Math. Montis., 45, 52 (2019).

3. Maevskii K.K. AIP Conf. Proc. 2103, 020009 (2019).

4. LASL Shock Hugoniot Data / Ed. Marsh S.P. Berkeley: Univ. of California Press, 1980.

5. Levashov P.R., Khishchenko K.V., Lomonosov I.V., Fortov V.E. AIP Conf. Proc. 706, 87 (2004). http://www.ihed.ras.ru/rusbank/.

РАЗРУШЕНИЕ ЗАСНЕЖЕННОГО ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ДВОЙНОГО ЗАРЯДА ВВ

Ю.Н. Орлова¹, Г.Н. Богомолов²

¹Томский политехнический университет, Россия ²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия E-mail: orlovaun@mail.ru

Ключевые слова: лед, комбинированный заряд ВВ, майна, разрушение.

Аннотация. В работе приведены результаты серии натурных экспериментов по подрыву заснеженного ледяного покрова комбинированным зарядом эмульсионного ВВ. Расстояние между зарядами составляло 100 см. Заряды располагались горизонтально без воздушного зазора между льдом и взрывчаткой. Подрыв обоих зарядов осуществлялся одновременно, а место детонации было вверху заряда. Получено, что после разрушения льда комбинированным зарядам ВВ диаметр майны почти на 40% был больше, чем после подрыва одиночного заряда.

RESEARCH OF ICE DAMAGE CHARACTERISTICS SUBJECTED TO COMBINATION OF EMULSION EXPLOSIVES

Yu. Orlova¹, G. Bogomolov²

¹Tomsk Polytechnic University, Russian Federation 2National Research Tomsk State University, Russian Federation E-mail: orlovaun@mail.ru

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

Abstract. The objective of this study is to investigate the damage characteristics response of the ice sheet and reveal the mechanism of ice-breaking subjected to underwater explosion. The response of the ice sheet subjected to underwater explosion is discussed. The ice damage characteristics under combination explosives for the underwater explosion ice-breaking is analyzed. The combination explosives are two charge of 4-kg-emulsion explosive, distance between is 100 cm. The charges are placed under ice in water, the detonation point is at the top of the charge. It was found that after the destruction of ice by combined explosive charges, the diameter of ice hole was almost 40% larger than after the detonation of a single charge.

В настоящее время актуальным является изучение льда при динамических нагрузках. Это связано с решением ряда практических задач, в том числе задач навигации на сибирских реках, добычи природных ископаемых в местах вечной мерзлоты и т.п. Анализ научно-технической литературы указывает на недостаточное количество экспериментальных данных по этому вопросу. В виду того, что лед имеет сложную структуру, его деформация сопровождается фазовыми переходами, углубление научных знаний является крайне необходимым условием для создания математических моделей.

В работе [1] изучено поведения 125-дневного льда под действием одиночного заряда ВВ. После подрыва одного заряда ВВ во льду образуются 500-сантиметровая майна с развитой кромкой. Одной из особенностей разрушения льда является наличие достаточно мелких ледяных фрагментов размерами приблизительно 15 см. В работе [2] экспериментально получены диаграммы движения (зависимость глубины от времени) и размеры образующихся каверн во льду методом импульсного рентгенографирования при ударе ударником с плоской головной частью. В [3] сравнивается разрушение льда под действием комбинированного заряда ВВ и одиночного заряда такой же массы. Исследуется состояние тонкого льда при контактном и подводном неконтактном взрывах.

В работе приведены результаты эксперимента подрыва ледяного покрова двумя зарядами эмульсионной ВВ, расстояние между которыми 100 см. ВВ помещался горизонтально под лед. Предметом исследования было состояние ледяного покрова после одновременного подрыва двух 4-килограммовых зарядов ВВ. Основной задачей является качественная оценка разрушения заснеженного ледяного покрова.

Заснеженный ледяной покров средней толщины является объектом постоянных исследований с 2013 года. Для корректности экспериментальная площадка не менялась. Возраст льда около 125 дней, его толщина – 65 см. На льду находился 20-сантиметровый слой снега, ВВ – штатная эмульсионная взрывчатка Эмуласт АС-ФП90 массой 4 кг (эквивалент 3.25 кг ТНТ). Комбинированный заряд ВВ состоял из двух таких зарядов.

На рис. 1 показана майна (полынья), полученная после подрыва одного эмульсионного заряда ВВ (фото сделано через 10 минут после взрыва). Внутри майны видны осколки льда различных размеров, снежные комки (остатки снежного покрова). Больших осколков льда (50 см и более) не наблюдалось. Форма майны близка к окружности, центр которой находился в месте закладки ВВ. Приблизительный диаметр майны составляет 700 см. Кромка льда была ровной.



Рис. 1. Результаты UNDEX-эксперимента 2021. Рисунок сделан на основе видеоэксперимента. Реконструкция майны – Т.В. Фазылов. Взрыв – ООО «КузбасСпецВзрыв»

Эксперимент показал, что после одновременного подрыва комбинированного заряда (два заряда по 4 кг на расстоянии 100 см), диаметр майны в заснеженном ледяном покрове был на 40% больше, чем после подрыва одиночного заряда.

Следует отметить, что сравнение проводилось с результатами испытаний в прошлом году. При этом морфология разрушения, состояние кромки льда практически не менялась за это время.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-08-01152а).

Литература

1. Орлова Ю.Н. Разрушение заснеженного ледяного покрова под действием эмульсионной взрывчатки / Ю.Н. Орлова // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2019: Материалы IX Всероссийской молодежной научной конференции, Томск, 18–20 ноября 2019 года / под ред. М.Ю. Орлова. Томск: ЗАО "Издательство Красное знамя", 2020. С. 58–61.

2. Исследование пробития ледовой преграды цилиндрическим ударником / С.И. Герасимов, А.В. Зубанков, О.В. Кривошеев [и др.] // Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ. 2020. Т. 9. № 2. С. 95–99.

3. *Ying Wang, Yezhi Qin, Xiongliang Yao.* A combined experimental and numerical investigation on damage characteristics of ice sheet subjected to underwater explosion load // Applied Ocean Research 103 (2020) 102347

4. Баландин В.В., Брагов А.М., Глазова Е.Г., Константинов А.Ю., Кочетков А.В., Крылов С.В. Численно-экспериментальное исследование процессов ударного нагружения льда // Полярная механика: Материалы III Междунар. конф. Владивосток, 2016. С. 293–305.

5. Гриневич, Д.В. Обзор применения численных методов для моделирования деформации и разрушения льда / Д.В. Гриневич, В.М. Бузник, Г.А. Нужный // Труды ВИАМ. 2020. № 8(90). С. 109–122.

References

1. Orlova Yu.N. Snow-covered ice sheet subjected to 4-kg-explosive // All-Russian Scientific Conference "Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics", Proceedings / Ed. M.Yu. Orlov. Tomsk: Izdatelstvo "Krasnoe znamya", 2020. P. 58–61.

2. *Gerasimov S.I.* et al. Investigation of the penetration of an ice plate by a cylindrical impactor // Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI", 2020, Vol. 9/ Is. 2. P. 95–99/

3. *Ying Wang, Yezhi Qin, Xiongliang Yao.* A combined experimental and numerical investigation on damage characteristics of ice sheet subjected to underwater explosion load // Applied Ocean Research 103 (2020) 102347.

4. *Balandin V.V. et al.* Numerically-experimental research of shock loading ice // Polar Mechanics: Proceedings III International conference, 2016. P. 293–305.

5. *Grinevich D.V. et al.* Review of the application of numerical methods for modeling the deformation and destruction of ice // Proceedings of VIAM, 2020, 8(90). P. 109–122.

МИКРОТВЕРДОСТЬ МЕДНОГО ОБРАЗЦА ПРИ ТЕСТЕ ТЕЙЛОРА

Н.В. Пахнутова¹, А.С. Зелепугин^{1,2}, С.А. Зелепугин^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия ²Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Россия E-mail: nadin_04@mail.ru

Ключевые слова: тест Тейлора, микротвердость.

Аннотация. Проведены эксперименты с медными (М1) цилиндрическими образцами при ударе по недеформируемой преграде (тест Тейлора). Для метания образцов использовалась одноступенчатая легкогазовая установка, разработанная в НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета. Скорости метания подобраны в диапазоне 150–350 м/с. Получены распределения микротвердости в осевом сечении медных образцов вдоль характерных линий. Определено, что значение микротвердости в деформированном состоянии существенно выше, чем в исходном.

MICROHARDNESS OF A COPPER SAMPLE AT THE TAYLOR TEST

N. Pakhnutova¹, A. Zelepugin^{1,2}, S. Zelepugin^{1,2}

¹National Research Tomsk State University, Russian Federation ²Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation E-mail: nadin_04@mail.ru

Keywords: Taylor test, microhardness.

Abstract. Experiments with copper cylindrical samples upon impact on a non-deformable target (Taylor impact test) were carried out. A single-stage light-gas installation developed at the Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University was used for throwing the samples. Throwing speeds were selected in the range of 150-350 m/s. The distributions of microhardness in the axial section of copper samples along the characteristic lines are obtained. It was determined that the value of microhardness in the deformed state is significantly higher than in the initial one.

Для ускорения твердых тел заранее заданной формы широкое применение нашли легкогазовые установки (ЛГУ). В НИИ ПММ Томского государственного университета разработана одноступенчатая легкогазовая установка, которая была использована для проведения экспериментов по методу Тейлора – удару цилиндрического тела по недеформируемой преграде.

Метод (задача, тест) Тейлора устанавливает связь динамического предела текучести материала цилиндрического тела с его остаточной длиной после удара по недеформируемой преграде и традиционно используется для оценки динамического предела текучести, а также для выбора определяющих соотношений и подбора констант к ним [1–5].

В данной работе в качестве образца был взят медный (М1) цилиндр длиной 32 мм, диаметром 7.8 мм. Масса образца составила около 15 г, плотность меди 8.9 г/см³. На стадии тестирования были подобраны условия метания, обеспечившие скорости движения образца на выходе из ствола в диапазоне 150–350 м/с. Образцы после нагружения разрезались на две части вдоль оси симметрии на станке с ЧПУ DK7732 для электроэрозионной резки. Микротвердость образцов анализировалась в плоскости разреза на твердомере ПТМ-3.

В данной работе представлены результаты измерения микротвердости медного образца после удара с начальной скоростью 316 м/с. Образец после нагружения разрезался вдоль оси на две части, измерения микротвердости проводились вдоль двух линий, которые условно названы С и С1. Расположение данных линий выбиралось из следующих соображений. Линия С располагалась вдоль оси симметрии образца. Линия С1 проходила через середину радиуса сечения образца. Измерения микротвердости проводились на приборе ПМТ-3 согласно ГОСТу 9650-76 вдавливанием алмазных наконечников.

Во время проведения измерений микротвердости вдоль центральной линии С было сделано 191 измерение от тыльного торца цилиндра к контактной поверхности. Замечено, что не все отпечатки имели одинаково ровную форму. Неровные грани отпечатков могут свидетельствовать о более пластичном материале в поверхностном слое.

Результаты измерения размера отпечатка твердомера в зависимости от расстояния вдоль линии С демонстрируют разброс значений, однако поддающийся усреднению. Значения микротвердости были рассчитаны согласно ГОСТу 9650-76. Данный массив значений микротвердости был осреднен, результат осреднения представлен на рис. 1. Наблюдается нелинейный характер изменения микротвердости вдоль осевой линии образца после удара по недеформируемой преграде.



Рис. 1. Микротвердость медного образца в зависимости от расстояния вдоль линии С



Рис. 2. Микротвердость медного образца в зависимости от расстояния вдоль линии С1, проходящей через середину радиуса

Результаты измерений микротвердости вдоль линии С1, проходящей через середину радиуса образца, представлены на рис. 2. Нелинейный ха-

рактер изменения микротвердости вдоль линии C1 образца наблюдается в еще большей степени, чем в предыдущем случае.

Для образца в исходном состоянии среднее значение микротвердости составляет 1155 МПа. Результаты, представленные на рис. 1 и 2, показывают, что в большинстве точек значение микротвердости в деформированном состоянии существенно выше, чем в исходном.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-01152).

Литература

1. Зелепугин А.С., Пахнутова Н.В., Христенко Ю.Ф., Зелепугин С.А. Тестирование легкогазовой установки на задаче Тейлора на образцах из меди // Гагаринские чтения - 2017: XLIII Международная молодежная научная конференция: сб. тезисов докладов. М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2017. С. 332.

2. Баяндин Ю.В., Билалов Д.А., Уваров С.В. Верификация широкодиапазонных определяющих соотношений для упруговязкопластических материалов с использованием теста Тейлора–Гопкинсона // Вычислительная механика сплошных сред. 2020. Т. 13(4). С. 449–458. DOI: 10.7242/1999-6691/2020.13.4.35.

3. Богомолов А.Н., Горельский В.А., Зелепугин С.А., Хорев И.Е. Поведение тел вращения при динамическом контакте с жесткой стенкой // ПМТФ. 1986. № 1. С. 161–163.

4. *Киселев А.Б., Сережкин А.А.* Особенности процесса соударения упругопластического цилиндра с недеформируемой преградой // Прикладная математика и механика. 2015. Т. 79. № 4. С. 571–583.

5. Orlov M.Yu., Glazyrin V.P., Orlov Yu.N. Numerical modeling of the destruction of steel plates with a gradient substrate. AIP Conference Proceedings **1893**, 030133 (2017); doi:10.1063/1.5007591.

References

1. Lee S., Huh H. Shear stress hardening curves of AISI 4130 steel at ultra-high strain rates with Taylor impact tests // Int. J. Impact Eng. 2021. Vol. 149. 103789. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103789

2. *Scott N.R., Nelms M.D., Barton N.R.* Assessment of reverse gun Taylor cylinder experimental configuration // Int. J. Impact Eng. 2021. Vol. 149. 103772. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103772

3. *Sen S., Banerjee B., Shaw A.* Taylor impact test revisited: Determination of plasticity parameters for metals at high strain rate // Int. J. of Solids and Structures. 2020. Vol. 193–194. P. 357–374. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2020.02.020

4. *Kiselev A.B., Serezhkin A.A.* The distinctive features of the collision between an elastoplastic cylinder and a non-deformable obstacle // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 2015. Vol. 79. No. 4. P. 403–410. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2016.01.011

5. Orlov M.Yu., Glazyrin V.P., Orlov Yu.N. Numerical modeling of the destruction of steel plates with a gradient substrate. AIP Conference Proceedings 1893, 030133 (2017); doi:10.1063/1.5007591.
РАСЧЕТ ПОДАВЛЕНИЯ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ МНОГОРЯДНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ РЕШЕТКОЙ В ВОДОРОДО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

В.М. Темербеков

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

Ключевые слова: газовая детонация, препятствие, подавление детонации, взрывои пожаробезопасность, численное моделирование.

Аннотация. Представлены результаты численного исследования подавления детонационной волны препятствием в виде многорядной решетки, состоящей из прутьев цилиндрического сечения. Исследовано влияние диаметра прутьев, расстояния между ними и количества рядов препятствия на срыв детонации. Выявлено, что для полного подавления детонации, важную роль играет расстояние между прутьями по вертикали, которое предположительно не должно превышать величину поперечного размера детонационной ячейки.

CALCULATION OF THE GAS DETONATION SUPPRESSION BY A MULTI-ROW CYLINDRICAL LATTICE IN A HYDROGEN-AIR MIXTURE

V. Temerbekov

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Russian Federation E-mail: tvm94@inbox.ru

Keywords: gas detonation, obstacle, detonation suppression, explosion and fire safety, numerical modeling.

Abstract. The results of the numerical study of the detonation wave suppression by the multi-row lattice consisting of the cylindrical rods are presented. The influence of the rods diameter, the distance between rods and the rows number on destruction of the detonation was investigated. It was found that for the complete detonation suppression, the vertical distance between the rods is played an important role. This distance, presumably, should not exceed the value of the transverse size of the detonation cell.

В последние годы на многих предприятиях, как и в бытовых условиях, широкое применение нашли различные высокоэнергетические газообразные топливные смеси. Увеличение объемов использования взрыво- и пожароопасных газов привело к необходимости разработки новых мероприятий по защите от чрезвычайных ситуаций. Несмотря на существующие меры, не удается полностью избежать различных опасных явлений, связанных с применением газообразных топлив. Различные аварии, утечки и прочие происшествия зачастую приводят к пожарам и взрывам, влекущим за собой серьезные последствия для людей, оборудования и окружающей среды. В связи с большим риском возникновения подобных чрезвычайных ситуаций большую востребованность получили исследования, связанные с изучением свойств и критериев взрывных явлений.

Одной из важнейших задач взрыво- и пожаробезопасности является выявление возможности, а также поиск критериев для ослабления и подавления газовой детонации. Уже существует ряд работ, в которых изучалось подавление детонации, например инертными частицами [1, 2] или газовыми пробками [3]. В настоящей работе для подавления детонации используется многорядная решетка, состоящая из прутьев цилиндрического сечения, расположенных в шахматном порядке.

Целью работы является построение математической модели для задачи о срыве детонации при ее взаимодействии с цилиндрической решеткой. На основе полученных результатов предполагается сделать первоначальные выводы о возможности подавления газовой детонации таким способом, а также выявить критерии для успешной реализации такого подхода.



Рис.1. Карта режимов. Сравнение рассчетных (темные символы) и экспериментальных (полые символы) данных [6].

(○•) – наклонная детонационная волна (ODW) при $Pct = 141 \kappa \Pi a;$

(ץ) – тип «Соломенная шляпа» со стабилизированной ОDW при Рст = 136кПа;

(Δ▲) – тип «Соломенная шляпа» с отходящей ОDW при Рст = 131кПа;

(□■) – ударно-инициированное горение при Рст = 121кПа

Задача решалась в плоской, осесимметричной постановке. Математическая модель включает в себя осреднённые по Фавру уравнения Навье– Стокса для многокомпонентной газовой смеси с учетом химических реакций. Для моделирования химической кинетики в работе была использована приведённая кинетическая схема, включающая одну брутто-реакцию горения водорода в воздухе. В работе [4] данная кинетическая схема была верифицирована по экспериментальным данным о временах задержки воспламенения и скорости распространения детонационной волны при различных условиях. В качестве решателя использован программный комплекс ANSYS Fluent. Для аппроксимации по времени используется неявная схема второго порядка, а для аппроксимации по пространству – схема расщепления вектора потоков AUSM с противопотоковой аппроксимацией второго порядка точности. Используемая математическая модель была ранее протестирована на задаче об инициировании наклонной детонации [5]. Результаты верификации приведены на рис. 1 в качестве карты режимов.

В результате выполнения данной работы была разработана математическая технология расчета задачи о взаимодействии детонационной волны с цилиндрической решеткой. Выявлено, что для успешного подавления детонации достаточно семи рядов цилиндров диаметром 10 мм и расстоянием между ними 10 мм. Увеличение шага между прутьями по горизонтали хуже влияет на процесс подавления детонации. Шаг между прутьями по вертикали имеет огромное значение для подавления детонации, его увеличение до величин, превышающих поперечный размер детонационной ячейки, приводит к отсутствию подавления детонации. При подавлении детонации, волна горения продолжает распространяться по расчетной области.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90178.

Литература

1. *Тропин Д.А., Федоров А.В.* Влияние инертных микро- и наночастиц на параметры детонационных волн в силановодородовоздушных смесях // Физика горения и взрыва. 2019. Т. 55, № 2, С. 119–126.

2. *Tropin, D.A. and Fedorov, A.V.* Physical and mathematical modeling of interaction of detonation waves in mixtures of hydrogen, methane, silane, and oxidizer with clouds of inert micro- and nanoparticle // Combustion Science and Technology, 2019, Vol. 191, No 2. P. 275–283.

3. Бедарев И.А. Численное моделирование взаимодействия ячеистой детонации с пробками инертных газов // Тезисы XVI Всероссийского семинара с международным участием «Динамика многофазных сред». 2019. Новосибирск. С. 10–12.

4. *Бедарев И.А., Рылова К.В., Фёдоров А.В.* Применение детальных и приведенных кинетических схем для описания детонации водородовоздушных смесей с разбавителем // Физика горения и взрыва, 2015. Т. 51, № 5. С. 22–33.

5. *Бедарев И.А., Темербеков В.М., Федоров А.В.* Моделирование режимов наклонных детонационных волн, возникающих при инициировании детонации снарядом малого диаметра // Теплофизика и аэромеханика, 2019. Т. 26, № 1. С. 63–73.

6. *Maeda S., Sumiya S., Kasahara J., Matsuo A.* Scale effect of spherical projectiles for stabilization of oblique detonation waves // Shock Waves, 2015. Vol. 25. P. 141–150.

References

1. *Tropin D.A., Fedorov A.V.* Effect of inert micro- and nanoparticles on the parameters of detonation waves in silane/hydrogen – air mixtures // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2019. Vol. 55, No 2. P. 230–236.

2. *Tropin, D.A., Fedorov A.V.* Physical and mathematical modeling of interaction of detonation waves in mixtures of hydrogen, methane, silane, and oxidizer with clouds of inert micro- and nanoparticle // Combustion Science and Technology. 2019. Vol. 191. No 2. P. 275– 83.

3. *Bedarev I.A.* Численное моделирование взаимодействия ячеистой детонации с пробками инертных газов // Тезисы XVI Всероссийского семинара с международным участием «Динамика многофазных сред». 2019. Новосибирск. С. 10–12.

4. *Bedarev I.A., Rylova K.V., 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. P. 528–539.

5. *Bedarev I.A., Temerbekov V.M., Fedorov A.V.* Simulating the regimes of oblique detonation waves arising at detonation initiation by a small-diameter projectile // Thermophysics and Aeromechanics. 2019. Vol. 26. No 1. P. 59–68.

Секция 2

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

Председатель:

к.ф.-м.н. А.А. Ящук

Математические модели газовой динамики Машинные, графические и другие методы вычислительной математики Облачные вычисления Параллельные алгоритмы Системы компьютерной поддержки научных исследований

Session 2

Numerical methods, algorithms, programs and exact solutions of continuum mechanics problems

Chair:

Ph.D. Alexey Yaschuk

Math Applications in Computer Science Numering Computing Simulation and Modeling Computer-Aided Engineering (CAD, CAE) and Design Computer Engineering

ВЕЛИЧИНА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНЕ СВАРНОГО ШВА 09Г2С

А.В. Бевз

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия E-mail: anna.bevz.94@mail.ru

Ключевые слова: остаточные напряжения, сварной шов, электросварка, режимы сварки.

Аннотация. В работе исследованы причины возникновения остаточных напряжений в сварном шве. В зоне сварного шва возникают сжимающие и растягивающие термические внутренние напряжения. Величина и распределение этих напряжений зависит от характеристик поля температуры, значений коэффициента линейного температурного фаз, теплопроводности свариваемого металла. Представлены графики зависимости осевых и продольных напряжений в зависимости от расстояния от зоны сварного шва. В результате проделанной работы было выявлено, что на величину остаточных напряжений влияет вид и режим сварки, свариваемый материал, климатические условия. Полученная математическая модель позволит проводить оценку остаточных напряжений, учитывая значимые для процесса компоненты. Рассмотрены причины образования трещин в сплавах, а также продольные и угловые деформации.

VALUE OF RESIDUAL VOLTAGE IN THE WELD AREA 09G2S

A. Bevz

National Research Tomsk State University, Russian Federation E-mail: anna.bevz.94@mail.ru

Keywords: residual stresses, welded seam, electric welding, welding modes.

Abstract. The paper investigates the reasons for the occurrence of residual stresses in the weld. The graphs of the dependence of axial and longitudinal stresses depending on the distance from the weld zone are presented. As a result of the work done, it was revealed that the type and mode of welding, the material to be welded, and climatic conditions affect the value of residual stresses. The obtained mathematical model will make it possible to assess the residual stresses, taking into account the components that are significant for the process.

Выделяют несколько причин образования внутренних остаточных напряжений в сварных соединениях и конструкциях. В процессе электросварки, вблизи сварного соединения возникает неравномерное температурное поле. При этом в зоне сварного шва возникают сжимающие и растягивающие термические внутренние напряжения. Величина и распределение этих напряжений зависит от характеристик поля температуры, значений коэффициента линейного температурного фаз, теплопроводности свариваемого металла. При сварке жестко закрепленной конструкции величина термических напряжений может возрастать вследствие ограниченности ее свободного перемещения в процессе нагрева и охлаждения. Если величина внутренних напряжений превысит предел текучести материала, в металле начнут происходить пластические деформации, приводящие к релаксации напряжений и сопровождающиеся изменением формы и размеров свариваемых элементов конструкций. После окончания процесса сварки и охлаждения соединения, в областях, подвергшихся неравномерному пластическому деформированию, формируется поле остаточных напряжений.

Целью данной работы является получение математической модели для оценки величины остаточных напряжений, которая имеет огромное значение.

При сварке элементов конструкций из углеродистых и легированных сталей при нагреве выше критических температур могут возникнуть напряжения, обусловленные фазовыми превращениями с изменением типа кристаллической решетки и образованием фазы, обладающей большим удельным объемом и другим коэффициентом линейного расширения. Наибольшие напряжения могут возникнуть при сварке конструкций из легированных сталей, склонных к закалке. Фазовые превращения идут с образованием закалочных структур – мартенсита и бейнита, обладающих большим удельным объемом, более высокой твердостью, хрупкостью и пониженной пластичностью. Такое превращение сопровождается увеличением объема; прилегающий к нему металл будет испытывать растягивающие напряжения, а участки со структурой мартенсита – растягивающие. В непластичных сплавах это может привести к образованию трещин.

Остаточные напряжения в зоне сварного соединения могут быть вызваны усадкой наплавленного металла в сварном шве. При затвердевании расплавленного металла шва его объем уменьшается.

В сварном соединении возникают продольные и поперечные внутренние напряжения, вызывающие соответствующие деформации сварного соединения. В результате продольной усадки в соединении возникает деформация в продольном направлении относительно оси шва, а поперечная, как правило, вызывает угловые деформации.

В процессе эксплуатации трубопроводов под воздействием действующих нагрузок возможны изменения полей остаточных напряжений сварных соединений труб.

Прогнозирование процессов релаксации остаточных напряжений в сварных соединениях труб в процессе длительной эксплуатации сопряжено с разработкой методик и моделей, учитывающих вероятностный характер изменяющихся во времени воздействий и эволюции структуры материала в зоне сварных соединений. Для разработки такой методики необходимы данные, которые могут быть использованы для калибровки моделей релаксации остаточных напряжений. В данной работе были использованы результаты экспериментальных исследований остаточных напряжений в кольцевых стыках магистрального газопровода Бэргэ–Якутск диаметром 530 мм, толщиной стенки 7 мм (r/t=38), после 40 лет эксплуатации в условиях Севера [2]. Величины остаточных напряжений в приповерхностных слоях трубы с внутренней и наружной сторон были определены с помощью переносного рентгеновского определителя напряжений.

Режимы сварки магистрального газопровода даны в монографии академика В.П. Ларионова [3]. Сварка соединения была выполнена в три слоя с применением сварочной проволоки Св-10Г2 (диаметр 2 мм) под флюсом АН-348А, прокаленным при температуре 250-300 °C в течение 1.5 ч. при следующих режимах: Icв = 440...500 A, Ucв = 38...42 B, Vcв = 32...35 м/ч. Это обеспечивало погонной уровень энергии В пределах 1600...1900 кДж/м, являющийся оптимальным для получения сварного соединения с требуемой хладостойкостью. Усиление шва составляло 2...3 мм с плавным переходом к основному металлу, ширина шва – 18...20 мм.



Рис. 1. Распределения остаточных сварочных напряжений кольцевого стыка первой катушки газопровода диаметром 530 мм со стороны гофра (*a*) и недеформированного участка (б)

В процессе эксплуатации газопровода на расстоянии 80 мм от сварного соединения образовался гофр длиной 520 мм и высотой 7 мм. Гофры в 45

трубопроводах образуются при значительных сжимающих напряжениях [4].



Рис. 2. Распределения остаточных напряжений продольного заводского шва, полученного контактной сваркой токами высокой частоты трубы диаметром 530 мм и толщиной стенки 7 мм: (0 – линия сплавления сварного шва): 1 (□) и 2 (▲)– кольцевые и осевые напряжения во внутренних приповерхностных слоях, соответственно; 3 (□) и

4 (□) – кольцевые и осевые напряжения наружных приповерхностных слоев, соответственно

На рис. 2 показано распределение остаточных напряжений с внутренней и наружной поверхности трубы диаметром 530 мм толщиной стенки 7 мм, изготовленной из стали марки 09Г2С. Определение напряжений проводилось от металла шва (точка 0 на графике) до 50 мм от нее в поперечном направлении от шва. С наружной стороны трубы наблюдается невысокий уровень кольцевых и осевых остаточных напряжений примерно 0,23 ст ($\sigma T = 430$ МПа), которые находятся в интервале от –100 до +100 МПа. С внутренней стороны трубы обнаружены высокие растягивающие ОСН вблизи металла шва достигающие 370 МПа – 0,86 ст в осевом направлении и 280 МПа – 0,65 ст в кольцевом направлении.

Анализ экспериментальных данных о распределении остаточных напряжений в зоне сварных соединений труб показал (рис. 1), что на внутренней поверхности действуют растягивающие напряжения. Величина кольцевых и осевых остаточных напряжений изменяется немонотонно. Это согласуется с представлениями [1], что продольный шов, сокращаясь в результате усадки, вызывает изгиб длинных оболочек. Анализ экспериментальных данных о величине остаточных напряжений в зоне сварных соединений труб большого диаметра из стали 09Г2С показал, что величина 46 остаточных напряжений изменяется немонотонно с ростом расстояния от сварного шва.

Литература

1. Голиков Н.И. Причины разрушения, повышения хладостойкости эксплуатационной прочности сварных соединений газопроводов в условиях Северо-Востока России, Томск, 2020.

2. *Golikov N.I.* Residual stresses in circumferential butt joints in the main gas pipeline at long-term service in the North / N.I. Golikov, V.V. Dmitriev // The Paton Welding Journal. 2012. No 12. P. 15–17.

3. *Ларионов В.П.* Электродуговая сварка конструкций в северном исполнении / В.П. Ларионов. Новосибирск: Наука, 1986. 256 с.

4. *Рыбаков А.А.* Оценка напряженно-деформированного состояния участка газопровода с местной потерей устойчивости / А.А. Рыбаков, Э.Ф. Гарф, А.В. Якимкин, И.В. Лохман, И.З. Бурак // Автоматическая сварка. 2015. №2. С. 42–49.

5. Сварка в машиностроении: справочник: в 4 т. М.: Машиностроение, 1978.

References

1. *Golikov N.I.* The causes of destruction, increase in the cold resistance of the operational strength of welded joints of gas pipelines in the northeast of Russia, Tomsk, 2020.

2. *Golikov N.I.* Residual stresses in circumferential butt joints in the main gas pipeline at long-term service in the North / N.I. Golikov, V.V. Dmitriev // The Paton Welding Journal. 2012. No 12. P. 15–17.

3. *Larionov V.P.* Electric arc welding of structures in the northern design / V.P. Larionov. Novosibirsk: Nauka, 1986. 256 p.

4. *Rybakov A.A.* Assessment of the stress-strain state of a gas pipeline section with local loss of stability. Rybakov, E.F. Garf, A.V. Yakimkin, I. V. Lokhman, I.Z. Burak // Automatic welding. 2015. No 2. S. 42–49.

5. Welding in mechanical engineering: a reference book. In 4 volumes / editorial board: G.A. Nikolaev (previous) and others. M.: Mechanical engineering, 1978.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА ПРИ ВНЕДРЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ УДАРНИКОВ ПРИ СКОРОСТЯХ ДО 250 М/С

В.П. Глазырин, Г.Н. Богомолов, К.В. Глазырин

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

Ключевые слова: лед, ударник, разрушение, эксперимент, численные методы.

Аннотация. В настоящей работе исследовано разрушение льда при ударе компактных и удлиненных металлических ударников в диапазоне начальных скоростей до 250 м/с. Некоторые ударники имели удлинение до $\lambda = 3.9$. Объект исследований – пресноводный лед, замороженный при температуре –10 и –22°С. Эксперименты проведены на баллистической пневмоустановке с ошибкой измерения не более 0,2%. Вы-

явлено, что глубина внедрения ударников всегда была больше их первоначального диаметра, а процесс внедрения сопровождался формированием во льду конического кратера. Некоторые эксперименты были смоделированы при помощи численных лагранжевых методов и бессеточного SPH-метода в упругопластической 2D- и 3D-постановках. Установлено, что лагранжевые методы более точно описывают процесс разрушения льда по сравнению с методом SPH.

DEEP PENETRATION OF PROJECTILES INTO ICE TARGETS (UP TO 250 M/S)

V. Glazyrin, G. Bogomolov, K. Glazyrin

National Research Tomsk state University, Russian Federation E-mail: glvp@list.ru

Keywords: ice destruction, projectile, experiment, numerical methods.

Abstract. In the current work, the destruction of ice under the impact of compact and elongated projectiles is investigated in the range of initial velocities up to 250 m/s. Some projectiles were elongated up to $\lambda = 3.9$. The object of research is freshwater ice frozen at temperatures of -10 and -22 C. The experiments were carried out on a ballistic pneumatic setup with a measurement error of no more than 0.2%. It was revealed that the penetration depth of the projectiles was always greater than their initial diameter, and the penetration process was accompanied by the formation of a conical crater in the ice. Selected experiments were modeled using numerical Lagrangian and SPH methods in elastoplastic 2D and 3D statement. It was found that the Lagrangian methods more accurately describe the process of ice destruction in comparison with the gridless SPH method.

Современное развитие экономики северных и арктических территорий России требует постоянного углубления наших знаний в области физики и механики льда, особенно в диапазоне импульсных нагрузок. Определенные результаты в этом направлении можно получить путем проведения модельных и натурных экспериментов. Однако из-за технической сложности и дороговизны проведения таких опытов, а также невозможности получения детальной информации о рассматриваемых процессах, следует наряду с экспериментальными методами использовать методы математического моделирования. Последние обладают большой гибкостью и позволяют моделировать движение среды с разрывами, с контактными и свободными поверхностями. Важным достоинством данного подхода является возможность получения полной информации о текущем значении выбранного параметра в каждой точке исследуемого тела, что, в свою очередь, позволяет выяснить механизмы и основные закономерности процесса [1].

В настоящей работе представлены результаты экспериментов по внедрению в лед компактных и удлиненных ударников. Полученные результаты были смоделированы с помощью модифицированных лагранжевых методов, а также бессеточного метода SPH (Smoothed Particles Hydrodynamics).

Вначале изложим экспериментальную часть. Компактные ударники – это стальные шарики диаметром 4,5 и 8,0 мм. Удлиненные ударники – цилиндры диаметром 7,7 мм с конической головной частью и удлинением $\lambda =$ =3,9. Эксперименты проведены на баллистической пневмоустановке. Скорость ударников изменялась в пределах от 100 до 250 м/с. Регистрация скорости осуществлялась с помощью индукционного измерителя скорости (ИИС), закрепленного на дульном срезе баллистической установки. Катушки ИИС запитываются соответствующим блоком пространственновременного преобразователя (ПВП). Полученные сигналы усиливаются и в качестве меток времени подаются на измеритель времени ЧЗ-З4. Кроме того, ПВП по вводимому расстоянию до плоскости регистрации формирует синхроимпульс для запуска аппаратуры с учетом реальной скорости прохождения ударником базового расстояния ИИС. Регистрирующие приборы запускаются с помощью многоканального генератора задержанных импульсов, который также срабатывает от синхроимпульса ПВП. Точность метода регистрации индукционным измерителем скорости метания проверялась с помощью рам-мишеней и посредством локализации ударника в двух точках траектории импульсными рентгеновскими аппаратами. Результаты проверки показали, что ошибка измерения скорости ударника не превышает 0,2% [2].

В качестве мишеней использованы образцы пресноводного льда размерами (20×20×20) см. Образцы приготовлены в морозильной камере при температуре –10 и –22 °С. При таких размерах влияние боковых и тыльной поверхностей на проникание не наблюдалось. После проведения опыта ударники сохраняли первоначальную форму. Внедрение ударников сопровождалось откольными разрушениями в области лицевой поверхности образца и образованием конического кратера в направлении проникания. При скорости удара выше 250 м/с образец льда, как правило, разрушался полностью на отдельные фрагменты. Результаты экспериментов представлены в табл. 1.

| Ударник | −10 °C | | −22 °C | |
|---|----------------------|-------|---------------------|-------|
| | V _o , м/с | L, мм | V ₀ ,м/с | L, мм |
| $d=4,4$ MM, $\alpha = 90^{\circ}$, CT. 3 | 110 | 5.7 | 112 | 5.2 |
| | 154 | 8.1 | 152 | 7.8 |
| | 159 | 8.4 | 159 | 8.0 |
| | 203 | 10.3 | 208 | 10.1 |
| $d=7,7$ MM, $\alpha = 90^{\circ}$, | 105 | 19.6 | 109 | 18.3 |
| λ=3.9 Π 16 | 148 | 26.6 | 143 | 24.3 |
| х <i>з,</i> , <u>д</u> то | 172 | 32.2 | 175 | 30.0 |
| | 208 | 30.0 | 211 | 36.2 |

Таблица 1. Результаты эксперимента

Примечание: d – диаметр ударника; α – угол подхода; λ – удлинение ударника.

Для анализа процесса внедрения ударника и проверки адекватности модели поведения материала были проведены вычислительные эксперименты с применением различных численных методик, в которых использованы метод конечных элементов, модифицированные лагранжевые методы Джонсона и Уилкинса, а также бессеточный метод SPH (Smoothed Particles Hydrodynamics) [3, 4, 5].

Для повышения точности аппроксимации граничных условий и обеспечения консервативности схем записаны уравнения SPH-метода на основе слабой вариационной постановки. В модификации метода Джонсона учтены «градиентный» и силовой критерии для описания фрагментарного разрушения материала, а также начальная анизотропия и влияние температуры на прочностные характеристики льда. Для 3D схемы с вероятностным подходом к моделированию фрагментации твердых тел предложен специальный метод более устойчивой автоматической 3D разбивки на тетраэдры произвольной исследуемой области. Численная реализация вышеописанных методов проведена в виде создания оригинальных методик, алгоритмов и программ расчета [3, 4]. При сравнении экспериментальных и расчетных данных можно сделать вывод, что при использовании лагранжевых методов расхождения не превышали 7%, а с использованием SPH-метода расхождения не превышали 18%.

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

Литература

1. Орлов М.Ю. Исследование процесса разрушения твердых тел. Итоги работы лаборатории прочности НИИ ПММ ТГУ / М.Ю. Орлов, В.П. Глазырин, Ю.Н. Орлов // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2019: Материалы IX Всероссийской молодежной научной конференции, Томск, 18– 20 ноября 2019 года / под ред. М.Ю. Орлова. Томск: ЗАО "Издательство Красное знамя", 2020. С. 25–28.

2. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел / А.В. Герасимов, В.Н. Барашков, В.П. Глазырин [и др.]; Министерство образования и науки РФ; Томский государственный университет. Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2007. 572 с. ISBN 9785751118105.

3. *Cherepanov R*. Tensor smooth length for SPH modelling of high speed impact / R. Cherepanov, A. Gerasimov // CEUR Workshop Proceedings: MIT 2016 – Proceedings of the International Conference Mathematical and Information Technologies, Vrnjacka Banja, 28 августа 05.2016 года. Vrnjacka Banja: Mathematical Institute SANU, 2017. P. 271–276.

4. Holmquist T., Johnson G. JAM 78 051003-1 (2011).

5. *Wilkins M.L.* Mechanics of penetration and perforation, Impact Engng. 16, p. 793–807 (1978).

References

1. Orlov M.Yu, Glazyrin V.P., Orlov Yu.N. Results of the research work of the strength laboratory // All-Russian Scientific Conference "Current issues of continuum mechanics and 50

celestial mechanics", Proceedings / Ed. M.Yu. Orlov. Tomsk: Izdatelstvo "Krasnoe znamya", 2020. P. 25–28.

2. *Gerasimov*, Studies of high-speed interaction of bodies (TSU Publishing, Tomsk, 2007).

3. *Cherepanov R*. Tensor smooth length for SPH modelling of high speed impact / R. Cherepanov, A. Gerasimov // CEUR Workshop Proceedings: MIT 2016 – Proceedings of the International Conference Mathematical and Information Technologies, Vrnjacka Banja, 28 августа – 05.2016 года. Vrnjacka Banja: Mathematical Institute SANU, 2017. P. 271–276.

4. Holmquist T., Johnson G. JAM 78 051003-1 (2011).

5. Wilkins M.L. Mechanics of penetration and perforation, Impact Engng. 16, p. 793-807 (1978).

ВЕБ-ОРИЕНТИРОВАННАЯ ПЛАТФОРМА ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ГИДРОДИНАМИКИ

Д.В. Городилов, К.С. Иванов

Кемеровский государственный университет, Россия E-mail: dealenx@gmail.com

Ключевые слова: гидродинамика, HPCCloud, веб-платформа, облачные, вычисления.

Аннотация. Развитие вычислительной гидродинамики связано с проведением сложных экспериментов, в исследованиях которых важна автоматизация в управлении расчетными задачами и удаленная визуализация данных. Однако существуют серьезные препятствия в разработке всех необходимых технологий в управлении запуска моделирования, начиная с введения параметров и заканчивая последующей постобработкой. Настоящая работа посвящена разработке веб-ориентированный платформы на основе открыто-разрабатываемого проекта HPCCloud, в котором реализованы механизмы взаимодействия с вычислительными ресурсами и транслированием удаленной визуализации, а также исследуются способы реализации интерактивной веб-среды для управления расчетными задачами пакета OpenFoam. В платформе для запускаемых моделирований реализуются автоматизирующие процессы, которые в зависимости от выбранных параметров расчетной задачи генерируют данные файлов для запуска на вычислительном кластере, а для качественного запуска настраиваются шаблоны под PBS Torque для выполнения расчета на конкретном вычислительном кластере. Для тестирования платформы были разработаны модули для расчета задачи о течении жидкости в кубической каверне, а также проведено ряд тестов на вычислительном кластере Кемеровского государственного университета.

WEB-BASED CLOUD COMPUTING PLATFORM FOR FLUID DYNAMICS PROBLEMS

D. Gorodilov, K. Ivanov

Kemerovo State University, Russian Federation E-mail: dealenx@gmail.com

Keywords: CFD, HPCCloud, Web-platform, cloud, computing.

Abstract. The development of CFD is related with complex experiments, in the studies of which automation in the management of computational problems and remote visualization are important. However, there are obstacles in the development of all the needed technologies in the management of simulations: starting with entry of parameters and ending with post-processing. This work is devoted to the development of a platform based on HPCCloud, which implements mechanisms for interacting with computational resources and broadcasting remote visualization, and we examine ways to implement an interactive web environment for managing OpenFoam tasks. For running simulations there are implemented automated processes that generate file data for launching on a computational cluster based on the selected parameters of the task. For testing of the platform, we developed modules for calculating the problem of fluid flow in cavity and we ran a series of tests carried out on the computing cluster of KemSU.

Развитие вычислительной гидродинамики связано с проведением сложных экспериментов. Для этого требуются мощные вычислительные кластеры, а результатами таких экспериментов являются большие массивы численных данных. В таких исследованиях важна автоматизация в управлении расчетными задачами и удаленная визуализация данных. Обработка данных на локальном устройстве (под этим понимается компьютер с низкими вычислительными ресурсами) может быть затруднительной и занимать недопустимое для исследований время [1].

Для решения проблем, связанных с обработкой и хранением больших массивов данных, за последние 10 лет активно развиваются облачные технологии. С точки зрения пользователя, это среда, скрывающая все технические и программные детали [2].

Понятие «облачные вычисления» означает, что хранение и обработка данных осуществляются не на стороне пользователя, а на стороне сервера. Применительно к различным аспектам облачных вычислений акцент можно делать либо на обработке, либо на хранении данных и организации доступа к ним. В таком подходе исследователи могут сосредоточиться только на выполнении численного моделирования.

Целью данной работы является создание веб-ориентированной платформы облачных вычислений на основе существующих решений в задачах гидродинамики. В этой статье рассмотрим возможность расширения функционала платформы разработанными модулями для поддержки запуска расчета задачи о течении жидкости в кубической каверне.

Разработка платформы под задачи гидродинамики является нетривиальной задачей, особенно разработка такой программной реализации, которая могла бы быть масштабируемой. Существуют платформы, которые специализированы под задачи гидродинамики, такие, как SimScale, ScaleX Platform, CONSELF и HPCCloud. Стоит отметить, что перечисленные платформы являются закрыто-разрабатываемыми, кроме открыторазрабатываемой платформы HPCCloud, в которой реализованы механизмы взаимодействия с вычислительными ресурсами и транслированием удаленной визуализации.

Архитектуру HPCCloud можно разделить на разные части (см. рис. 1, *a*). Основной частью является серверное приложение на Girder, которое отвечает за хранение данных и мониторинг выполнения расчётных задач [3]. Клиентское приложение реализует пользовательский интерфейс платформы и взаимодействие с сервером по протоколам HTTP и WebSocket. Брокер сообщений RabbitMQ и воркер задач Celery выполняют асинхронные и трудоемкие запросы на вычислительный кластер [4].



Рис. 1. Архитектура HPCCloud (a), процессы моделирования (b)

В платформе для автоматизации процессов моделирования разрабатываются модули для возможности запуска расчетной задачи (см. рис. 1, *b*). Модули включают себя клиентскую часть, где пользователю предоставляется пользовательский интерфейс для ввода параметров и в зависимости от них генерируются данные файлов, которые серверное приложение Girder отправляет на очередь в воркер задач, выполняющий асинхронные запросы на вычислительный кластер и предоставляющий для мониторинга информацию о состоянии выполняемой расчетной задачи.

В качестве расчетной задачи для разработки собственного модуля была выбрана задача о течении несжимаемой жидкости в кубической каверне, где описывается геометрическая область, которая состоит из трех неподвижных границ, а верхняя стенка двигается с определенной скоростью, из-за чего возникает круговое течение жидкости в каверне. Во время разработки модулей были встречены разные сложности, связанные с платформой, и необходимо было переделать dockerконфигурацию и сборку клиентского приложения, так как из-за этого было невозможно интегрировать современные инструменты и технологии.

После исправленных проблем для тестирования платформы был разработан модуль для моделирования течения в каверне, и модуль включал в себя пользовательский интерфейс для ввода параметров задачи, а на серверной части были подготовлены инструкции для возможности запуска ОрепFoam-задачи на вычислительном кластере КемГУ.

В ходе работы был проведен анализ предметной области, выполнен обзор, изучена и доработана выбранная платформа, разработан модуль для расчета задачи о течении жидкости в каверне и проведено ряд тестов на вычислительном кластере. Разработка веб-платформы ведётся открыторазрабатываемо, и исходный код доступен на ресурсе Github [5].

Таким образом, можно сделать выводы, что нет открытых и свободных платформ, в которых в полной мере были бы реализованы необходимые узкоспециализированные инструменты и остается актуальным развитие таких программных средств, которые бы реализовывали интерактивную среду для проведения исследований.

Литература

1. Удаленная визуализация больших объемов данных // Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика». 2015. Т. 4. №1. С. 21–32.

2. Перспективы развития облачных вычислений // Московский финансово-промышленный университет "Синергия" Прикладная информатика. 2009. №5 (23).

3. HPCCloud: A Cloud/Web-Based Simulation Environment // 2015 IEEE 7th International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom). 2015. P. 10.

4. *O'Leary P.* HPCCloud: Dynamic Provisioning and Execution of HPC Workflows Using Python / P. O'Leary, C. Harris, M. Grauer, A. Chaudhary, – 2016 6th Workshop on Python for High-Performance and Scientific Computing (PyHPC) – 2016. 10 p.

5. Dealenx/hpccloud-kemsu. Docker compose infrastructure for development HPCCloud [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/dealenx/hpccloud-kemsu (дата обращения: 14.03.2021).

References

1. Remote visualization of large data sets // Bulletin of the South Ural State University. Series «Computational Mathematics and Software Engineering ». 2015. Vol. 4. No. 1. P. 21–32.

2. The outlook for cloud computing // Moscow University Industry Finance Applied math. 2009. No 5 (23).

3. HPCCloud: A Cloud/Web-Based Simulation Environment // 2015 IEEE 7th International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom). 2015. P. 10. 4. *O'Leary P.* HPCCloud: Dynamic Provisioning and Execution of HPC Workflows Using Python / P. O'Leary, C. Harris, M. Grauer, A. Chaudhary, – 2016 6th Workshop on Python for High-Performance and Scientific Computing (PyHPC) – 2016. 10 p.

5. dealenx/hpccloud-kemsu. Docker compose infrastructure for development HPCCloud [Electronic resource]. URL: https://github.com/dealenx/hpccloud-kemsu (accessed: 14.03.2021).

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЯЗКОУПРУГОЙ ТРУБЫ С ВНУТРЕННИМ ПОКРЫТИЕМ ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ И ВСТАВКИ СО СЛОЖНЫМ ПРОФИЛЕМ

К.Е. Казаков

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Россия E-mail: kazakov-ke@yandex.ru

Ключевые слова: контактная задача, смешанное интегральное уравнение, вязкоупругость, покрытие, шероховатые поверхности.

Аннотация. Данная работа посвящена постановке и построению аналитического решения задачи о взаимодействии трубы с внутренним покрытием и жесткой вставки в случае, когда толщина покрытия и наружный радиус вставки зависят от продольной координаты. Указано, что математической моделью такой задачи является смешанное интегральное уравнение, содержащее сложные функции, описывающие профили контактирующих поверхностей. Специальный подход, использованный в данной работе, позволяет получать аналитическое решение, в котором указанные функции, выделены отдельными слагаемыми и множителями, что позволяет проводить эффективные расчеты даже в тех случаях, когда указанные формы описываются сложными функциями. Другие известные методы приводят к значительным ошибкам при проведении реальных расчетов, так как не учитывают особенностей входящих в состав уравнений функций.

INTERACTION OF A VISCOELASTIC TUBE WITH AN INNER COATING OF VARIABLE THICKNESS AND AN INSERT WITH A COMPLEX PROFILE

K. Kazakov

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation E-mail: kazakov-ke@yandex.ru

Keywords: contact problem, mixed integral equation, viscoelasticity, coating, rough surfaces.

Abstract. This work is devoted to the formulation and construction of an analytical solution for the problem of the interaction of a pipe with an inner coating and a rigid insert in the

case when the thickness of the coating and the outer radius of the insert depend on the longitudinal coordinate. It is indicated that the mathematical model of such a problem is a mixed integral equation containing complex functions that describe the profiles of the contacting surfaces. The special approach used in this work allows one to obtain an analytical solution in which described functions are separated by terms and factors, which makes it possible to carry out efficient calculations even in cases where these forms are described by complex functions. Other known methods lead to significant errors in real calculations since they do not take into account the features of the functions included in the equations.

Трубы широко используются в промышленности. Для предотвращения коррозии труб используются внутренние покрытия из материала, отличного от материала основного наружного (несущего) слоя. Например, стальная труба может покрываться слоем полимера. Толщина такого слоя может быть различной в различных сечениях трубы, что может быть связано с технологией изготовления такого покрытия. Жесткие вставки могут использоваться для соединения различных участков труб, а также для усиления длинных участков. Вставки также могут иметь сложный внешний профиль. За счет натяга, с которым труба надевается на вставку, в ней перераспределяются напряжения. Работа посвящена построению аналитического решения, позволяющего находить контактные напряжения в области взаимодействия жесткой вкладки и вязкоупругой стареющей трубы с внутренним покрытием с учетом сложных форм контактирующих поверхностей.



Рис. 1. Контакт жесткой вставки и трубы с внутренним покрытием

Можно показать, что математической моделью такой задачи является интегральное уравнение вида [1, 2].

$$(1 - v_{in}^{2})h_{in}(z) \left[\frac{q(z,t)}{E_{in}(t - \tau_{in})} - \int_{\tau_{0}}^{t} \frac{K_{in}(t,\tau)q(z,\tau)}{E_{in}(\tau - \tau_{in})} d\tau \right] + \frac{2(1 - v_{out}^{2})}{\pi} \left[\frac{1}{E_{out}(t - \tau_{out})} \int_{-a}^{a} k_{c} \left(\frac{z - \zeta}{r_{in}} \right) q(\zeta, t) d\zeta - \int_{\tau_{0}}^{t} \frac{K_{out}(t,\tau)}{E_{out}(\tau - \tau_{out})} \int_{-a}^{a} k_{c} \left(\frac{z - \zeta}{r_{in}} \right) q(\zeta, \tau) d\zeta d\tau \right] = g(z) - [r_{in} - h_{in}(z)], \quad z \in [-a,a], \quad t \ge \tau_{0}.$$

где q(z,t) – неизвестные контактные давления; $E_{out}(t)$ и $E_{in}(t)$ – модули упругомгновенной деформации основного слоя и покрытия, переменные за счет вязкоупругости и старения материалов; v_{out} и v_{in} – коэффициенты Пуассона основного слоя и покрытия, считающиеся постоянными; $K_{out}(t, \tau)$ и $K_{in}(t, \tau)$ – ядра ползучести соответствующих слоев [2, 3], τ_{out} и τ_{in} – моменты их изготовления; $h_{in}(z)$ – толщина покрытия; r_{in} – внутренний радиус основного слоя, равный внешнему радиусу внутреннего слоя; g(z) – переменный наружный диаметр вставки, ширина которой 2a; τ_0 – момент начала взаимодействия вставки и трубы; $K_c(s)$ – известное ядро цилиндрической задачи (оно учитывает, в том числе толщину основной трубы h_{out}) [1, 2].

Данное уравнение содержит как интегральные операторы с постоянными пределами интегрирования (операторы Фредгольма), так и оператор с переменным пределом интегрирования (операторы Вольтерра). Более того, в это уравнение входят функции $h_{in}(z)$ и g(z), которые описывают толщину покрытия и форму штампа и, следовательно, могут быть быстро изменяющимися.

Построение решения вышеописанного уравнения при помощи классических подходов, не учитывающих особенности входящих в уравнение функций (например, методом разложения в ряд по тригонометрическим или полиномиальным функциям), приводит к существенным трудностям при расчетах, связанных с тем, что исследователи вынуждены ограничиваться конечным, сравнительно небольшим, числом членов ряда (при большом их количестве начинает накапливаться вычислительная погрешность). Но малое количество слагаемых зачастую недостаточно для корректного разложения в ряд, например, функции, описывающей толщину покрытия. В данной работе применен особый подход, основанный на использовании специального представления решения и специальных базисных функций, построенных на основании имеющихся в уравнении особенностей [4]. Окончательная формула для вычисления контактных напряжений имеет вид

$$q(z,t) = \frac{E_{\text{in}}}{[1 - v_{\text{in}}^2]h_{\text{in}}(z)} \left[\sum_{k=0}^{\infty} f_k(t) \sum_{m=0}^{\infty} \psi_m^{(k)} p_m\left(\frac{z}{a}\right) + g(z) - (r_{\text{in}} - h_{\text{in}}(z)) \right], \quad z \in [-a, a], \quad t \ge \tau_0.$$

Здесь $f_k(t)$ – непрерывная функция времени; $p_m(s)$ – многочлены порядка m; $\psi_m^{(k)}$ – коэффициенты.

В выражении для контактных напряжений в области взаимодействия функции, описывающие толщину покрытия и наружный радиус вставки, выделены в виде отдельных слагаемых и сомножителей. Поэтому при проведении реальных расчетов можно ограничиться сравнительно небольшим количеством слагаемых в ряде, исключив тем самым накапливание вычислительной погрешности и обеспечив достижение высокой точности за счет удачного представления решения. Это позволит исследователям и инженерам корректно учесть профили контактирующих поверхностей, что важно при анализе напряженно-деформированного состояния трубы, с размещенной в ней вставкой. Полученное решение предоставляет возможность проводить более точный анализ такого сопряжения при оценке долговечности и надежности конструкции в целом.

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А20-120011690132-4) и частично поддержана грантом РФФИ №19-51-60001.

Литература

1. Манжиров А.В., Черныш В.А. Контактная задача для слоистого неоднородного стареющего цилиндра, подкрепленного жестким кольцом // Прикладная механика и техническая физика. 1990. № 6. С. 101–109.

2. *Арутюнян Н.Х., Манжиров А.В.* Контактные задачи теории ползучести. Ереван: Изд-во НАН РА, 1999.

3. Арутюнян Н.Х. Некоторые вопросы теории ползучести. М.; Л.: Гостехиздат, 1952.

4. *Манжиров А.В., Казаков К.Е.* Моделирование контактного взаимодействия неодноро основания с шероховатым штампом // Математическое моделирование. 2017. Т. 29. № 10. С. 95–104.

References

1. *Manzhirov A.V., Chernysh V.A.* Contact problem for a layered inhomogeneous aging cylinder reinforced by a rigid ring // J. Appl. Mech. Techn. Phys. 1990. Vol. 31. No 6. P. 894–900. Doi: 10.1007/BF00854204

2. Arutyunyan N.Kh., Manzhirov A.V. Contact Problems of the Theory of Creep Erevan: Izdat. NAN RA, 1999 [in Rus.].

3. Arutyunyan N.Kh. Some Questions in the Creep Theory. Moscow-Leningrad: Gostekhizdat, 1952) [in Rus.].

4. *Manzhirov A.V., Kazakov K.E.* Modeling the contact interaction between a nonuniform foundation and a rough punch // Math. Models Comput. Simulat. 2018. Vol. 10. No 3. P. 314–321. Doi: 10.1134/S2070048218030109.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПОЛИТРОПНОГО ГАЗА, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ГАЗА В ВАКУМ ПОСЛЕ РАСПАДА СПЕЦИАЛЬНОГО РАЗРЫВА

А.В. Мезенцев, С.Л. Дерябин

Уральский государственный университет путей сообщения, Россия E-mail: amezentsev@usurt.ru

Ключевые слова: политропный газ, вакуум, граница, сила тяжести, распад разрыва.

Аннотация. В работе рассматривается задача о распаде специального разрыва для двумерных изэнтропических течений политропного газа. В качестве математической модели используется система уравнений газовой динамики, учитывающая действие силы тяжести. Для системы ставится начально-краевая задача, начальные и граничные условия для которой строятся в виде отрезков рядов. Построено численное решение задачи в области волны разрежения.

NUMERICAL SIMULATION OF TWO-DIMENSIONAL POLYTROPIC GAS FLOWS THAT OCCUR WHEN A GAS FLOWS INTO A VACUUM AFTER THE BREAKUP OF A SPECIAL DISCONTINUITY

A. Mezentsev, S. Derybin

¹Ural State University of Railway Transport (USURT), Russian Federation E-mail: amezentsev@usurt.ru

Keywords: polytropic gas, vacuum, boundary, gravity, breakup of discontinuity.

Abstract. The paper deals with the problem of the breakup of a special discontinuity for two-dimensional isentropic flows of a polytropic gas. As a mathematical model, we use a system of gas dynamics equations that takes into account the action of gravity. For the system, an initial-boundary value problem is set, the initial and boundary conditions for which are constructed in the form of series segments. A numerical solution of the problem in the rarefaction wave domain is constructed.

Актуальность применения численных методов для решения задачи моделирования течений газа, возникающих после распада специального разрыва, определяется тем, что в отличие от аналитических методов они позволяют строить поля течений на сравнительно больших промежутках времени. Аналитическим методам решения таких задач посвящена работа [1]. В ней для описания двумерных изэнтропических течений политропного газа, возникающих после разрушения плотины в физическом пространстве, использовалась задача о распаде специального разрыва. В задаче предполагается, что в начальный момент времени t = 0 слева от непроницаемой стенки Γ с уравнением x = 0 находится вакуум, а справа – неоднородный покоящийся газ. На границе Γ имеет место разрыв плотности газа. В момент времени t = 0 непроницаемая стенка Г мгновенно разрушается и начинается движение газа. В образовавшемся течении волна разрежения примыкает к вакууму через свободную границу Γ_{02} и отделена от области покоящегося газа линией Γ_{12} , являющейся звуковой характеристикой этих течений. На характеристике Γ_{12} имеет место слабый разрыв. Предполагается, что на границе Γ_{02} между водой и воздухом плотность среды во все моменты времени равна нулю. Последнее предположение делает используемую модель приближенной. В задаче требуется построить волну разрежения и найти законы движения границ Γ_{02} , Γ_{12} .

В качестве математической модели для описания изэнтропических течений идеального политропного газа используется система уравнений газовой динамики [2, 3], учитывающая действия силы тяжести [1]. Неизвестными функциями в ней являются: c – скорость звука; u, w – проекции вектора скорости газа на декартовы оси, а независимыми переменными – t, x, z. Распределение скорости звука покоящегося газа задается функцией

$$c^{0}(z) = \sqrt{c_{00}^{2} - (\gamma - 1)gz}$$
,

где c_{00} — скорость звука покоящегося газа при z = 0; g — ускорение свободного падения.

В работе [1] для построения обобщенной центрированной волны Римана [5] в системе уравнений газовой динамики вводится нестационарная автомодельная переменная y = x/t, после введения которой система уравнений преобразуется к виду:

$$t(c_{t} + c_{z}w) + (u - y)c_{y} + \frac{\gamma - 1}{2}c(u_{y} + tw_{z}) = 0,$$

$$t(u_{t} + u_{z}w) + (u - y)u_{y} + \frac{2}{\gamma - 1}cc_{y} = 0,$$

$$t(w_{t} + w_{z}w) + (u - y)w_{y} + \frac{2}{\gamma - 1}tcc_{z} = -gt,$$

(1)

Для полученной системы (1) ставится задача Коши с данными на звуковой характеристике. Решение, поставленной краевой задачи, построено в [1] в виде сходящихся степенных рядов. В частности, для описания волны разрежения построен ряд по степеням *t*. Также в [1] были найдены граничные условия на звуковой характеристике Γ_{12} . При этом сама характеристика Γ_{12} задается аналитической функцией [1]:

$$y = c^{0}(z) + \frac{(\gamma - 1)^{2} g^{2}}{4c^{0}(z)} \frac{t^{2}}{3!} + \dots$$
(2)

В данной работе для численного построения волны разрежения при t > 0 используются отрезки полученных в [1] рядов, а в качестве приближенного уравнения для границы газ–вакуум берется функция $y = -2c^0(z)/(\gamma-1)$. Для описания закона движения границы Γ_{02} получена формула $y = -2c^0(z+gt^2/2)/(\gamma-1)$.

Расчеты проводятся в безразмерных величинах, где в качестве масштабных значений скорости звука, расстояния и времени c = 1, z = 1, t = 1берутся следующие значения: 1500 м/с., 100 метров и 0.067 секунд. При таком выборе масштабных величин безразмерное значение ускорения свободного падения, соответствующее 9.8 м/с², равно g = 0.00044. Ввиду малости безразмерного значения g^2 в формуле (2), в качестве приближенного уравнения, описывающего закон движения характеристики Γ_{12} , берется $y = c^0(z)$.



Для численного построения волны разрежения, описываемой системой (1) ставится начально-краевая задача, где в качестве начальных условий для системы (1) при $t = t_0 > 0$ берутся первые слагаемые построенных в [1] рядов. Значения z берутся из отрезка [z_0 ; z_1], где $0 < z_0 < z_1 < z_2$, $z_2 = = c_{00}^2/(\gamma-1)g$ (рис. 1). Безразмерное значение z_2 равно 377.53, а безразмерные значения концов отрезка [z_0 , z_1] берутся равными $z_0 = 0.1$, $z_1 = 1.1$. Для расчета двумерного течения в области волны разрежения производится замена переменных и строится равномерная прямоугольная сетка. Расчеты ведутся по явной разностной схеме [4]. Граничные условия на прямых $z = z_0$ и $z = z_1$ определяются в расчетах путем линейной интерполяции значе-

ний функции на соседних к границам узлах сетки. По окончании расчетов производится обратная замена переменных.

Расчеты показали, что первые слагаемые построенных в [1] рядов позволяют построить течение в области волны разрежения на достаточно большом интервале времени. С помощью явной разностной схемы проведено численное моделирование от границы газ–вакуум до приближенной к звуковой характеристике линии $y = c^0(z)$. Получены поля течений для различных интервалов времени [t_0 ; t_1].

Литература

1. Дерябин С.Л., Кирьянова А.С. Построение двумерных течений, возникающих после распада специального разрыва с автомодельной особенностью в независимой переменной // Математические структуры и моделирование. 2019. № 4(52). С. 56–69.

2. Седов Л.И. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1970. Т. 1. 492 с.

3. *Овсянников Л.В.* Лекции по основам газовой динамики. Москва; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 336 с.

4. *Пирумов У.Г., Росляков Г.С.* Численные методы газовой динамики. М.: Высш. шк., 1987. 232 с.

5. Риман Б. Сочинения. М.; Л.: ГИТТЛ, 1948. 291 с.

References

1. Deryabin S.L., Kiryanova A.S. Constructions of two dimensional flows arising after the decay of a special discontinuity with a self-similar singularity in an indent variable // Mathematical Structures and Modeling. 2019. No. 4(52). P. 56–69.

2. Sedov L.I. Continuum mechanics. Moscow: Nauka, 1970. Vol. 1. 492. P. (in Rus.)

3. *Ovsyannikov L.V.* Lectures on the basics of gas dynamics. Moscow, Izhevsk: Institute of Computer Research, 2003. 336 p. (in Rus.)

4. *Pirumov U.G., Roslyakov G.S.* Numerical methods of gas dynamics. Moscow: High School, 1987. 232 p. (in Rus.)

5. Riman B. Essays. M.; L.: GITTL, 1948. 291 p. (in Rus.)

О СКАЧКАХ НАПРЯЖЕНИЙ ВНУТРИ ПОСЛОЙНО ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Д.А. Паршин

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Россия E-mail: parshin@ipmnet.ru

Ключевые слова: послойное изготовление, вязкоупругость, старение, скачки напряжений, аналитическая зависимость.

Аннотация. Работа посвящена выяснению механических причин зарождения и количественному описанию процесса дальнейшего развития скачков напряжений внутри произвольного послойно формируемого твердого тела, типичных для картины его напряженного состояния. Работа опирается на математический аппарат, развиваемый в трудах отечественной научной школы по механике растущих тел. Исследованы общий случай и ряд частных случаев, важных с практической точки зрения. Полученные результаты могут быть применены при изучении механического поведения послойно изготавливаемых деформируемых твердых тел при часто встречающихся на практике условиях их роста и деформирования и достаточно общих ограничениях на характер экспериментально наблюдаемых кривых ползучести материала.

ON STRESS JUMPS INSIDE LAYER-BY-LAYER FABRICATED DEFORMABLE SOLIDS

D. Parshin

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Russian Federation E-mail: parshin@ipmnet.ru

Keywords: layer-by-layer fabrication, viscoelasticity, aging, stress jumps, analytical dependence.

Abstract. The study is devoted to elucidating the mechanical causes of the origination and to quantitative description of the process of further development of stress jumps inside an arbitrary layer-by-layer formed solid, which are typical for its stress state. The study is based on the mathematical apparatus developed in the works of the Russian scientific school on mechanics of growing solids. The general case and a number of special cases being important from the practical point of view are investigated. The results obtained can be applied to investigation of the mechanical behavior of layer-by-layer produced products under conditions of their growth and deformation that are often encountered in practice, and under fairly general restrictions on the properties of the experimentally observed creep curves of the material.

В классической механике деформируемого твердого тела рассматриваются тела постоянного материального состава в течение всего процесса деформирования. В то же время существуют и активно применяются такие методы производства изделий, при которых эти изделия деформируются уже в процессе их изготовления. Речь идет, прежде всего, о различных аддитивных технологиях производства, иными словами о технологиях послойного создания деформируемых твердых тел. Процессы деформирования послойно формируемых, или, как уже принято говорить в механике, наращиваемых тел характеризуются несовместностью возникающих в них деформаций. В этой ситуации задачи о деформировании твердого тела при зависящем от времени отклике материала на приложенные нагрузки приобретают большую математическую сложность. Это объясняется взаимодействием двух развивающихся во времени сложных процессов – деформирования и роста тела (подробнее об этом см., например, в [1]).

Поскольку напряженно-деформированное состояние наращиваемого твердого тела определяется реализуемой программой его роста, то типичным для картины напряженного состояния любого такого тела при его

наращивании за несколько этапов будет зарождение и развитие со временем внутри него разрывов напряжений – на поверхностях, разделяющих части этого тела, сформированные на разных этапах.

Данная работа посвящена выяснению механических причин и количественному описанию этого явления. Отметим, что результаты такого исследования весьма актуальны при анализе остаточных напряжений в наращиваемых телах [2], оценке вероятности разрушения изделия во время и по окончании его изготовления [3], решении различных контактных и износо-контактных задач для послойно сформированных тел [4, 5].

Работа опирается на математический аппарат, развиваемый в трудах отечественной научной школы по механике растущих тел, созданной профессором А.В. Манжировым (краткий обзор литературы по этому вопросу можно найти, например, в [1]). Рассматривается поведение произвольного тела, растущего за счет послойного добавления к нему однородного стареющего изотропного вязкоупругого материала. Функция полной удельной (на единицу действующей постоянной нагрузки) деформации чистого сдвига такого материала имеет вид:

$$\delta(t, t_0) = \mu(t_0)^{-1} + g(t, t_0), \qquad (1)$$

где t_0 – возраст материала в момент приложения к нему нагрузки; $t \ge t_0$ – время; μ – модуль упругости второго рода; g – сдвиговая мера ползучести.

Уравнения состояния материала при произвольном переменном во времени пространственном напряженном состоянии можно получить из (1) с помощью принципа суперпозиции для конкретных эмпирических ограничений на упруго-мгновенный и наследственный коэффициенты поперечной деформации. В настоящей работе принимается, что эти коэффициенты постоянны и совпадают между собой, что соответствует экспериментально наблюдаемым кривым ползучести ряда распространенных стареющих вязкоупругих материалов и приводит к уравнениям состояния с единственным ядром релаксации $K^{rel}(t,t_0)$, которое выражается через введенные выше характеристики материала.

Доказано, что в точках **х** поверхности Σ_1 внутри послойно формируемого твердого тела, разделяющей его первоначально существующую, V_0 , и получаемую за первый этап непрерывного наращивания, V_1 , части, скачки напряжений σ развиваются со временем *t* согласно следующему закону:

$$\frac{\sigma(\mathbf{x}',t)\big|_{\mathbf{x}'\to\mathbf{x}\in\Sigma_{1}}-\sigma(\mathbf{x}',t)\big|_{\mathbf{x}'\to\mathbf{x}\in\Sigma_{1}}}{\mu(t)} = \left(\int_{t_{1}}^{t} K^{\mathrm{rel}}(t,\tau)d\tau+1\right)\left(s(\mathbf{x}',t_{1})\big|_{\mathbf{x}'\to\mathbf{x}\in\Sigma_{1}}-\frac{\sigma_{0}(\mathbf{x}')\big|_{\mathbf{x}'\to\mathbf{x}\in\Sigma_{1}}}{\mu(t_{1})}\right)+\int_{t_{0}}^{t}s(\mathbf{x}',\tau)\big|_{\mathbf{x}'\to\mathbf{x}\in\Sigma_{1}}K^{\mathrm{rel}}(t,\tau)d\tau,$$
(2)

где $t_0 > 0$ и $t_1 \ge t_0$ – соответственно моменты приложения нагрузок к части V_0 и начала ее последующего наращивания,

$$s(\mathbf{x}',t) = \frac{\sigma(\mathbf{x}',t)}{\mu(t)} - \int_{t_0(\mathbf{x})}^t \frac{\sigma(\mathbf{x}',\tau)}{\mu(\tau)} R^{\mathrm{rel}}(t,\tau) d\tau,$$

 $R^{\rm rel}(t,\tau) = \mu(\tau) \, \delta'_{\tau}(t,\tau)$ – резольвента ядра релаксации $K^{\rm rel}$; $t_0({\bf x}')$ – моменты времени, начиная с которых окрестности точек ${\bf x}'$ деформируются внутри рассматриваемого тела; $\sigma_0({\bf x}')$ — соответствующие этим моментам начальные напряжения в точке ${\bf x}'$, связанные с напряженным состоянием материала в окрестностях присоединившихся новых точек.

Формула (2) позволяет сделать вывод, что процесс развития скачков неконтактных напряжений внутри наращиваемого тела в точках поверхности Σ_1 зависит от свойств материала, моментов приложения нагрузки к первоначально существующей части тела и начала ее наращивания, всего процесса деформирования этой части в окрестности рассматриваемой точки вплоть до момента начала наращивания и начальных напряжений в этой окрестности в момент начала наращивания. Зависимость (2) имеет ряд важных, с практической точки зрения, частных случаев, которые отдельно исследованы в работе.

Полученные результаты могут быть применены при изучении механического поведения послойно изготавливаемых деформируемых твердых тел при часто встречающихся на практике условиях их роста и деформирования и достаточно общих ограничениях на характер экспериментально наблюдаемых кривых ползучести материала.

Работа выполнена по теме госзадания № АААА-А20-120011690132-4 и частично в рамках проекта РФФИ № 18-01-00920-а.

Литература/References

1. *Parshin D.A.* Mathematical modelling of the process of internal technological stress fields development in cylindrical solids being layer-by-layer made of ageing viscoelastic materials // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1479. P. 012145.

2. Bychkov P.S., Kozintsev V.M., Manzhirov A.V., Popov A.L. Determination of residual

stresses in products in additive production by the layer-by-layer photopolymerization method // Mechanics of Solids. 2017. Vol. 52. No 5. P. 524–529.

3. *Hakobyan V.N., Amirjanyan H.A., Kazakov K.Ye.* Axisymmetric stressed state of uniformly layered space with periodic systems of internal disc-shaped cracks and inclusions // Herald of the Bauman Moscow State Technical University: Natural Sciences Series. 2020. Vol. 89. No 2. P. 25–40.

4. *Manzhirov A.V., Kazakov K.E.* Axisymmetric problem of fretting wear for a foundation with a nonuniform coating and rough punch // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1959. P. 070023.

5. *Kazakov K.E., Kurdina S.P.* Contact problems for bodies with complex coatings // Mathematical Methods in the Applied Sciences. 2020. Vol. 43. No 13. P. 7692–7705.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ДЕФОРМИРОВАНИИ ПОСЛОЙНО УТОЛЩАЕМОЙ НАГРУЖЕННОЙ ОПОРЫ ИЗ ВЯЗКОУПРУГОГО СТАРЕЮЩЕГО МАТЕРИАЛА В УСЛОВИЯХ ЗАДАНИЯ ТОЛЬКО ГЛАВНОГО ВЕКТОРА СЖИМАЮЩИХ УСИЛИЙ

Д.А. Паршин

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Россия E-mail: parshin@ipmnet.ru

Ключевые слова: послойное утолщение, аддитивное изготовление, нагруженная опора, сжимающие усилия, главный вектор нагрузки, вязкоупругость.

Аннотация. Рассматриваются процессы аддитивного утолщения опор с использованием стареющего вязкоупругого материала, обладающих произвольной конусностью и несущих распределенную по торцевой поверхности сжимающую нагрузку. Торцевая поверхность опоры увеличивается в размерах с течением времени за счет добавления нового материала. В рамках применяемых подходов к решению задач механики наращиваемых тел это приводит к серьезным математическим сложностям в том случае, когда известен только главный вектор действующей торцевой нагрузки. В работе доказаны утверждения, позволяющие построить решение соответствующей неклассической начально-краевой задачи для исследуемого процесса. С их помощью выполнены расчеты для различных программ и режимов утолщения. Продемонстрированы эффекты, которые не могут быть предсказаны традиционными прочностными расчетами. Полученными результатами удается воспользоваться для организации технологического управления рассматриваемым процессом, приводящего к эффективному использованию материала утолщенной опоры.

SOLUTION OF THE PROBLEM ON DEFORMATION OF A LAYER-BY-LAYER THICKENED BURDENED SUPPORT MADE OF VISCOELASTIC AGING MATERIAL UNDER CONDITIONS OF AWARENESS OF ONLY THE RESULTANT VECTOR OF COMPRESSIVE FORCES

D. Parshin

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Russian Federation E-mail: parshin@ipmnet.ru

Keywords: layer-by-layer thickening, additive manufacturing, burdened support, compressive forces, resultant vector of loading, viscoelasticity.

Abstract. The processes of additive thickening of supports with an arbitrary conicity using an aging viscoelastic material, which are bearing a compressive load distributed over the end surface, are considered. The end surface of the support increases in size over time due to the addition of new material. In the framework of applied approaches to solving mechanical problems for growing solids, this leads to serious mathematical difficulties in the case when only the resultant vector of the acting end load is known. In this work, we prove statements that allow us to construct a solution of the corresponding non-classical initial-boundary value problem for the process under study. These statements are used to perform calculations for various programs and modes of thickening. Effects that cannot be predicted by traditional strength calculations are demonstrated. The results obtained can be used to organize a technological control of the process under consideration leading to an effective employment of the thickened support material.

В работе рассматриваются процессы послойного (аддитивного) утолщения опор, обладающих произвольной конусностью и несущих распределенную по торцевой поверхности сжимающую нагрузку. Считается, что используемый материал обладает вязкоупругими свойствами, которые могут изменяться с течением времени независимо от действия нагрузок, и является однородным и изотропным с точки зрения этих свойств. Уравнение состояния данного материала берется в виде [1]:

$$2\xi_{ij}(\mathbf{x},t) + \frac{2\nu}{1-2\nu} \,\delta_{ij}\xi_{kk}(\mathbf{x},t) = \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\sigma_{ij}(\mathbf{x},t)}{\mu(t)} - \int_{t_0(\mathbf{x})}^t \sigma_{ij}(\mathbf{x},\tau) \,\frac{\partial \left[\,\mu(\tau)^{-1} + g(t,\tau) \,\right]}{\partial \tau} d\tau \right\},\tag{1}$$

где **х** – произвольная точка тела; t – время, отсчитываемое от момента зарождения материала; ξ_{ij} – компоненты тензора скоростей деформации; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; δ_{ij} – компоненты единичного тензора; ν – постоянный коэффициент поперечной деформации материала; одинаковый для упруго-мгновенной деформации и для деформации ползучести; $\mu(\tau)$ – модуль упругости второго рода материала в его возрасте τ ; $g(t,\tau)$ – мера ползучести при чистом сдвиге, определяющая развитие во времени t запаздывающего деформационного отклика материала на постоянную сдвиговую нагрузку, приложенную в возрасте τ ; $t_0(\mathbf{x})$ – моменты времени, начиная с которых окрестности точек \mathbf{x} деформируются в составе рассматриваемого тела. Переход к скоростям деформации связан с невозможностью традиционного описания кинематики деформирования растущего тела – ввиду отсутствия у него отсчетной конфигурации, свободной от напряжений [2].

Торцевая поверхность опоры увеличивается в размерах с течением времени за счет добавления нового материала. В рамках применяемых подходов к решению задач механики наращиваемых тел, разработанных профессором А.В. Манжировым и его учениками [3], приводит к серьезным математическим сложностямт огда, когда известен только главный вектор действующей торцевой нагрузки. Указанные сложности связаны с принципиальной зависимостью нижнего предела интегрирования t_0 в используемом уравнении состояния (1), который имеет смысл момента начала развития напряжений в рассматриваемой точке растущего тела, от радиус-вектора х этой точки, коль скоро все точки такого тела включаются в процесс его деформирования не одновременно, а лишь по мере их вхождения в материальный состав этого тела. Вычисление главного вектора торцевой нагрузки предполагает интегрирование по расширяющейся торцевой поверхности нагруженной опоры, причем соответствующий интеграл, согласно применяемым математическим методам, необходимо переставить с интегралом по времени из (1). Такая перестановка, именно в силу указанной зависимости от пространственных переменных одного из пределов интегрирования по времени, требует доказательства справедливости определенных соотношений для компонент тензора напряжений в рассматриваемом растущем теле. Это доказательство проведено в работе. На его основе сконструировано аналитическое решение поставленной для исследуемого процесса роста неклассической начально-краевой задачи механики.

С помощью построенного решения выполнены числовые расчеты для разнообразных вариантов утолщения и нагружения рассматриваемого вида опор. Продемонстрирован ряд механических эффектов, предсказание которых невозможно в рамках классической механики деформируемого твердого тела. В частности, возникновение эволюционирующих с течением времени разрывов неконтактных напряжений на границе раздела первоначально существующей и сформированной в результате утолщения частей рассматриваемой нагруженной опоры.

Исследовано влияние скорости протекания процесса утолщения, то есть темпа присоединения к опоре слоев дополнительного материала, на итоговые распределения напряжений в готовой опоре. Поскольку боковая по-

верхность первоначально существующей части опоры в момент начала присоединения к ней нового материала находится в процессе деформирования вследствие ползучести, то любой присоединенный новый слой материала будет вовлекаться в процесс деформирования, изменяя напряженное состояние всей утолщаемой опоры. Однако каким образом будет происходить это изменение, будет определяться соотношением скоростей протекания процесса ползучести в рассматриваемом материале и протекания процесса утолщения.

Данная постановка задачи подразумевает произвольное изменение конусности опоры в процессе ее утолщения. Так, допустимым является вариант утолщения первоначально цилиндрической опоры, в результате которого эта опора приобретает ненулевую конусность, и вариант, при котором опора изначально конической формы изменяет в процессе утолщения направление уклона своей поверхности.

Главный вектор торцевой нагрузки может также произвольным образом менять свою величину во время и по завершении утолщения. Эта величина является по существу управляющим параметром, целенаправленное изменение которого по некоторым заранее предписанным программам может приводить к определенным, выгодным с той или иной точки зрения, распределениям напряжений в утолщаемой опоре, как непосредственно во время ее утолщения, так и спустя длительное время после его завершения. Адекватный выбор таких программ возможен только на основе корректного математического моделирования процесса развития напряженного состояния опор, постепенно утолщаемых в рассматриваемых условиях. Разработанная в работе модель позволяет осуществить такой выбор.

Например, оказывается возможным таким образом организовать силовое управление процессом утолщения, что заданная сжимающая осевая нагрузка, которую должна сколь угодно долго нести опора, будет эффективно перераспределена с первоначально существующей, центральной, части опоры на дополнительно присоединенный к ней в результате утолщения материал.

Таким образом, результаты работы могут быть использованы при оптимальном проектировании несущих опор и при разработке технологических процессов их изготовления и усиления. Также следует заметить, что построенная в работе математическая модель может быть применена для анализа технологических распределений напряжений в осесимметричных изделиях после нанесения на них слоев покрытий, что актуально, в частности, при постановке и решении износо-контактных задач для таких изделий [4].

Работа выполнена по теме госзадания № АААА-А20-120011690132-4 и частично в рамках проекта РФФИ № 18-01-00920-а.

Литература

1. *Арутюнян Н.Х., Манжиров А.В.* Контактные задачи теории ползучести. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1990; Изд-во НАН РА, 1999. 318 с.

2. *Manzhirov A.V., Parshin D.A.* Mechanical modeling additive processes of rotational molding in case of viscoelastic behavior of the being manufactured articles // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2116. P. 380014.

3. *Manzhirov A.V.* Some problems in mechanics of growing solids with applications to am technologies // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 991. P. 012056.

4. *Kazakov K.E., Kurdina S.P.* Wear of a high pressure layered pipe by a rough rigid bush // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 904. P. 012010.

References

1. *Arutyunyan N.Kh., Manzhirov A.V.* Contact Problems of the Theory of Creep. Erevan: Izdatel'stvo Instituta Mekhaniki NAN RA, 1999. 318 p. [in Russian].

2. *Manzhirov A.V., Parshin D.A.* Mechanical modeling additive processes of rotational molding in case of viscoelastic behavior of the being manufactured articles // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2116. P. 380014.

3. *Manzhirov A.V.* Some problems in mechanics of growing solids with applications to am technologies // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 991. P. 012056.

4. *Kazakov K.E., Kurdina S.P.* Wear of a high pressure layered pipe by a rough rigid bush // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 904. P. 012010.

СРЕДА ПРОГРАММИРОВАНИЯ «АЛГОЗИТ» ДЛЯ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД

А.Е. Паульзен¹, В.О. Каледин¹, С.В. Пономарев², С.В. Белов²

¹Новокузнецкий институт (филиал) «Кемеровский государственный университет», Россия ² Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия

E-mail: anna310591@yandex.ru

Ключевые слова: визуальное программирование, функционально-объектная схема, разработка алгоритмов.

Аннотация. Раскрываются особенности среды программирования «Алгозит» для функционально-объектной реализации алгоритмов вычислительного эксперимента в механике сплошных сред. Основная особенность среды программирования «Алгозит» – возможность визуального конструирования вычислительных программ в виде схем функциональных зависимостей специализированных конечных автоматов (алгоматов). Гибкая модификация программного обеспечения при изменении рабочих гипотез возможна только в том случае, когда исходный код программы достаточно наглядно представляет как математическую модель, так и алгоритм вычислений. Существующие решения в этой области в основном базируются на двух парадигмах: объектноориентированного и функционального программирования. Описывается архитектура комплекса и предлагается технология, обеспечивающая наглядность представления сложных алгоритмов и возможность удобной отладки программ на основе визуального программирования функционально-объектных схем. Предлагаемый вариант парадигмы функционально-объектного программирования позволяет строить расширяемые вычислительные комплексы для решения задач механики и термомеханики гетерогенных сред и конструкций из композитных материалов.

PROGRAMMING ENVIRONMENT «ALGOZIT» FOR SOLVING CONTINUUM MECHANICS PROBLEMS

A. Paulzen¹, V. Kaledin¹, S. Ponomarev², S. Belov²

¹The Novokuznetsk branch of the Kemerovo State University, Russian Federation ²National Research Tomsk State University, Russian Federation E-mail: anna310591@yandex.ru

Keywords: visual programming, functional-object scheme, development of algorithms.

Abstract. The specific features of the programming environment "Algozit" for object – functional implementation of numerical algorithms in continuum mechanics are proposed. The main feature of the "Algosit" programming environment is the possibility of visual design of computational programs in the form of functional dependency schemes of specialized finite state machines (algomats). Flexible modification of the software when changing working hypotheses is possible only if the source code of the program sufficiently clearly represents both the mathematical model and the calculation algorithm. The existing solutions in this area are mainly based on two paradigms: object-oriented and functional programming. The environment architecture is described. The technology, providing visualization of complex numerical algorithms and convenient program debugging is stated. Both abovementioned aspects are based on the object-functional schemes. The proposed version of the functional – object programming paradigm allows us to build extensible computing systems for solving problems of mechanics and thermomechanics of heterogeneous environments and structures made of composite materials.

Введение. Программная реализация сеточных методов, и в частности – метода конечных элементов, считается трудоёмкой задачей, непосильной для разработчика-одиночки и требующей усилий больших коллективов. Этим вызвано распространение дорогостоящих универсальных программных комплексов.

По причине невозможности для пользователя составить полное представление о численных методах, реализованных в этих комплексах, возникает иллюзия полной достоверности данных, получаемых расчётом, и ненужности вникать в существо используемых методов и алгоритмов. Тем самым происходит снижение квалификации пользователей в их прикладных областях. Часто применяются неоправданно сложные расчётные схемы для решения относительно простых задач, что снижает производительность труда расчётчиков. При разработке и внедрении новых алгоритмов в специализированных программных продуктах программисты-прикладники сталкиваются с проблемами наглядности выполняемых алгоритмов, простоты их модификации и отладки. Для этого программные продукты одновременно должны быть средами разработки, включающими систему программирования на универсальном языке только в качестве одной из подсистем [1, 2].

Целью предлагаемой технологии, реализованной в среде функционально-объектного программирования «Алгозит» [3], является обеспечение наглядности представления сложных алгоритмов и возможность удобной отладки программ на основе визуального программирования функционально-объектных схем.

Областью применения данной технологии является конструирование сложных алгоритмов технических расчетов [4]. В частности, на данной платформе реализован метод конечных элементов, который применяется при анализе напряженно-деформированного состояния любых объектов: сложных конструкций тяжелого машиностроения, рудных массивов и т.д. Но технология может быть использована для построения любых алгоритмов.

Архитектура комплекса. Программная реализация в среде «Алгозит» заключается, с одной стороны, в кодировании классов функциональных объектов на языке С++, и с другой стороны – в конструировании визуальных алгоритмов в виде функционально-объектных схем [3]. Благодаря достаточно широкому набору предварительно реализованных функциональных классов, во многих случаях при разработке программ удаётся обойтись без дополнительного написания специальных классов.

Классы функциональных объектов – это классы С++, определенные внутри динамически подключаемой библиотеки «Фабрика объектов». Они являются наследниками базового класса, в котором определены перекрываемые и переключаемые методы специального назначения: выполнения, инициализации аргументов, чтения из файла, запись в файл и т.д. Все данные методы или их часть могут быть перекрыты в классах-наследниках для реализации логики выполнения конкретного алгоритма. Базовый класс содержит статические методы, в которых определено поведение самого объекта как конечного автомата.

Каждый экземпляр функционального класса, используемый в функционально-объектной схеме алгоритма, реализует конкретную подпрограмму целого алгоритма. Следствием этого является то, что при выполнении алгоритма по шагам есть возможность осуществлять контроль промежуточных данных через просмотр содержимого памяти объекта или файла с промежуточными данными без использования среды программирования. При разработке и внедрении новых алгоритмов расчета данная возможность активно используется.
Функциональный объект, являющийся экземпляром класса на C++, имеет поведение, ограниченное чётко определёнными правилами; он отличается от более общего общепринятого понятия «функциональный объект», и поэтому для него введён специальный термин – «алгомат». С точки зрения деталей реализации, алгомат – это экземпляр класса; с точки зрения реализации алгоритма как целого, алгомат является некоторым уровнем абстракции, не зависящим от среды реализации. Алгомат наделён функциональностью, которая позволяет ему вычислять значения и хранить их в своей памяти.

Множество алгоматов, соединенных между собой функциональными связями, образуют ориентированный нециклический граф (сеть), изображаемый функционально-объектной схемой. Узлы графа изображают алгоматы, рёбра – их связи. Кроме узлов схемы, изображающих выполняемые объекты, существуют структурообразующие алгоматы. Они влияют на организацию выполнения команд: построение циклов, ветвлений, укрупнение схем и получение ссылок на алгоматы других страниц. Наличие таких средств обеспечивает возможность построения нетривиальных последовательностей команд выполнения блоков и сжатия некоторых повторяющихся подграфов в один или несколько элементов в исходной схеме.

Схема представляет собой часть исходного представления алгоритма. Она строится средствами модуля «Конструктор» и преобразуется модулем «Транслятор» в последовательность команд с учетом правил построения циклов, ветвлений и других структурных единиц программы. Операндами команд являются алгоматы. Команды разделяются на типы в зависимости от назначения: разыменование ссылки; вычисление алгомата; передача данных от одного алгомата к другому; начало цикла и т.д. Отметим, что преобразование функционально-объектных схем в список команд полностью автоматизировано и не требует участия пользователя.

Выполнение полученных команд осуществляется модулем «Интерпретатор». При загрузке оттранслированной программы для каждого алгомата создается и инициализируется экземпляр соответствующего класса. Все классы реализованы в отдельной динамически подключаемой библиотеке «Фабрика объектов»; код этих классов открыт.

По мере выполнения команд, функциональные классы генерируют промежуточные и выходные данные, которые записывают в файлы, которые могут интерпретироваться сервисными модулями «Экспорт данных» и «Графика». Сервисные модули служат для удобства анализа выходных данных.

Среда функционально-объектного программирования «Алгозит» является гибким инструментом при разработке и отладке новых алгоритмов расчета. Открытость библиотеки «Фабрики объектов» позволяет пользователям дополнять ее собственными функциональными классами для расширения классов решаемых задач. Использование визуального программирования функционально-объектных схем увеличивает наглядность разрабатываемых алгоритмов. Пошаговое выполнение высокоуровневой программы усиливает контроль над промежуточными результатами выполнения каждого элемента схемы. Пакет интенсивно используется для проведения технических расчетов во многих областях техники.

Литература

1. Роганова Н.А. Функциональное программирование. М.: ГИНФО, 2002. 260 с.

2. *Прокопец А*. Конкурентное программирование на SCALA. М.: ДМКпресс, 2017. 342 с.

3. Каледин В.О., Гилёва А.Е. Функционально-объектное программирование алгоритмов математического моделирования / Решетневские чтения: Материалы XXI Междунар. науч-практ. конф., посвящ. памяти генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М.Ф. Решетнева (08–11 нояб. 2017, Красноярск): в 2 ч. Красноярск, 2017. Ч. 2. С. 332–333.

4. Анизогридные композитные конструкции – разработка и приложение к космической технике / В.В. Васильев, В.А. Барынин, А.Ф. Разин и др. // Композиты и наноструктуры. 2009. №3. С. 38–50.

References

1. Roganova N.A. Functional programming. M.: GINFO, 2002. 260 p.

2. Prokopets A. Competitive programming in SCALA. M.: DMKpress, 2017. 342 p.

3. *Kaledin V.O., Gileva A.E.* Functional-object programming mathematical modeling algorithms Materialy XXI Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya" [Materials XXI Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2017, p. 332–333. (In Rus.)

4. Vasilev V.V., Barynin V.A., Razin A.F., Petrokovsky S.A., Halimanovich V.I. [Anizogridnye composit mesh designs – working out and the appendix in the space technics] Composites and nanostructures, 2009. No 3. P. 38–50.

МЕТОД ВАН ЛИРА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ДВУМЕРНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Е.И. Рожкова

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия E-mail: katushar2801@mail.ru

Ключевые слова: уравнения Эйлера, метод Ван Лира, потоки, ударная волна.

Аннотация. В настоящей работе представлено численное решение задачи высокоскоростного течения газа методом Ван Лира. Математическая постановка задачи основывалась на уравнениях сохранения Эйлера в двумерном приближении, предполагается, что область расчета замкнута, на границах заданы твердые стенки. Для нахождения потоков в уравнениях сохранения применялся алгоритм Ван Лира. В работе показано, что рассмотренная разностная схема позволяет разрешать задачи газовой динамики с сильными перепадами давления.

VAN LEER METHOD FOR SOLVING PROBLEMS OF HIGH-SPEED GAS FLOW IN TWO-DIMENSIONAL APPROXIMATION

E. Rozhkova

²National Research Tomsk State University, Russian Federation E-mail: katushar2801@mail.ru

Keywords: Euler equations, Van Leer method, streams, shock wave.

Abstract. In this paper, we present a numerical solution to the problem of high-speed gas flow by the Van Leer method. The mathematical formulation of the problem was based on the Euler conservation equations in a two-dimensional approximation, it is assumed that the calculation area is closed, and solid walls are specified at the boundaries. The Van Leer algorithm was used to find the fluxes in the conservation equations. The work shows that the described difference scheme allows solving problems of gas dynamics with strong pressure drops.

Процессы техники и технологии, связанные с горением и взрывом, часто требуют численного моделирования, так как являются быстропротекающими. Решать задачи горения и взрыва в газовых средах можно с помощью математической постановки, описываемой законами сохранения в форме уравнений Эйлера.

Уравнения сохранения Эйлера являются основными в газовой динамике, однако решение требует больших вычислительных затрат. В данной работе изложен один из наиболее эффективных способов отыскания потоков в уравнениях Эйлера, позволяющий значительно сократить количество вычислений при нахождении решения.

Целью работы являлось решение задачи распада разрыва в плоском двумерном приближении.

Рассмотрена плоская область с характерными размерами вдоль осей *y*, *x* равными $L_y = 1$ м и $L_x = 1$ м соответственно. До начала решения газ разделен перегородкой, пространство $L_x > 0.5$ м заполнено газом с давлением в 2 атмосферы. Пространство $L_x < 0.5$ м заполнено газом с атмосферным давлением. В момент времени t = 0 перегородка мгновенно убирается, газ претерпевает разрывы параметров. Для решения задачи течения газа требуется найти изменение потоков массы, импульса и энергии *F*. В работе изменение потоков заключается на разложении потока *F* на векторы F^+ и F^- . Чтобы избежать ошибочных результатов в [1], были сформулированы свойства:

1. Все собственные числа матрицы A^+ должны быть положительными, а собственные числа матрицы A^- – отрицательными.

2. Векторы потоков \mathbf{F}^{\pm} должны быть непрерывны. Если M > 1, то $\mathbf{F}^{+} = \mathbf{F}_{i}$, если M < -1, то $\mathbf{F}^{-} = \mathbf{F}_{i+1}$.

3. **F**+ и **F** должны быть симметричны, $\mathbf{F}^+(M) = -\mathbf{F}^-(M)$.

4. A^{\pm} должны быть непрерывны во всех точках, в том числе и звуковой.

5. Матрицы должны иметь одно собственное число, равное нулю при |M| < 1.

6. Составляющие $\mathbf{F}^{\pm}(M)$ и $\mathbf{F}(M)$ должны быть полиномами от числа Маха как можно низшей степени.

На основе этих свойств получена схема решения, описанная в [2].

Шаги расчетной сетки вдоль оси *х* и оси *у* задавались равными 0.01 м. Шаг по времени определялся из условия устойчивости Куранта [3].

Математическая постановка основывалась на [2], начальные условия: u = 0, v = 0, T = 300 K, в точке х = 0.5 м расположена перегородка. Принятые значения параметров газа: $L_x = 1$ м, $L_y = 1$ м, $c_p = 1000$ Дж/К, $c_v = 750$ Дж/К, $\mu_g = 0.028$ кг/моль.



Рис. 1. Распределение давления в момент времени t =0.0019 с

Согласно полученным результатам, можно сделать вывод, что сразу после исчезновения перегородки проходит ударная волна, видны зоны с давлением меньше и больше атмосферного. На рис. 1 показано распределение давления в момент времени t = 0.0019 с, видно, что давление значительно превышает атмосферное и начальное. Сформировалась ударная волна. Таким образом, разностная схема позволяет разрешать задачи газовой динамики с сильными перепадами давления.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента МК-421.2020.8.

Литература

1. *Van Leer B*. Flux-Vector Splitting for the Euler Equation // Lecture Notes in Physics. 1982. Vol. 170. P. 507–512.

2. *Миньков Л.Л., Шрагер Э.Р.* Основные подходы к численному решению одномерных уравнений газовой динамики: учеб. пособие. Томск: Изд-во «Общество с ограниченной ответственностью (СТТ)». 2016.

3. Годунов С.К. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов, А.Н. Крайко, Г.П. Прокопов. М.: Наука, 1976.

References

1. *Van Leer B*. Flux-Vector Splitting for the Euler Equation // Lecture Notes in Physics. 1982. Vol. 170. P. 507–512.

2. *Minkov L.L., Shrager A.R.* The main approaches to the numerical solution of onedimensional equations of gas dynamics // Tutorial. Tomsk: Publishing house Limited Liability Company "STT". 2016.

3. Godunov S.K. Numerical solution of multidimensional problems of gas dynamics / S.K. Godunov, A.V. Zabrodin, M.Y. Ivanov, A.N. Krayko, G.P. Prokopov. M.: Science, 1976.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ОРЕNFOAM ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗМЫВА НЕСВЯЗНОГО ГРУНТА

И.Е. Салтыков

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Россия E-mail: saltikov42@gmail.com

Ключевые слова: размыв, OpenFOAM, численное моделирование.

Аннотация. Сегодня для России, когда практически все основные крупные месторождения нефти и газа на суше открыты и освоены, актуальным направлением является добыча нефти и газа на морском шельфе. Для добычи нефти на морском шельфе широко применяются платформы гравитационного типа, удерживаемые на дне за счёт собственного веса. В связи с этим изучение процессов размыва морского грунта вблизи оснований таких платформ и исследование проблем обеспечения их устойчивости представляет большую практическую значимость. В данной работе для численного моделирования используется открытая платформа OpenFOAM. Модель размыва несвязного грунта интегрирована в программный комплекс OpenFOAM посредством разработки набора программ, выполняющего подготовку и выполнение расчёта. Рассмотрены проблемы интеграции дополнительных численных моделей в комплекс. Интеграция с комплексом позволяет воспользоваться его преимуществами, среди которых возможность использования большого количества моделей турбулентности, а также возможность параллельного расчёта с использованием стандарта MPI. В работе также представлены тестовые расчёты задач размыва вокруг цилиндрической сваи, куба, модели платформы, проведённые с использованием полученного набора программ.

APPLICATION OF THE OPENFOAM SOFTWARE FOR NON-COHESIVE SOIL SCOUR SIMULATION

I. Saltykov

Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Russian Federation E-mail: saltikov42@gmail.com

Keywords: scour, OpenFOAM, numerical simulation.

Abstract. Nowadays for Russia, when almost all main huge petroleum and gas deposits on the land were discovered and developed, there is a tendency of petroleum and gas extraction on a sea shelf. Gravity-based platforms is extensively used for the petroleum extraction on a sea shelf. The foundation of such platforms is held purely by its own weight. Therefore, seabed scour process investigation near such platforms and platform stability analysis has a high practical importance. In this paper OpenFOAM software is used for numerical simulation. In this paper non-cohesive soil scour model was integrated into OpenFOAM software. The developed software consists of pre-processor utility and solver. The problems of new numeric models integrations with OpenFOAM were investigated. Because of integration with OpenFOAM developed software inherit all of its advantages such as high amount of turbulence models and parallel computation capabilities. The paper also presents test numerical simulations of scour problems around a cylindrical pile, cube, gravity-based platform model.

Задача оценки размыва грунта возникает при проектировании и эксплуатации морских и речных конструкций.

Сегодня для России, когда практически все основные крупные месторождения нефти и газа на суше открыты и освоены, актуальным направлением является добыча нефти и газа на морском шельфе. По оценкам учёных, около 70% его площади перспективны с точки зрения полезных ископаемых, в первую очередь нефти и газа. Для добычи нефти на морском шельфе широко применяются платформы гравитационного типа, удерживаемые на дне исключительно за счёт собственного веса и связей нижней части платформы с грунтом. Размыв вблизи таких платформ обусловлен многими факторами, среди которых внутреннее течение вокруг платформы, поверхностные волны, интенсивность которых может значительно увеличиваться в шторм, течение, создаваемое винтом танкера, прибывающего для транспортировки добытой нефти. В связи с этим изучение процессов размыва морского грунта вблизи оснований таких платформ и исследование проблем обеспечения их устойчивости также представляет большую практическую значимость.

В последние годы активно проводятся различные исследования этих вопросов, как с помощью лабораторных [1] и полунатурных физических экспериментов, так и с применением методов математического моделирования [2, 3].

Одним из этапов исследовательской работы является численное моделирование. Производительная и удобная программная реализация может сэкономить исследователю большое количество времени. На ранних этапах развития численного моделирования программная реализация численных методов выполнялась самими исследователями. Данный подход требовал от исследователя не только знания предметной области, но и достаточных, а порой и серьёзных навыков программирования, кроме того, программное решение, как правило, разрабатывалось индивидуально для каждой решаемой задачи, что сильно затрудняло повторное использование кода и добавление новой функциональности. Одним из решений является использование готового программного комплекса и создание на его основе расчётных программ для численного моделирования интересующих явлений. Используя такой комплекс, исследователю необходимо применить готовые компоненты для решения поставленной задачи, что значительно упрощает написание программного кода или вовсе избавляет от его написания в простых случаях.

В настоящее время существует большое количество готовых программных комплексов и библиотек для численного моделирования, предоставляющих готовые инструменты для решения широкого круга практических задач. Данные комплексы, как правило, разрабатываются и поддерживаются большим коллективом опытных разработчиков и учёных, тем самым обеспечивая удобство использования и высокую производительность. Вследствие этого, очень часто разработка собственного решения оказывается нецелесообразной. В настоящей работе предпочтение отдаётся использованию готового программного комплекса в качестве платформы для решения задач моделирования размыва грунта.

В работе для расчёта величины размыва несвязного грунта и движения жидкости была выбрана открытая платформа OpenFOAM. Комплекс OpenFOAM имеет модульную структуру, упрощая тем самым его адаптацию к решаемым задачам. Языком разработки является C++, при этом используется объектно-ориентированный подход. При таком подходе код комплекса представляет собой набор классов. На уровне программных

компонентов, комплекс представляет собой набор библиотек базовой функциональности, и исполняемых файлов, реализующих необходимую функциональность, которые написаны с использованием данных библиотек. Набор библиотек, составляющих комплекс, включает в себя основные операции необходимые для проведения численного моделирования с использованием метода конечных объёмов, например, манипуляции с полями или расчётными сетками. Одним из преимуществ является то, что данные библиотеки могут быть использованы для реализации других численных методов.

В настоящей работе выполнена интеграция модели размыва несвязного грунта в программный комплекс OpenFOAM, посредством разработки набора программ, выполняющего подготовку и выполнение расчёта размыва грунта в двумерных и трёхмерных областях. В качестве численной модели размыва используется модель, описанная в работе [4].

Расчёт размыва грунта выполняется на дне области и расчётную сетку для него составляют элементы сетки для расчёта жидкости, находящиеся на границе, являющийся дном. Однако комплекс OpenFOAM позволяет производить расчёты любых размерностей, используя исключительно трёхмерные расчётные сетки. Для решения этой задачи в рамках работы была разработка программа, которая генерирует трёхмерную сетку толщиной в один слой на основе границы, являющийся дном сетки для жидкости, путём её «вытягивания» вдоль некоторой оси. Основная расчётная программа написана на основе одной из стандартных программ-решателей, что позволяет воспользоваться всеми преимуществами комплекса, среди которых возможность использования большого количества моделей турбулентности, а также возможность параллельного расчёта с использованием стандарта MPI, что позволяет более качественно исследовать рассматриваемое явление. Для тестирования полученной реализации были выполнены расчёты трёхмерных задач размыва вокруг цилиндрической сваи, куба, модели платформы.

Литература/References

1. *Porter K.E.* Seabed scour around marine structures in mixed and layered sediments. PhD Thesis, London: Univ. College, 2016. 388 p.

2. Zakharov Y., Gaydarov N., Ivanov K. et al. Numerical and experimental studies of soil scour near foundations of platforms // Advanced Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysic. 2014. P. 239–241.

3. *Harris J.M., Whitehouse R.S., Sutherland J.* Scour assessment in complex marine soils. An evaluation through case examples // Proc. Intern. Conf. «International Conference on Scour and Erosion». California, 2010. P. 450–459.

4. *Brors B*. Numerical modeling of flow and scour at pipelines // J. Hydraul. Eng. 1999. P. 511–523.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ УДАРНИКА НА ИЗМЕНЕНИЕ ТРАЕКТОРИИ ПРОНИКАНИЯ В ГРУНТОВУЮ СРЕДУ

С.В. Сопин, В.Л. Котов, А.М. Брагов, В.В. Баландин, Е.С. Качурина, И.А. Дяченко, А.Ю. Константинов

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия E-mail: sopin.serga@yandex.ru

Ключевые слова: грунтовая среда, проникание, ударник, коэффициент преломления.

Аннотация. Расчетным путем исследовано изменение траектории проникания ударника, варьируя некоторыми его параметрами. В качестве основных параметров взято: положение центра масс ударника, его форма, угол наклона подлета к свободной поверхности грунта. Оценка траектории проникания ударника проводится с использованием коэффициента преломления. На основе коэффициента преломления оценены степень влияния каждого параметра ударника на траекторию, степень и форму отклонения траектории, критические значения параметров, при которых траектория не изменяется.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF THE STRIKER ON THE CHANGE IN THE TRAJECTORY OF PENETRATION INTO THE SOIL MEDIUM

S. Sopin, V. Kotov, A. Bragov, V. Balandin, E. Kachurina, I. Dyachenko, A. Konstantinov

National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Russian Federation E-mail: sopin.serga@yandex.ru

Keywords: Soil medium, penetration, striker, refractive index.

Abstract. By calculation, the change in the trajectory of penetration of the striker into the soil medium was investigated by varying a number of its parameters. The considered parameters of the striker were taken: the position of the center of mass of the striker, its shape, the angle of inclination of the approach to the free surface of the soil. For the penetration medium, the Grigoryan model of a linearly compressible elastoplastic medium with a linear dependence of the yield stress on pressure is adopted [1]. The problem is solved numerically in a three-dimensional formulation. The movement of the striker during penetration occurs by inertia.

Studies of the trajectory of penetration of the projectile into the soil by multiple iterations of calculations, using, similarly to optics, the refractive index, made it possible to reveal the nature of the change in the trajectory within the considered limits of the varied parameters, to preliminarily determine their contribution to the change in the trajectory, to determine the schematic diagram of the process of deviation of the trajectory and the applicability of the introduced estimated parameters [2]. Исследования взаимодействия твердого упругого тела с грунтовой средой – актуальная проблема механики сплошной среды. Данные задачи имеют важное научное и прикладное значения. Они решаются как аналитическими методами, так и численными. Аналитические методы определяют общую закономерность проникания тела в грунт в диапазоне основных параметров задачи и свойств грунта. Сложность и многообразие механических свойств грунтов сводит аналитические методы к приближенному виду, но, несмотря на это, они позволяют получать базовые выражения для параметров проникания: усилия сопротивления, скорости движения при проникании, формы траектории проникания в зависимости от формы тела, положения центра масс тела и параметров среды. Численные методы, используя математические модели, основанные на физико-механических свойствах грунтов, позволяют довольно точно исследовать процесс проникания тела в грунт, варьируя параметрами задачи.

Вопрос о траектории движения тела при косом входе в грунтовую среду изучен мало. При наибольшем удалении от поверхности раздела сред влияние граничных условий на движение тела будет ничтожно мало (после удаления от границы сред оно, возможно, будет двигаться прямолинейно), что подтверждается многими экспериментами [3–7]. Необходимо оценить взаимосвязь угла косого входа тела в грунтовую среду и угла удаления тела при движении в ней, для чего использовался, по аналогии с оптикой, коэффициент преломления, равный отношению синуса угла косого входа тела в грунтовую среду к синусу угла удаления от границы раздела, при движении тела в грунте [2].

Численное решение задачи проникания проводилось со следующими исходными данными: трехмерная постановка, проникание тела происходит за счет инерции с начальной скоростью 200 м/с, используется модель сухого песчаного грунта. Расчеты проводились итерационно, варьируя параметрами задачи: положение центра масс тела, угол косого входа в среду, форма тела. Зависимости траектории проникания тела описывались с использованием, аналогично оптике, коэффициента преломления, равного отношению угла подлета косого входа к углу удаления во время движения в среде.

Полученные результаты расчетных исследований показали:

– траектория движения тела при проникании в грунтовую среду нелинейная (рис. 1);

 использование коэффициента преломления в описании траектории проникания тела дает достаточное представление зависимости траектории от рассматриваемых параметров задачи;

 траекторию проникания тела в грунтовую среду можно разделить на два основных участка (рис. 1): на первом участке преимущественное влияние оказывает угол косого входа тела в грунт, на втором – положение центра масс тела;



Рис. 1. Траектория проникания тела в грунтовую среду *a* – временные зависимости угла удаления тела в грунте при вариациях положения центра масс тела; *б*, *в* – схема траектории проникания тела в грунтовую среду

 полученные данные позволяют получить аналитические зависимости траектории проникания тела от основных параметров, используемых в задачах оптимизации формы тела с учетом физико-механических свойств грунта.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-00430 а).

Литература

1. Сагомонян А.Я. Проникание. М.: Изд-во МГУ. 1974. 299 с.

2. *Бивин Ю.К*. Косой удар твердого тела о грунт или воду // Изв. АН СССР. МТТ. 1989, № 6. С. 185–189.

3. *Bai Y.L., Johnson W.* The effect of projectile speed and medium resistance in ricochet off sand // J. Mech. Engng. Sci. 1981. Vol. 23, № 2. P. 69–75.

4. Daneshi G.H., Johnson W. The ricochet of spherical projectiles off sand // Intern. J. Mech. Sci. 1977. Vol. 19, № 8. P. 491–497.

5. Седов Л.И. Водяные рикошеты // Докл. АН СССР. 1942. Т. 37, № 9. С. 291–294.

6. *Бивин Ю.К.* Изменение направления движения твердого тела на границе раздела сред // Изв. АН СССР. МТТ. 1981, № 4. С. 105–109.

7. *Колесников В.А*. Об изменении траектории метеорита при входе в грунт // Изв. АН СССР. МТТ. 1981, № 4. С. 99–104.

References

1. Sagomonyan A.Y. Penetration. M.: Publishing office MSU. 1974. 299 c.

2. *Bivin U.K.* Oblique impact of a solid on the ground or water // Publishing office AS USSR. MS. 1989, № 6. P. 185–189.

3. *Bai Y.L., Johnson W.* The effect of projectile speed and medium resistance in ricochet off sand // J. Mech. Engng. Sci. 1981. Vol. 23, № 2. P. 69–75.

4. Daneshi G.H., Johnson W. The ricochet of spherical projectiles off sand // Intern. J. Mech. Sci. 1977. Vol. 19, № 8. P. 491–497.

5. Sedov L.I. Water ricochets // Rep. AS USSR. 1942. Vol. 37, № 9. P. 291–294.

6. *Bivin U.K.* Changing the direction of motion of a rigid body at the interface // Rep. AS USSR. MS. 1981, № 4. P. 105–109.

7. *Kolesnikov V.A.* On the change in the trajectory of a meteorite when entering the ground // Rep. AS USSR. MS. 1981, № 4. P. 99–104.

О РАСЧЁТЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И АМОРТИЗИРУЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛОКА ВНУТРЕННЕГО ОБОРУДОВАНИЯ НОСОВОГО ОТСЕКА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В.В. Фролов, Г.В. Белов, В.А. Марков, Ю.В. Попов, В.И. Пусев, В.В. Селиванов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия E-mail: frol.v.v11@rambler.ru

Ключевые слова: носовой отсек, бортовая аппаратура, диаграмма деформирования, деформирование, разрушение, амортизация, летальный аппарат.

Аннотация. Блоки внутреннего оборудования носовых отсеков (НО) летательных аппаратов (ЛА) занимают достаточно большую массу в конструкции ЛА (до 25% массы пустого ЛА). При этом их массовая доля в современных ЛА как военного, так и гражданского назначения, имеет тенденцию к увеличению. В силу своего расположения в НО ЛА блоки бортовой аппаратуры (БА) оказывают существенное влияние на процесс высокоскоростного взаимодействия ЛА с различными преградами. Это требует знания механических свойств блоков БА при проектировании современных ЛА. В данной работе проведено численное моделирование типового блока БА с целью определения его механических свойств и амортизирующих характеристик. По результатам расчёта выявлены основные этапы деформирования и разрушения блока БА и построена диаграмма его деформирования, а также определены основные амортизирующие характеристики блока. В качестве проверки полученной диаграммы были проведены дополнительные расчёты, в которых варьировались свойства корпуса блока, а также изменялся тип нагрузки. Показано, что блок БА представляет собой высокопористую композиционную среду, что позволяет выполнить переход от реальной конструкции блока БА к его механическому эквиваленту.

THE CALCULATION OF MECHANICAL PROPERTIES AND SHOCK-ABSORBING CHARACTERISTICS OF THE AIRCRAFT ONBOARD EQUIPMENT BLOCK

V. Frolov, G. Belov, V. Markov, Yu. Popov, V. Pusev, V. Selivanov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation E-mail: frol.v.v11@rambler.ru

Keywords: onboard equipment; deformation diagram; deformation; destruction; shockabsorbing; aircraft.

Abstract. The aircraft onboard equipment blocks take up a significant volume in the general layout of the aircraft (above 25 % of the aircraft mass). At the same time their volume and mass fraction in modern aircrafts, both military and civilian, tends to increase. Due to their location in the aircraft, the on-board equipment blocks have a significant impact on the process of high-speed interaction of the aircraft with various obstacles. All this requires knowledge of the mechanical properties of the on-board equipment blocks while designing the modern aircraft. Mathematical modeling of a typical onboard block is carried out in this work in order to determine its mechanical properties and shock-absorbing characteristics. Based on the results of the calculation, the main stages of deformation and destruction of the onboard block were identified and a diagram of its deformation was constructed, as well as the main damping characteristics of the block were determined. To check the resulting diagram, additional calculations were carried out, in which the properties of the block is a pseudo-composite material, which allows the transition from a block design to its equivalent.

В настоящее время блоки бортовой аппаратуры (БА), используемые в конструкциях современных летательных аппаратов (ЛА), имеют следующее строение: силовой корпус с крышками из алюминиевого сплава содержит внутреннее наполнение – печатные платы, закреплённые на несущих модулях [1]. Платы устанавливаются на модулях посредством крепежных винтов, а сами модули соединяются друг с другом шпильками и образуют сборочный пакет.

По приведенным выше исходным данным выполнен обобщённый блок БА носового отсека (HO) ЛА, состоящий из корпуса, крышек и наполнения. Общая масса блока составляла 6,5 кг, а его средняя плотность – 1,375 г/см³, что соответствует типовым значениям массы и плотности для БА ЛА [2, 3]. Согласно стандартам, применяемым в авиастроительной отрасли и принятой практике проектирования, корпус, крышки и несущие модули принимались выполненными из высокопрочного алюминиевого сплава Д16Т по ГОСТу 4784-97, печатные платы из стеклотекстолита по ГОСТ 12652-74, а крепежные элементы из стали 3 по ГОСТу 380-2005.

Для проведения расчётов была разработана детализированная конечноэлементная модель блока БА, пригодная для использования в пакете численного моделирования нестационарных процессов LS-DYNA. Модель включала в себя ~71 тысячу гексагональных 8-точечных элементов типа Solid.

Математическая модель физико-механического поведения металлических материалов включала упругопластическую среду с моделью пластического течения Прандтля–Рейсса в программной реализации Джонсона– Кука, а физико-механические свойства стеклотекстолита определялись по ортотропной модели с критерием разрушения Чанга-Чанга [4].

Постановка задачи предполагала квазистатическое сжатие блока БА до его разрушения. В процессе расчёта регистрировались параметры напряжений и деформаций, возникающих в конструкции, как функции времени, а затем по этим данным выполнялось построение диаграмм деформирования. Для определения вклада конструкции корпуса в полученную диаграмму был также проведен расчёт силового корпуса БА, без внутреннего наполнения.

По результатам расчета удалось получить основные стадии деформирования блока БА, а также построить диаграммы деформирования. На данных диаграммах можно выделить участки, характерные для высокопористых материалов. В частности, имеется линейно-упругий участок, участок пластического деформирования и последующего уплотнения.

На основе диаграммы деформирования блока БА становится можно оценить амортизирующие характеристики блока БА ЛА: эффективную энергию поглощения удара и удельную энергию поглощения удара. Данные величины вычисляются методом интегрирования диаграммы деформирования. Так, удельная энергия поглощения удара будет представлять собой отношение интеграла функции напряжения по деформации на всём участке деформирования к энергии поглощения удара идеального амортизатора, а эффективная энергия поглощения удара соответствует площади под диаграммой деформирования. Для типового блока при деформации 0.6 получена удельная энергия поглощения в 15800,6 кДж/м³, а эффективная энергия – 0,438.

В дополнение к проведённым расчётам и для проверки влияния материала корпуса блока, а также способа нагружения на диаграмму деформирования, были выполнены следующие дополнительные расчёты: расчёт деформирования до разрушения для блоков той же геометрии, но с материалами корпуса из сплавов АМг6 и АМг6М ГОСТ 17232-99; а также расчёт деформирования исходного блока с разгрузкой.

Результаты данных дополнительных расчётов показали, что основные различия в диаграммах для корпусов из различных материалов приходятся на линейно-упругий участок диаграммы и величину эффективного предела текучести, а при расчёте с разгрузкой площадка текучести диаграммы располагается на ~15 % ниже.

По результатам расчёта получена диаграмма деформирования типового блока БА НО ЛА. На данной диаграмме можно выделить следующие основные участки: линейно-упругий, пластического деформирования и последующего уплотнения. Амортизационные свойства блока при деформации 0.6 составляют 15800,6 кДж/м³ по удельной энергии поглощения удара и 0,438 по эффективной энергии поглощения удара. Следовательно, блок БА можно рассматривать как высокопористую композиционную среду с эффективным пределом текучести порядка 30 МПа, а полученные подобным образом диаграммы деформирования и характеристики амортизации можно использовать при верификации механических эквивалентов БА ЛА.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 19-08-00701-а).

Литература

1. Дробышевский В.Г. Сборник справочных, методических и статистических материалов по военному и гражданскому самолетостроению: учеб. пособие. Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2015. 192 с.

2. Белов Г.В., Марков В.А., Пусев В.И., Селиванов В.В. О разработке механических эквивалентов конструкций внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 1 (13). С. 30.

3. Калягин М.Ю. Моделирование приборных отсеков летательных аппаратов пористо-смесевыми ударниками // Труды МАИ. Вып. № 98. 2017. URL: http:// trudymai.ru/ upload/iblock/617/Kalyagin_rus.pdf?lang=en&issue=98

4. LS-DYNA, Keyword User's Manual, Version 970. Livermore Software Technology Corporation, 2003.

References

1. *Drobyshevsky V.G.* Collection of reference, methodological and statistical materials on military and civil aircraft construction: textbook allowance. Nizhny Novgorod: NSTU im. R.E. Alekseeva. 2015. 192 p.

2. *Belov G.V., Markov V.A., Pusev V.I., Selivanov V.V.* On the development of mechanical equivalents for the structures of the internal equipment of the nose compartments of aircraft // Engineering Journal: Science and Innovation. 2013. No 1 (13). P. 30.

3. Kalyagin M.Yu. Modeling of instrument compartments of aircraft with porous-mixed strikers // Proceedings of the MAI. Issue No 98. 2017. URL:http://trudymai.ru/ up-load/iblock/617/Kalyagin_rus.pdf?lang=en&issue=98

4. LS-DYNA, Keyword User's Manual, Version 970. Livermore Software Technology Corporation, 2003.

РАСЧЁТНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И АМОРТИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРЕННЕГО ОБОРУДОВАНИЯ НОСОВОГО ОТСЕКА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ

В.В. Фролов, Г.В. Белов, В.А. Марков, Ю.В. Попов, В.И. Пусев, В.В. Селиванов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия E-mail: frol.v.v11@rambler.ru

Ключевые слова: бортовая аппаратура; носовой отсек; диаграмма деформирования; деформирование; амортизация; летательный аппарат.

Аннотация. Носовые приборные отсеки (НО) летательных аппаратов (ЛА) представляют собой сложные системы взаимосвязанных блоков бортовой аппаратуры (БА). НО занимают достаточно большую массу и габариты ЛА, а потому должны учитываться в расчётах высокоскоростного взаимодействия ЛА с различными преградами. В частности, при рассмотрении задачи о высокоскоростном соударении ЛА с защищённой конструкцией реакторов современных АЭС, входящей в официальный перечень аварийных ситуаций, для которых необходимо обеспечить безопасность объектов атомной отрасли. При этом в настоящее время подобные задачи решаются по подходу Дж. Риеры, не учитывающему детально реальную конструкцию ЛА. Для корректного решения подобного класса задач необходимо получить модель НО, адекватно описывающую его при высокоскоростном нагружении. В данной статье приводится описание подхода к моделированию НО ЛА. НО представляется как совокупность отдельных блоков БА, а его интегральные механические свойства и амортизационные характеристики определяются через свойства отдельных блоков БА, входящих в его структуру. Расчётным путём подтверждается экспериментальный метод аддитивности, а также обосновывается возможность построение общей диаграммы деформирования НО для использования её в проектных расчётах.

COMPUTATIONAL MODEL TO REFLECT THE MECHANICAL AND SHOCK-ABSORBING PROPERTIES OF THE AIRCRAFT NOSE COMPARTMENT ONBOARD EQUIPMENT DURING DEFORMATION

V. Frolov, G. Belov, V. Markov, Yu. Popov, V. Pusev, V. Selivanov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation E-mail: frol.v.v11@rambler.ru

Keywords: onboard equipment, nasal compartment, deformation diagram, deformation; shock-absorbing; aircraft.

Abstract. Nose instrument compartments of the aircrafts are complex systems of interconnected on-board equipment blocks. Nose compartments occupy a sufficiently large resource, both the mass and the dimensions of the aircraft, and therefore must be taken into account in the calculations of the high-speed interaction of the aircraft with various obstacles. In particular, when considering the problem of a high-speed impact of an aircraft with a protected design of reactors of modern nuclear power plants. At the same time, such problems are currently being solved according to J. Riera's approach, which does not take into account the real aircraft design. For the correct solution of this class of problems, it is necessary to obtain a compartment model that adequately describes it under high-speed loading. This article describes the approach to modeling the aircraft Nose compartment. Compartment is represented as a set of individual blocks of onboard equipment, and its integral mechanical and shock-absorbing properties are determined through the properties of individual blocks, included in its structure. The calculation method confirms the experimental additivity method, and also substantiates the possibility of constructing a general deformation diagram of the Nose compartment for its use in design calculations.

При создании корректной расчётной модели НО современного ЛА и получения его диаграммы деформирования целесообразно воспользоваться методом аддитивности. Метод предполагает, что диаграмма деформирования НО представляет собой определенным образом полученную сумму диаграмм деформирования отдельных блоков БА [1, 2].

Для отработки модели проведено определение диаграммы деформирования части НО ЛА, состоящей из 2 блоков БА, расположенных на общей раме. Геометрия блоков БА выполнена со степенью детализации, которая достаточна для определения качественных и количественных показателей их деформирования и разрушения. На её основе выполнялась расчётная сетка, состоящая из ~776 тысяч гексагональных 8-точечных элементов типа Solid.

В полученной конечно-элементной модели для задания деформирования металлических материалов использовалась упругопластическая среда с моделью пластического течения Прандтля–Рейсса в программной реализации Джонсона–Кука, а физико-механические свойства стеклотекстолитовых печатных плат, составлявших внутреннее наполнение блока, определялись по ортотропной модели с критерием разрушения Чанга-Чанга [3].

Для проверки возможности применения метода аддитивности расчёт проводился следующим образом: в начале методом квазистатического сжатия до разрушения определялись диаграммы деформирования отдельных блоков, входящих в модель, затем блоки объединялись в единой расчётной области и нагружались сжимающим давлением уже совместно. По результатам этих расчётов выполнялось построение диаграмм деформирования: 1-го блока, 2-го блока, совместной диаграммы, а также графика, представляющего собой сумму диаграмм для 1-го и 2-го блоков. В дополнение к определению механических свойств проводился расчёт амортизационных характеристик (эффективной энергии поглощения удара и удельной энергии поглощения удара) для каждого блока и для модели HO.

Структурно диаграмма деформирования рассматриваемой части НО повторяет диаграммы входящих в неё элементов и имеет 3 основных участка: линейно-упругий участок, участок пластического деформирования и последующего уплотнения. При моделировании было получено, что диаграмма деформирования части НО близка к диаграмме, представляющей собой сумму диаграмм для 1-го и 2-го блоков.

Амортизационные характеристики рассматриваемой части НО оказались сходными с алгебраической суммой характеристик отдельных блоков. Так для первого блока удельная энергия поглощения при уровне деформаций в 0.6 равна 15800,6 кДж/м³, для второго – 18798,0 кДж/м³, их сумма, соответственно 34598,6 кДж/м³, а удельная энергия поглощения, вычисленная для того же уровня деформаций НО – 32792,9 кДж/м³.

Таким образом, результаты проведённого расчёта подтверждают выявленную экспериментально гипотезу о возможности построения диаграммы деформирования НО и определения его амортизационных характеристик методом аддитивности: выполняя суммирование диаграмм деформирования входящих в состав НО отдельных блоков БА. Данное обстоятельство позволяет в дальнейшем строить модельные эквиваленты НО, руководствуясь данными о механическом поведении отдельных блоков и их амортизационных характеристиках, а также использовать обобщённые модели НО при расчёте высокоскоростного взаимодействия ЛА с различными преградами, в т.ч. защитными конструкциями АЭС.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 19-08-00701-а).

Литература

1. Белов Г.В., Марков В.А., Пусев В.И., Селиванов В.В. О разработке механических эквивалентов конструкций внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2013. Спец. вып. С. 180–188.

2. *Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И.* Модельная среда для внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2010. Спец. вып. С. 196–206.

3. LS-DYNA, Keyword User's Manual, Version 970. Livermore Software Technology Corporation, 2003.

References

1. *Belov G.V., Markov V.A., Pusev V.I., Selivanov V.V.* On the development of mechanical equivalents for the structures of the internal equipment of the nose compartments of aircraft // Engineering Journal: Science and Innovation. 2013. No 1 (13). P. 30.

2. *Markov V.A., Ovchinnikov A.F., Pusev V.I.* Modeling environment for indoor equipment of nose compartments of aircraft // Herald of The Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering. 2010. No S. P. 196–206.

3. LS-DYNA, Keyword User's Manual, Version 970. Livermore Software Technology Corporation, 2003.

СХЕМА ВЫСОКОГО ПОРЯДКА ТОЧНОСТИ ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ ПОТОКОВ В ЗАДАЧЕ ДВУХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Я.П. Цесельская, Д.О. Диль

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

Ключевые слова: пористая среда, двухфазная фильтрация, контрольный объем, схема против потока второго порядка точности.

Аннотация. В данной работе представлен метод конечного объема со схемой более высокого порядка точности для аппроксимации потока при вытеснении нефти водой. Для численного решения представлена схема против потока второго порядка точности. Предложенная схема эффективна в областях медленного изменения насыщенности и вблизи скачков уплотнения. Данная эффективность проверена числовыми тестами.

HIGHER ORDER SCHEME FOR APPROXIMATION FLUXES IN TWO-PHASE FLOW PROBLEM

Y. Tseselskaya, D. Dil

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

Keywords: Porous media, two-phase flow, control volume, Higher-Order Upwind scheme.

Abstract. In this paper a cell-centered finite volume method with Higher-Order Upwind scheme (HOU) for approximation flow is presented for numerical solution of oil-water displacement problem. The proposed scheme is effective in the regions of slow saturation changing and near the shocks. This efficiency has been tested with numerical tests.

С ростом производительности современных вычислительных систем увеличивается сложность гидродинамических моделей, используемых при анализе нефтегазовых месторождений. В связи с этим возникает потребность в создании методов и схем высокого порядка точности для моделирования вытеснения нефти водой, прогнозов распространения различных веществ в почве и т.д.

Целью данной работы является численная реализация математической модели двухфазной фильтрации в одномерной области с использованием схемы против потока второго порядка точности. Необходимо составить и решить систему дифференциальных уравнений, которая является основой математической модели, для того чтобы определить, как изменяется насыщенность в пористой среде из-за вытеснения нефти водой.

Течение в пористой среде описывали с помощью двухфазной модели фильтрации несжимаемых жидкостей, основанной на законе сохранения массы – уравнении неразрывности в дифференциальной форме (для фаз воды (*w*) и нефти (*o*))

$$\frac{\partial \rho_w \varphi s}{\partial t} + div(\rho_w \overline{W_w}) = 0, \ \frac{\partial \rho_o \varphi(1-s)}{\partial t} + div(\rho_o \overline{W_o}) = 0 \tag{1}$$

и на законе сохранения импульса – обобщенном законе Дарси в дифференциальной форме

$$\overrightarrow{W_w} = -K\lambda_w(s)\overrightarrow{\nabla}(p - p_c(s)), \qquad \overrightarrow{W_o} = -K\lambda_o(s)\overrightarrow{\nabla}p.$$
(2)

Здесь $l = w, o - \phi$ азы воды и нефти соответственно; K – тензор проницаемости среды; s – эффективная влагонасыщенность (меняется от 0 до 1); $\overrightarrow{W_l}$ – скорость фильтрации для соответствующей фазы; – мобильность; $k_l(s)$ – относительная проницаемость каждой фазы; μ_l – вязкость каждой фазы; p – давление нефти; $p_c(s) = \frac{9,8\rho_w\sqrt{1-s^2}}{0,3s^2}$ – капиллярное давление; φ – пористость среды; t – время; ρ_l – плотность соответствующего вещества.

Используя алгебраические преобразования, получили систему дифференциальных уравнений, подходящую для использования IMPES схемы для дискретизации по времени [1], которая имеет следующий вид:

$$\begin{cases} -div(K(\lambda_w(s) + \lambda_o(s))\overrightarrow{\nabla}p - K\lambda_w(s)\overrightarrow{\nabla}p_c(s)) = 0; \\ -\varphi \frac{\partial s}{\partial t} - div(K\lambda_o(s)\overrightarrow{\nabla}p) = 0. \end{cases}$$
(3)

Расчетная область – пористая среда длиной L=1000 м. Давление и насыщенность в начальный момент времени и на границах имеют следующие значения:

$$s(x,0) = s_0 = 0.85, \ p(x,0) = p_0 = 10^7 \Pi a, \ 0 < x < L$$

$$s(0,t) = s_{\max} = 0.85, \ p(0,t) = p_{\max} = 10^7 \Pi a,$$

$$s(L,t) = s_{\min} = 0.2, \ p(L,t) = p_{\min} = 10^5 \Pi a.$$
(4)

К уравнениям (3, 4) применяли метод контрольного объема. Для дискретизации по времени поверхностного интеграла применяли метод неявный по давлению, явный по насыщенности. Для расчета потоков на гранях конечных объемов насыщенность определялась с помощью схемы против потока второго порядка точности [2].



Рис. 1. Графики насыщенности для момента времени 300 и 600 дней

На рис. 1 представлены графики изменений насыщенности для схем против потока первого (FOU) и второго (HOU) порядков точности в моменты времени 300 и 600 дней, а также сравнение полученных результатов с аналитическим решением – задачей Бакли–Леверетта [2].

Таким образом, результаты расчетов показывают более высокую эффективность схемы против потока второго порядка точности по сравнению с первым порядком. При этом данная схема достаточно устойчива и проста в реализации.

Литература

1. Contreras F.R.L., Lyra P.R.M., Souza M.R.A., Carvalho D.K.E. A cell-centered multipoint flux approximation method with a diamond stencil coupled with a higher order finite volume method for the simulation of oil-water displacements in heterogeneous and anisotropic petroleum reservoirs // Computers and Fluids. 2016. No 127. P. 1–16.

2. *Dil D.O.* Higher order fully implicit cell-centered finite volume method for simulation of oil-water displacement in porous medium // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1611.

References

1. Contreras F.R.L., Lyra P.R.M., Souza M.R.A., Carvalho D.K.E. A cell-centered multipoint flux approximation method with a diamond stencil coupled with a higher order finite volume method for the simulation of oil-water displacements in heterogeneous and anisotropic petroleum reservoirs // Computers and Fluids. 2016. No 127. P. 1–16.

2. *Dil D.O.* Higher order fully implicit cell-centered finite volume method for simulation of oil-water displacement in porous medium // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1611.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОБИТИЯ АРМИРОВАННЫХ 3D-ПЕЧАТНЫХ ПРЕГРАД МЕТОДОМ ГЛАДКИХ ЧАСТИЦ

Р.О. Черепанов, С.А. Зелепугин

Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Россия E-mail: RCherepanov@gmail.com

Ключевые слова: метод гладких частиц, армированные преграды, 3D-печать.

Аннотация. В работе представлен подход к численному моделированию пробития армированных волокнами преград, полученных методами 3D-печати, с использованием бессеточного метода гладких частиц (SPH). Упрочняющие волокна, имеющие конечную прочность на разрыв и адгезию к матрице, рассматриваются как квазиодномерные объекты, взаимодействующие с узлами бессеточной аппроксимации сплошной среды. Исследовано влияние силы адгезии и параметров волокон на характерные особенности процесса пробития армированных преград. Представлены результаты сравнения численных расчетов с экспериментами по ударному воздействию на такие преграды. Обнаружено, что стойкость к пробитию нелинейно зависит от адгезии ведет к проскальзыванию волокон и вытягиванию их из матрицы, ухудшая защитные свойства. Повышение адгезии ведет к росту натяжения волокон и их преждевременному разрыву, не позволяя полностью использовать их защитный потенциал.

SPH SIMULATION OF REINFORCED 3D-PRINTED SHIELDS PENETRATION

R. Cherepanov, S. Zelepugin

Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation E-mail: RCherepanov@gmail.com

Keywords: meshless methods, fibers reinforced barriers, 3D-printing.

Abstract: The paper presents an approach to numerical modeling of the penetration of reinforced barriers obtained by 3D printing methods with fibers reinforcement. The method is based on the meshless method of smoothed particles hydrodynamics (SPH), supplemented with the algorithm for the analysis of reinforcing fibers. Reinforcing fibers with strength and adhesion to the matrix are considered as quasi-one-dimensional objects interacting with the nodes of a meshless approximation of continuous medium. The influence of adhesion force and fiber parameters on the characteristic features of the process of penetration of reinforced barriers is investigated. Results of comparison of numerical computations with impact experiments are presented. It is found that the penetration resistance nonlinearly depends on the adhesion leads to slippage of the fibers and pulling them out of the matrix decreasing the protective properties. Growth of the adhesion leads to growth of tension of fibers and their premature rupture, not allowing them to use fully their protective potential.

При разработке современных микроспутников формата CubSat в последние годы для изготовления элементов корпуса активно стали применяться технологии 3D-печати, в частности, печать методом послойного нанесения расплавленного пластика (fused deposition method, FDM). Одним из способов повышения прочностных характеристик, получаемых таким методом изделий, является использование армирующих волокон (арамидные углеволокна, сеткловолокна), которые могут добавляться в пластик на различных стадиях процесса изготовления корпуса: на этапе подготовки препрега, непосредственное введение армирующего волокна в зону печати через печатающую головку, добавление рубленых волокон в исходный пластик на этапе подготовки филамента и т.д.

При оценке возможных угроз полезной нагрузке таких микроспутников при столкновениях с космическим мусором или микрометеороидами ввести учет армирующих волокон в конечноэлементную сетку может оказаться достаточно трудной задачей.

В этой связи актуальной задачей является разработка новых методов и подходов к численному моделированию таких неоднородных сред с разномасштабными включениями. В работе предлагается использовать бессеточный метод гладких частиц [1–5], как основу для моделирования упругопластических течений матрицы (пластика), а для учета армирующих волокон рассматривать их, как квазиодномерные объекты, жестко связанные с соответствующими аппроксимационными точками бессеточного метода.

Такие квазиодномерные волокна упруго растягиваются, имеют предел прочности на разрыв и конечный коэффициент адгезии к матрице и могут иметь произвольную пространственную конфигурацию.

Для учета влияния армирующего волокна алгоритм расчета упругопластического течения методом SPH [1] подвергается минимальным изменениям: влияние армирующих волокон учитывается как дополнительная внешняя сила, воздействующая только на те расчетные точки, через которые проходит волокно. Так как упругие характеристики армирующих волокон существенно выше соответствующих характеристик матрицы, скорость распространения упругих колебаний в матрице в разы ниже скорости распространения волн в самих волокнах, и таким образом можно считать, что волокна подвергаются медленному нагружению, а их собственной инерцией можно пренебречь.

В настоящей работе мы использовали слабую вариационную постановку SPH с аппроксимацией первого порядка точности с восстановленной узловой согласованностью [3].

Для верификации предлагаемого метода было проведено моделирование пробития пластин из полилактида (ПЛА, PLA), полученных методом 3Dпечати с непрерывным армированием арамидными волокнами. Расчеты показали, что для ударника в виде стального шарика диаметром 4.5 мм со скоростями в диапазоне от 100 до 220 м/с добавление волокон в количестве 3-5% по массе приводит к увеличению минимальной скорости (баллистического предела) пробития на ~30%. Увеличение массовой доли волокон не оказывает существенного влияния на защитные свойства преград, так как расстояние между пучками волокон определяется технологией печати и остается постоянным, а разрушение преграды происходит без разрыва волокон, за счет того, что ударник проникает между пучками волокон. Кроме того, увеличение массовой доли волокна требует использования более толстых пучков волокон. Внутренние волокна таких пучков под нагрузкой сразу начинают проскальзывать, не оказывая сопротивления внедрению ударника. Сравнение расчетов с экспериментом показывает удовлетворительное совпадение результатов. Такие характерные особенности процесса как разрыв нитей, вытягивание слабо сцепленных с матрицей пучков и проникание ударника между пучками адекватно описываются предложенной моделью. В расчетах установлено, что степень адгезии влияет на защитные свойства нелинейно. При слабой адгезии происходит проскальзывание волокон относительно матрицы, а вытянутое волокно огибает ударник, не оказывая сопротивления его движению. При высокой адгезии наблюдается сильное натяжения волокон на коротких участках, что приводит к их разрушению. Оптимальные защитные характеристики достигаются при некотором среднем значении адгезии, когда имеет место баланс между двумя этими конкурирующими процессами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-01152).

Литература

1. *Lucy L.B.* A numerical approach to the testing of fusion hypothesis // Astronomical Journal. 1977. Vol. 82. P. 1013–1024.

2. *Gingold R.A., Monaghan J.J.* Smoothed particle hydro-dynamics: theory and applications to nonspherical stars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1977. Vol. 181. P. 375–389.

3. *Liu M.B., Liu G.R.* Restoring particle consistency in smoothed particle hydrodynamics // Applied Numerical Mathematics. 2006. Vol. 56(1). P. 19–36. DOI: T10.1016/ j.apnum.2005.02.012.

4. *Cherepanov R.O., Zelepugin S.A., Ivanova O.V.* Comparison of finite elements and meshless methods for modeling of solid phase chemical reactions under explosive loading // Proceedings - 2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, EFRE 2020, 2020, 9242017, p. 1106–1109. DOI: 10.1109/EFRE47760.2020.9242017.

5. Герасимов А.В., Глазырин В.П., Орлов М.Ю. и др. Высокоскоростной удар. Моделирование и эксперимент / под ред. А.В. Герасимова. Томск: Изд-во НТЛ, 2016, 568 с.

References

1. *Lucy L.B.* A numerical approach to the testing of fusion hypothesis // Astronomical Journal. 1977. Vol. 82. P. 1013-1024.

2. *Gingold R.A., Monaghan J.J.* Smoothed particle hydro-dynamics: theory and applications to nonspherical stars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1977. Vol. 181. P. 375-389.

3. *Liu M.B., Liu G.R.* Restoring particle consistency in smoothed particle hydrodynamics // Applied Numerical Mathematics. 2006. Vol. 56(1). P. 19–36. DOI: 10.1016/ j.apnum.2005.02.012.

4. *Cherepanov R.O., Zelepugin S.A., Ivanova O.V.* Comparison of finite elements and meshless methods for modeling of solid phase chemical reactions under explosive loading // Proceedings - 2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, EFRE 2020, 2020, 9242017, p. 1106–1109. DOI: 10.1109/EFRE47760.2020.9242017.

5. Teoreticheskiye i eksperimental'nyye issledovaniya vysokoskorostnogo vzaimodeystviya tel / edited by A. Gerasimov (Tomsk State University Press, Tomsk, 2007), 572 p.

Секция 3

Исследования новых перспективных материалов в приложениях механики сплошных сред

Председатель:

к.ф.-м.н., А.А. Козулин

Прочность машиностроительных конструкций Прочность материалов Биомеханика Механические измерения в физическом эксперименте. Измерения времени и частоты в физическом эксперименте Резонансные методы измерения в физическом эксперименте

> Session 3 New materials research in application to continuum mechanics

> > Chair:

Ph.D. Alexander Kozulin

Continuum Mechanics and Mechanics of Materials Computer Appl. in Life Sciences Biological Techniques Structural Materials Nanotechnology Simulation and Modeling

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ ЗЕРЕННЫХ СТРУКТУР И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ В СИНТЕЗИРОВАННОМ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ С ДЕФОРМАЦИЕЙ ПРОДУКТА СИНТЕЗА ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКОМ СОЕДИНЕНИИ №3АL

К.О. Акимов

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

Ключевые слова: высокотемпературный синтез под давлением, зеренная структура, Ni₃Al, прочностные свойства.

Аннотация. В настоящей работе представлены результаты исследования закономерностей влияния предварительного давления на исходную порошковую прессовку на размер зерна и прочностные свойства синтезированного под давлением интерметаллического соединения Ni₃Al. Интерметаллическое соединение Ni₃Al в ряду широкого спектра алюминидов, благодаря своим выдающимся прочностным и коррозионным свойствам, имеет значительный коммерческий потенциал в качестве компоненты каталитических сплавов и матриц композиционных материалов, включая режущий инструмент, изделия высокотемпературного назначения в машиностроении и коррозионностойкие материалы в химической промышленности. Существенным ограничением более широкого применения интерметаллического соединения Ni₃Al в современной технике является его низкая прочность в области повышенных температур в результате зернограничной хрупкости интерметаллида. Было установлено, что с увеличением величины предварительного давления, приложенного к исходной порошковой смеси, средний размер зерна в объеме синтезированного интерметаллида уменьшается при сохранении общего распределения зерен в объеме синтезированных образцов. В свою очередь, изменение размера зерна существенно влияет на прочность и пластичность Ni₃Al. При уменьшении размера зерна интерметаллического соединения Ni₃Al, его прочность и пластичность увеличиваются.

INVESTIGATION OF THE REGULARITIES OF LOW-DIMENSIONAL GRAIN STRUCTURES AND STRENGTH PROPERTIES FORMATION IN AN INTERMETALLIC COMPOUND NI₃AL SYNTHESIZED UNDER EXTREME CONDITIONS UNDER PRESSURE WITH DEFORMATION OF THE SYNTHESIS PRODUCT

K. Akimov

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

Keywords: High-temperature synthesis under pressure, grain structure, Ni₃Al, strength properties.

Abstract. This work presents the results of studying the regularities of the preliminary pressure effect on the initial powder compact on the grain size and strength properties of the Ni₃Al intermetallic compound synthesized under pressure. Due to its outstanding strength and corrosion properties Ni₃Al intermetallic compound among a wide range of aluminides has significant commercial potential as a component of catalytic alloys and matrixes of composite materials, including cutting tools, high-temperature products in mechanical engineering, and corrosion-resistant materials in the chemical industry. It was found that with an increase in the value of the preliminary pressure applied to the initial powder mixture, the average grain size in the volume of the synthesized intermetallic compound decreases on retention of the general distribution of the disparate grains in the volume of the synthesized samples. In turn, with a decrease in the grain size of the Ni₃Al intermetallic compound, its strength and plasticity increase.

Интерметаллическое соединение Ni₃Al является основой современных суперсплавов высокотемпературного назначения и широко используется в космической, авиастроительной, химической и электронной отраслях промышленности [1-3]. В производстве изделий на основе интерметаллида Ni₃Al особое внимание уделяют структурному состоянию материала, которое формируется на стадии кристаллизации интерметаллического расплава. Задача состоит в формировании в интерметаллических сплавах низкоразмерных зеренных структур, определяющих уровень прочностных свойств сплавов в широком диапазоне температур. Перспективным решением указанной задачи является разработка новых методов получения высокопрочных сплавов путем создания технологий формирования низкоразмерных зеренных структур под действием деформации во внутренних объемах сплавов на стадии их кристаллизации из расплавов. Применительно к интерметаллическому соединению Ni₃Al и его сплавам таким методом является высокотемпературный синтез интерметаллида под давлением, позволяющим формировать в синтезированном интерметаллическом продукте более высокие прочностные свойства в результате образования в продукте низкоразмерных зеренных структур [4–5].

Целью настоящей работы являлось исследование влияния предварительного давления на исходную порошковую прессовку при синтезе в прессформе-реакторе закрытого типа на процесс формирования низкоразмерной зеренной структуры и прочностных свойств синтезированного под давлением интерметаллического соединения Ni₃Al.

Высокотемпературный синтез интерметаллида Ni₃Al под давлением проводился на экспериментальном стенде, состоящем из гидравлического пресса, оснащенного высокочастотным генератором для нагрева стальной пресс-формы до самовоспламенения прессовки из порошковой смеси 3Ni + +Al (размер частиц никеля составлял 1÷3 мкм, алюминия – 5÷10 мкм). До-полнительно экспериментальный стенд оборудован регистратором температуры нагрева порошковой прессовки, цифровым манометром для регистрации давления в гидросистеме главного цилиндра пресса и таймером включения рабочего хода пресса.

Смесь порошков стехиометрического состава 3Ni + Al помещалась в цилиндрическую стальную пресс-форму с внутренним диаметром 58 мм, нагреваемую токами высокой частоты. Инициирование включения рабочего хода гидравлического пресса и уплотнение продукта высокотемпературного синтеза происходили автоматически по заданной программе технологического цикла. Металлографические образцы были приготовлены методом механической полировки с постепенным уменьшением размера алмазных абразивных частиц до 1 мкм. Структуру зерен выявляли травлением ионами аргона при ускоряющем напряжении 0,6 кВ. Размер зерен определяли методом случайных секущих с усреднением по 150 измерениям. Фазовый состав образцов исследовали методом рентгеноструктурного анализа на рентгеновском дифрактометре ДРОН-7 в СоКа-излучении при ускоряющем напряжении 40 кВ и токе 40 мА.

Рентгенофазовый анализ показал, что используемая методика проведения синтеза обеспечивает полное превращение порошковой смеси в интерметаллическое соединение Ni₃Al во всем объеме синтезированного продукта. Результаты исследования зеренной структуры в образцах синтезированного под давлением интерметаллида при различных значениях предварительного давления на исходную порошковую прессовку имеют одну общую черту: увеличение среднего размера зерна при перемещении от внешней поверхности к центральной части компакта с последующим уменьшением среднего размера зерна при смещении к противоположной поверхности компакта. С увеличением предварительного давления снижается средний размер зерна на всей вертикали поперечного сечения синтезированных интерметаллических компактов. В центральной части синтезированных образцов, с увеличением предварительного давления на порошковую смесь в пресс-форме с 18 до 115 МРа наблюдается уменьшение размера зерна в синтезированном под давлением интерметаллиде с 14 до 7 µm. Представленные данные свидетельствуют о том, что процесс формирования низкоразмерной зеренной структуры в интерметаллическом соединении Ni₃Al в условиях его высокотемпературного синтеза под давлением в значительной мере зависит от двух факторов – градиента температуры в объеме термореагирующей порошковой прессовки и величины предварительного давления на исходную порошковую прессовку. Градиент температуры в объеме порошковой прессовки обусловлен разностью температур нагрева периферийной и центральной частей порошковой прессовки в режиме объемной экзотермической реакции образования интерметаллического соединения в результате преимущественной теплоотдачи периферийной частью прессовки на стенки стальной пресс-формы. С увеличением сжатия прессовки повышаются плотность и теплопроводность продукта синтеза, увеличивается отток тепла от образовавшегося продукта синтеза, замедляется и прекращается в первую очередь рост зерна в периферийной части интерметаллического компакта, формируется распределение зерна по размерам с максимальной величиной зерна в центральной части и минимальным размером на периферии интерметаллического компакта. В случае увеличения предварительного давления на исходную порошковую смесь, уменьшение размера зерна в синтезированном под давлением интерметаллиде обусловлено увеличением числа контактов разнородных частиц в порошковой смеси, определяющих количество зародышей образования интерметаллического соединения. В результате сказанного в объеме термореагирующей системы происходит увеличение количества центров кристаллизации интерметаллического соединения и, в конечном счете, уменьшение размера зерна при более равномерном распределении зерна по размерам в объеме синтезированного интерметаллического компакта. Изменение размера зерна в синтезированном под давлением интерметаллиде Ni₃Al в значительной мере влияет на его прочность. Уменьшение размера зерна от 14 до 7 µm (рис. 1, *a*) приводит к увеличению значения предела прочности интерметаллида в 1,4 раза (рис. 1, *б*).



Рис. 1. Зависимости размера зерна в синтезированном под давлением интерметаллическом соединении Ni₃Al от величины предварительного давления (*a*) и предела прочности при комнатной температуре от размера зерна интерметаллического соединения Ni₃Al (б)

Величина предварительного давления на исходную порошковую смесь 3Ni+Al является одним из ключевых параметров технологического процесса высокотемпературного синтеза под давлением интерметаллического соединения Ni₃Al, определяющих размер зерна в поликристаллической структуре синтезированного интерметаллида. Увеличение предварительного давления на исходную порошковую смесь с 18 до 115 МПа приводит к уменьшению размера зерна в синтезированном под давлением интерметаллиде в 2 раза. Изменение размера зерна оказывает значительное влияние на прочность синтезированного интерметаллида – при растяжении при комнатной температуре предел прочности интерметаллида повышается в 1,4 раза при уменьшении размера зерна с 14 до 7 µm. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-90090.

Литература/References

1. *Stoloff N.S., Liu C.T., Deevi S.C.* Emerging applications of intermetallics // Intermetallics. 2000. № 8(9-11). P. 1313–1320.

2. *Sikka V.K., et al.* Advances in processing of Ni₃Al-based intermetallics and applications // Intermetallics. 2000. No 8(9-11). P. 1329–1337.

3. *Jozwik P., Polkowski W., Bojar Z.* Review – Applications of Ni₃Al Based Intermetallic Alloys–Current Stage and Potential Perceptivities // Materials. 2015. №8. P. 2537–2568.

4. Sheng L.Y. et al. Microstructure and mechanical properties of Ni₃Al fabricated by thermal explosion and hot extrusion // Intermetallics. 2009. №17. P. 572–577.

5. Ovcharenko V.E., Boyangin E.N., Akimov K.O., and Ivanov K.V. Formation of Grain Structure in Ni₃Al Intermetallic Compound Synthesized by Thermal Explosion // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2019. Vol. 55(2). P. 191–196.

ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ФРАКТОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ СПЛАВА СИСТЕМЫ AL-MG, ПОЛУЧЕННОГО ЛИТЬЕМ С УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ПРОКАТКОЙ

А.А. Аксенов, Г.Ж. Канзаманова, Н.И. Кахидзе

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия E-mail: nick200069@yandex.ru

Ключевые слова: алюминиевый сплав, литье, деформационная обработка, прочность.

Аннотация. В работе исследованы алюминиевые сплавы системы Al-Mg, полученные методом литья с использованием ультразвуковой обработки. Дополнительно проведена отработка методов прокатки и отжига исследуемых сплавов. Комплекс исследований физико-механических свойства литых и обработанных сплавов включал изучение микроструктуры, определение твердости, измерение прочностных характеристик при одноосном растяжении, коррозионную стойкость, фактографический анализ поверхностей разрушения образцов. Результаты исследования показали эффективность отработанных режимов обработки ультразвуком расплавов, прокатки и отжига для повышения прочностных характеристик, измельчения зеренной структуры и приемлемую коррозионную стойкость исследуемых алюминиево-магниевых сплавов. Так после воздействия ультразвука на расплав исключается образование пористости после кристаллизации за счет выведения газовой фазы. Отмечено, что внутренняя структура после обработки расплава становиться более упорядоченной с правильной формой дендритов и меньшими размерами структурных составляющих. Тем самым, сплав становится более податливым в последующей деформационной обработке прокаткой. Прокатка изменяет структуру сплава с крупнокристаллической дендритной на мелкозернистую с преимущественной ориентацией вдоль направления прокатки. Дополнительная термообработка прокатанного сплава способствует увеличению его пластичности, при незначительном уменьшении – прочности.

STRUCTURE EVALUATION AND FRACTOGRAPHIC ANALYSIS RESULTS OF THE FRACTURE SURFACES OF AI–Mg-BASED ALLOY OBTAINED BY CASTING WITH ULTRASONIC ACTION AND SUBSEQUENT ROLLING

A. Aksenov, G. Kanzamanova, N. Kakhidze

National Research Tomsk State University, Russian Federation E-mail: nick200069@yandex.ru

Keywords: aluminum alloy, casting, deformation processing, strength properties.

Abstract. The work investigates an Al–Mg-based alloys, obtained by casting using ultrasonic treatment. Additionally, the methods of rolling and annealing of the investigated alloys were tested. The complex of studies of the physical and mechanical properties of cast and processed alloys included the study of microstructure, determination of hardness, measurement of strength characteristics under uniaxial tension, corrosion resistance, fractographic analysis of the fracture surfaces of samples. The results of the study showed the effectiveness of the worked out modes of ultrasonic treatment of melts, rolling and annealing to increase the strength characteristics, refine the grain structure, and acceptable corrosion resistance of the investigated aluminum-magnesium alloys.

Из деформируемых сплавов системы Al-Mg-... методом литья получают цилиндрические и плоские слитки, которые подвергают горячей и холодной обработке давлением (прессование, прокатка, ковка, штамповка и др.). Главной структурной составляющей деформируемых сплавов является твердый раствор на основе алюминия, а объемная доля хрупких интерметаллидов сравнительно невелика (не более 10 %), что обеспечивает хорошую деформируемость этих сплавов [1]. Упрочнение деформируемых алюминиевых сплавов, а также изменение физических, технологических, коррозионных свойств достигается с помощью различных методов: нагартовки, термической и термомеханической обработки, закалки из жидкого состояния и упрочнения нерастворимыми частицами оксида алюминия, интерметаллидов и др. Ранее комбинация внешних воздействий на расплав и деформационная обработка интенсивными пластическими деформациями, реализованными в схеме равноканального-углового прессования, алюминиевых сплавов технической чистоты показала хорошие результаты [2, 3]. Однако, уже на стадии литья алюминиевых сплавов возникает эффект понижения их функциональных свойств за счет возникновения дефектов литья в виде усадочных раковин и пористости. Для исключения этого нежелательного эффекта существует несколько способов выведения газов из расплавов – это введение специальных химических реагентов и внешних физических воздействий на расплав при литье. Введение химических реагентов может являться источником дополнительного загрязнения при литье. Внешнее воздействие обладает минимумом побочных эффектов и выбирается в зависимости от решаемой технологической задачи, а также от имеющегося в наличии на производстве оборудования. Наиболее распространенные виды внешнего воздействия, успешно освоенные в Лаборатории высокоэнергетических и специальных материалов НИ ТГУ (Томск) – это механическое перемешивание, воздействие электромагнитными полями, применение ультразвука (УЗ) и вибрации, а также комбинация нескольких способов одновременно [4, 5].

Целью данного исследования являлось получение результата экспериментальных данных о модификации физико-механических свойств алюминиево-магниевого сплава 1550 методом деформационной обработки и влияния УЗ на расплав и качество получаемых отливок.

В работе исследованы образцы алюминиевого сплава 1550 системы Al-Mg, полученные методом литья без и с использованием УЗ-обработки расплава. Деформационная обработка изучаемых сплавов проводилась с использованием теплой прокатки в цилиндрических валках при температуре разогретого сляба равной 300 °C. Температурные режимы и степени деформации на каждой стадии обработки подбирались экспериментально. Перед обработкой и в промежутках между этапами проводится гомогенизирующий отжиг при температуре 300 °C. Часть прокатанных сплавов, перед исследованиями подвергалась отжигу в режиме T6. Комплекс исследований физико-механических свойства литых и обработанных прокаткой сплавов включал изучение микроструктуры, измерение прочностных свойств при одноосном растяжении, коррозионную стойкость, фактографический анализ поверхностей разрушения образцов.

Для оценки влияния УЗ-обработки на структуру сплава был получен исходный сплав 1550 без обработки УЗ, средний размер зерна которого был равен 250±17 µm, у сплава после УЗ-обработки расплава 205 µm. Тем самым, УЗ-обработка расплава позволяет получать микроструктуру с равноосными зёрнами более мелких размеров, причем, несмотря на однородность размеров, на фотографиях структуры наблюдаются единичные зёрна размером более 250 µm.

Выявлено значительное различие структуры прокатанных сплавов от первоначальной крупнокристаллической дендритной структуры после литья. С каждым этапом прокатки крупнозернистая дендритная структура разбивается на мелкие зерна, ориентированные вдоль прокатки. Прокатка при 300 °C с суммарной степенью пластической деформации ~0.8 привела к формированию новой зеренной структуры – отличной от исходной, с вытягиванием зерен вдоль направления деформации. По результатам оптиче-

ской микроскопии приблизительный размер зерен в продольном и поперечном направлениях составляет 60 и 5 мкм соответственно.

Фрактографический анализ разрушенных после одноосного растяжения образцов показал, что у литых сплавов, не обработанных УЗ, характерно наличие картин со свободными поверхностями зерен на изломах. Для литых сплавов этот факт является следствием наличия больших дендритов сложной формы и, как следствие, слабой связью на границе между их ячейками, являющейся основным источником концентрации напряжений и, следовательно, распространения трещин, что приводит к образованию межзеренного разрушения под нагрузкой. На поверхности разрушения образцов из литых сплавов, обработанных УЗ, на изломах выявлены следы вязкого разрушения без образования свободных границ. Таким образом, были получены более высокая прочность и удлинение. В результате разрыва прокатанных сплавов на образцах формируется специфический косой излом, вызванный преобладанием сдвиговых деформаций в зоне локализации деформации.

Тенденцию изменения свойств исследуемого сплава на разных стадиях ультразвуковой (УЗ), деформационной (прокатка) и термической (Тб) обработок можно проследить в таблице, где $\sigma_{0.2}$ – условный предел текучести, $\sigma_{\rm B}$ – временное сопротивление, δ – относительное удлинение.

| , | | 1 | · <u> </u> |
|---------------------|------------------------|----------------------|------------|
| Наименование | σ _{0.2} , МПа | σ _в , МПа | δ, % |
| 1550 | 53 | 155 | 0.13 |
| 1550+Y3 | 57 | 159 | 0.11 |
| 1550+УЗ+прокатка | 332 | 363 | 0.04 |
| 1550+УЗ+прокатка+Т6 | 217 | 311 | 0.22 |

Таблица. Свойства исследуемого сплава 1550 на разных стадиях обработки

Использованная технология получения деформируемого сплава, заключающаяся в комплексном применении ультразвуковой обработки расплава для получения бездефектных отливок с гомогенной внутренней структурой и деформационной обработкой прокаткой, показала свою эффективность. Достигнутый положительный эффект заключался в получении высокопрочного листового проката из исследуемого сплава с хорошими показателями пластичности, способного сопротивляться коррозии в агрессивных средах. Выяснилось, что термически обработанные и прокатанные сплавы более стойко ведут себя в агрессивных средах, а образцы после литья поддаются коррозии сильнее.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0028.
Литература

1. Фридляндер И.Н., Добромыслов А.В., Ткаченко Е.А., Сенаторова О.Г. Перспективные высокопрочные материалы на алюминиевой основе // Металловедение и термическая обработка металлов, 2005, № 7 (601). С. 17–23.

2. Kozulin A.A., Zhukov I.A., Khrustalev A.P., Kahidze N.I., Valikhov V.D., Dautbaeva D.B., Vorozhtsov A.B. Influence of Alumina Nanoparticles on the Structure and Physical and Mechanical Properties of Pure Aluminum // Russian Physics Journal, 2020, 63(5). P. 898–900.

3. Kozulin A.A., Krasnoveikin V.A., Skripnyak V.A., Moskvichev E.N., Rubtsov V.E. Mechanical properties of ultrafine-grained Al–Mg alloy produced by severe plastic deformation // Key Engineering Materials, 2017. T. 743. P. 203–206.

4. Zhukov I.A., Kozulin A.A., Khrustalyov A.P., Kahidze N.I., Khmeleva M.G., Moskvichev E.N., Lychagin D.V., Vorozhtsov A.B. Pure aluminum structure and mechanical properties modified by Al_2O_3 nanoparticles and ultrasonic treatment // Metals, 2019. T. 9. No 11. P. 1199.

5. Козулин А.А., Жуков И.А., Промахов В.В., Ворожцов А.Б., Хрусталев А.П. Исследование влияния дисперсного упрочнения и деформационной обработки на структуру, прочностные свойства и характер пластического течения алюминиевых сплавов // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве // Материалы IV Международной научно-практической конференции / под ред. И.Е. Илларионова, 2018. С. 23–30.

References

1. *Fridlyander I.N., Dobromyslov A.V., Tkachenko E.A., Senatorova O.G.* Advanced highstrength aluminum-base materials // Metal Science and Heat Treatment. 2005. T. 47. № 7–8. P. 269–275.

2. Kozulin A.A., Zhukov I.A., Khrustalev A.P., Kahidze N.I., Valikhov V.D., Dautbaeva D.B., Vorozhtsov A.B. Influence of Alumina Nanoparticles on the Structure and Physical and Mechanical Properties of Pure Aluminum // Russian Physics Journal, 2020, 63(5), P. 898–900.

3. Kozulin A.A., Krasnoveikin V.A., Skripnyak V.A., Moskvichev E.N., Rubtsov V.E. Mechanical properties of ultrafine-grained Al–Mg alloy produced by severe plastic deformation // Key Engineering Materials, 2017. Vol. 743. P. 203–206.

4. Zhukov I.A., Kozulin A.A., Khrustalyov A.P., Kahidze N.I., Khmeleva M.G., Moskvichev E.N., Lychagin D.V., Vorozhtsov A.B. Pure aluminum structure and mechanical properties modified by Al_2O_3 nanoparticles and ultrasonic treatment // Metals, 2019. Vol. 9. No 11. P. 1199.

5. Kozulin A.A., Zhukov, I.A., Promakhov V.V., Vorozhtsov A.B., Khrustalev A.P. Research of the dispersed hardening and deformation treatment influence on the structure, strength properties and character of the aluminum alloy plastic flow // Modern technologies in engineering and foundry production, materials of IV International scientific-practical conference. Under / edition of I.E. Illarionov. 2018. P. 23–30.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА МОРФОЛОГИЮ ПОВЕРХНОСТИ И ТВЁРДОСТЬ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СПЛАВА TiNi

А.А. Атовуллаева¹, Ф.А. Дьяченко², Е.В. Яковлев³, Л.Л. Мейснер^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия ²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия ³Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия E-mail: sagittarius.a16@gmail.com

Ключевые слова: никелид титана, электронный пучок, морфология поверхности, механические свойства.

Аннотация. В работе исследовано влияние параметров обработки низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком (НСЭП) на морфологию поверхности и механические свойства поверхностного слоя сплава TiNi. Режимы НСЭП-обработки: количество импульсов воздействия n = 5, длительность импульса $\tau = 2-2,5$ мкс, плотность энергии пучка $E_s = 1,1$ Дж/см², $E_s = 1,7$ Дж/см², $E_s = 2,7$ Дж/см², $E_s = 3,7$ Дж/см². Обнаружено, что в результате НСЭП-обработки при $E_s = 1,1$ Дж/см², параметр средней шероховатости R_a уменьшается в 3 раза: от ~ 0,07 мкм для исходного образца до ~0,02 мкм, обеспечивая наибольшее выглаживание поверхности. Увеличение плотности энергии E_s не приводит к закономерному изменению прочностных и упругопластических параметров в модифицированном поверхностном слое толщиной менее ~ 500 нм.

THE INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF THE PULSE ELECTRON-BEAM TREATMENT ON THE SURFACE MORPHOLOGY AND HARDNESS OF NITI ALLOY

A. Atovullaeva¹, F. D'yachenko², E. Yakovlev³, L. Meisner^{1,2}

¹National Research Tomsk State University, Russian Federation ²Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Russian Federation ³Institute of High Current Electronics SB RAS, Russian Federation E-mail: sagittarius.a16@gmail.com

Keywords: nickel titanium alloy, electron beam, surface morphology, physical mechanical properties.

Abstract. This work presents a study of the influence of parameters of low-energy highcurrent electron-beam treatment (LEHCEB) on the surface morphology and mechanical properties of the surface layer of a NiTi alloy. To analyze changes of mechanical properties of the surface layer before and after LEHCEB-treatment, we calculated parameters of hardness *H*, modulus of elasticity *E*, characteristic of plasticity $\delta_{\rm H}$, and indent's recovery ratio η using the method of instrumental indentation. It was found that after treatment at $E_s = 1.1 \text{ J/cm}^2$, the average roughness parameter R_a decreases 3 times: from ~ 0.07 µm for the initial sample to ~ 0.02 µm, that providing the greatest surface smoothing. An increase of energy density E_s does not lead to a regular change in the strength and elastic-plastic parameters in the modified surface layer no more than ~500 nm thickness.

Сплавы на основе никелида титана, известные благодаря своим функциональным свойствам, нашли широкое применение в различных областях техники (в качестве соединительных элементов, микроактуаторов). В то же время высокая биосовместимость с тканями и жидкостями человеческого организма позволяет использовать данные сплавы в медицине (имплантаты, стенты). Однако, долговечное применение, приведённых миниатюрных изделий из TiNi сплава, может быть ограничено из-за наличия частиц вторых и/или примесных фаз. Известно, что данные включения возникают в процессе создания материала и могут негативно повлиять на его механические свойства. Одним из способов удаления частиц с поверхности металлических материалов является обработка их поверхности низкоэнергетическим (10-30 кэВ) сильноточным (10-25 кА) электронным пучком (НСЭП). В связи с этим актуальной является задача поиска и выбора оптимального режима НСЭП-обработки, который позволит выгладить и гомогенизировать тонкий приповерхностный слой без критического влияния на механические свойства ТіNi сплава.

Цель данной работы. Исследовать влияние параметров НСЭПобработки на морфологию поверхности и изменение механических свойств поверхностного слоя никелида титана, включая твёрдость, модуль упругости, упруго-пластические характеристики.

В работе использованы образцы из промышленного сплава на основе ТіNi марки TH1 (ООО «Промышленный центр МАТЕК-СПФ», Россия), размерами $10 \times 10 \times 1$ мм, вырезанные методом лазерной резки из горячекатаного листового проката. Химический состав сплава: Ti(баланс)-55.08 Ni-0.051 C-0.03 O-0.002 N (вес. %). Предварительная подготовка поверхности образцов включала следующие этапы: механическая шлифовка, электролитическая полировка, промывка в ультразвуковой ванне с дистиллированной водой. Модификация поверхности образцов TiNi сплава проведена на автоматизированной электронно-пучковой установке «РИТМ-СП» (ООО «Микросплав, Россия) [1]. Импульсную НСЭП-обработку поверхности осуществляли при следующих параметрах: величину плотности энергии электронного пучка E_s изменяли: 1,1 Дж/см², 1,7 Дж/см², 2,7 Дж/см², 3,7 Дж/см²; число импульсов воздействия n = 5; длительность импульса $\tau = 2-2,5$ мкс.

Исследования морфологии поверхности проводили методами оптической металлографии (Axiovert 200МАТ (ЦКП «НАНОТЕХ» ИФПМ СО РАН, Томск)) и оптической интерференционной профилометрии (New View 6200 (ЦКП «НАНОТЕХ» ИФПМ СО РАН, Томск)). Изменения прочностных и упруго-пластических свойств поверхностных слоёв исследовали методом инструментального индентирования на установке Nano Hardness Tester (CSEM, NHT, Швейцария). Определены параметры твердости H и модуля упругости E по методу Оливера–Фарра [2], пластичность поверхностного слоя δ_H и параметр степени неупругого формовосстановления отпечатка η определены по способам [3, 4].

На рис. 1 представлены результаты исследований параметра твёрдости H в зависимости от максимальной глубины внедрения индентора h_{max} при различных значениях максимальной нагрузки P_{max} на индентор. Для удобства анализа на данных зависимостях выделены области поверхностных слоёв на глубинах 500 и 1500 нм.



Рис. 1. Зависимости изменения твердости *H* от максимальной глубины проникновения индентора h_{max} в TiNi-образцах: после этапов предварительной подготовки поверхности: – кривая *l* (*a*, *б*); после НСЭП-обработок в режиме: $E_s = 1.1 \text{ Дж/см}^2$ (кривая 2, *a*); $E_s = 1.7 \text{ Дж/см}^2$ (кривая 3, *a*); $E_s = 2.7 \text{ Дж/см}^2$ (кривая 2, *б*); $E_s = 3.7 \text{ Дж/см}^2$ (кривая 3, *б*)

В результате НСЭП-обработок поверхности TiNi сплава при различной плотности энергии электронного пучка E_s и постоянном числе импульсов воздействия n = 5, установлено, что:

1) в результате НСЭП-обработки при $E_s = 1,1$ Дж/см² параметр средней шероховатости R_a уменьшается в 3 раза: от ~ 0,07 для исходного образца (до НСЭП-обработки) до ~ 0,02 мкм, обеспечивая наибольшее выглаживание поверхности. При E_s равном 1,7, 2,7 и 3,7 Дж/см², R_a составляет ~ 0,07 ± 0,01 мкм;

2) увеличение плотности энергии электронного пучка E_s не приводит к закономерному изменению прочностных (рис. 1, *a*, *б*) и упругопластических параметров в модифицированном слое толщиной менее ~ 500 нм. На глубине более ~ 2 мкм значения параметров твёрдости *H* (рис. 1, *a*, *б*), модуля упругости *E* и характеристики пластичности $\delta_{\rm H}$ образцов TiNi после НСЭП-обработки близки к значениям для исходной TiNi-подложки;

3) в модифицированном поверхностном слое толщиной менее ~500 нм функциональные свойства, а именно, способность к возврату накопленной неупругой деформации, ниже функциональных свойств TiNi подложки не более, чем на 10–15%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект №18-19-00198 (от 26.04.18 г.).

Литература/References

1. *Markov A.B. [et al.]* А РИТМ-СП facility for the surface alloying // Intr. Exp. Tech. 2011. Vol. 54. No 6. P. 862–866.

2. *Pharr G.M., Oliver W.C.* Measurement of thin film mechanical properties using nanoindentation // MRS Bulletin. 1992. Vol. 17. No 7. P. 28–33.

3. *Milman Yu.V.* Plasticity characteristic obtained by indentation // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. Vol. 41, 074013. P. 1–9.

4. *Ni. W., Cheng Y.-T., Grummon D.S.* Microscopic superelastic behavior of a nickeltitanium alloy under complex loading conditions // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 82. P. 2811– 2813.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ МАГНИЕВОГО СПЛАВА МЛ12, УПРОЧНЕННОГО НАНОЧАСТИЦАМИ AIN, ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

А.А. Ахмадиева, Н.И. Кахидзе, И.А. Жуков

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия E-mail: nas99.9@yandex.ru

Ключевые слова: алюминий, дисперсное упрочнение, наночастицы, нитрид алюминия, механические свойства.

Аннотация. В данной работе исследованы магниевые сплавы МЛ12, содержащие различные концентрации наноразмерных частиц AlN, введенных в составе лигатур, полученных методом ударно-волнового компактирования. Приведены результаты измерения твердости исходного и модифицированных сплавов, а также образцов, подверженных термообработке. Замечено значительное увеличение твердости термообработанных сплавов вне зависимости от концентрации введенных частиц. Проведены испытания на растяжение при комнатной температуре, рассмотрены поверхности излома разрушенных образцов. Замечено влияние 0.5 мас. % AlN на увеличение механических характеристик. Был проведен фрактографический анализ разрушенных в результате испытаний на растяжение образцов.

STUDY OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF MAG4 MAGNESIUM ALLOY HARDENED BY AIN NANOPARTICLES UNDER QUASISTATIC LOADING

A. Akhmadieva, N. Kakhidze, I. Zhukov

National Research Tomsk State University, Russian Federation E-mail: nas99.9@yandex.ru

Keywords: aluminum, dispersed hardening, nanoparticles, aluminum nitride, mechanical properties.

Abstract. In this paper magnesium alloys MAG4 containing different concentrations of nano-sized AlN particles introduced in the ligatures obtained by shockwave compacting are investigated. The results of hardness measurements of the initial and modified alloys as well as the samples subjected to heat treatment are presented. A significant increase in hardness of heat-treated alloys regardless of the concentration of introduced particles has been observed. Tensile tests at room temperature have been carried out and fracture surfaces of fractured samples have been examined. The effect of 0.5 wt.% AlN on the increase in mechanical characteristics was observed. Fractographic analysis of the specimens destroyed by tensile tests was carried out.

Снижение общего веса конструкций в транспортной, авиационной и космической промышленности в настоящее время является актуальной задачей. Повышение механических характеристик легких сплавов можно достичь при помощи дисперсного упрочнения тугоплавкими частицами. За счет этого появляется возможность заменить тяжеловесные стали облегченными композитами [1]. Магниевые сплавы, за счет высоких удельных показателей прочности, жесткости, износостойкости и малой плотности, являются перспективным материалом в данном направлении. Наночастицы нитрида алюминия AlN – выгодный модификатор магниевых сплавов, имеющий высокие параметры прочности, твёрдости, теплопроводности и при этом низкие показатели плотности и теплового расширения [2].

Целью данной работы является исследование влияния концентраций наночастиц AlN на физико-механические характеристики магниевого сплава МЛ12. Методом литья в кокиль при температуре расплава 690 °C были получены партии упрочненных сплавов МЛ12 + 0/0.1/0.3/ 0.5/1/1.5 мас. % AlN. Плавка магниевого сплава проводилась без использования флюсовых компонентов благодаря уникальному тиглю с автоматической подачей аргона, что позволило обеспечить защитную атмосферу между расплавом и воздухом. Для решения проблем агломерации и флотации [3], наночастицы нитрида алюминия вводились в расплав в составе лигатур, полученных методом ударно-волнового компактирования. Введение лигатур в зону воздействия механического смесителя и разливка, сопровождаемая вибрацией кокиля, способствовали равномерному распределе-

нию частиц в расплаве. После получения исследуемых сплавов, часть слитков каждой партии подвергалась 6-часовому термическому отжигу при температуре 200 °C (T1).

Твердость полученных образцов определялась по методу Бринелля на твердомере Duramin-500 A75 с нагрузкой 250 кг. На испытательном стенде Instron 3369 со скоростью подвижной траверсы 0.2 мм/мин при комнатной температуре проводились испытания на растяжение. Снимки разрушенных образцов были получены на микроскопе Quanta 200 3D.

По полученным результатам твердости видно, что после термообработки, значение твердости увеличивается с 49.5 до 57 НВ, при этом концентрация модифицирующих частиц в исходном сплаве почти не влияет на значение твердости.

Согласно результатам испытаний на растяжение сплавов МЛ12 и МЛ12 + 0.5 мас. % AlN, исходный и модифицированный сплавы показывают схожее деформационное поведение при растяжении: участок самоупрочнения заметно преобладает над зоной упругости, стадия неравномерного удлинения практически отсутствует. Предел прочности и значение максимальных деформаций при растяжении сплава МЛ12 с модификаторами заметно увеличились, что должно объясняться торможением частицами дислокаций по эффекту Орована [4].

При введении 0.5 мас. % AlN в сплав МЛ12 наблюдается незначительное уменьшение значения предела текучести с 65 до 53 МПа при увеличении предела прочности с 176 до 214 МПа и максимальных деформаций с 6 до 10 %.



Рис. 1. Фрактографические снимки разрушенных образцов: *а* – МЛ12 исходный; *б*, *в* – МЛ12 + 0.3 % AlN

На рис. 1 представлены микрофотографии поверхностей разрушенных в образцов исследуемых сплавов в результате испытаний на одноосное растяжение. На рис. 1, *а* приведена область разрушения исходного сплава МЛ12, которое можно интерпретировать как квази-межкристаллитное, так как на поверхности разрушения в центре видны недеформированные зерна и присутствуют поры (показаны белыми стрелками), при этом на поверх-

ностях других зерен видны следы вязкого разрушения. Наличие подобных картин со свободными поверхностями зерен на изломах для литых сплавов является следствием наличия большого размера дендритов. На изломе образца МЛ12+0.3 мас. % AlN (рис. 1, δ) видны ярко выраженные субмикронные частицы нитрида алюминия, указанные стрелками. Судя по рисунку 1, ε , сплав имеет сложную картинку разрушения, характерную для магниевых сплавов с добавлением частиц. Определено преобладание вязкого разрушения с ярко выраженным транскристаллитным растрескиванием, с чем связана большая пластичность сплавов по сравнению с исходным.

По проведенным исследованиям было выявлено влияние термообработки на значения твердости, а также незначительное влияние на показатели твердости концентрации модифицирующих частиц AlN в матрице сплава MЛ12. Исходный и модифицированный сплав при одноосном растяжении проявляют схожее деформационное поведение. Модифицированный сплав MЛ12 + 0.5 % AlN, по сравнению с исходным, имеет больший предел прочности и значение максимальных деформаций. Для образцов исследуемых сплавов при комнатной температуре характерно вязкое разрушение до достижения предела прочности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-13-01252).

Литература

1. Исследование влияния модификатора TiB₂ на структуру и физ.-мех. свойства сплава системы алюминий-магний / Н.И. Кахидзе, М.Г. Хмелева и др. // Проблемы механики: тезисы докладов. Новосибирск, 2020. С. 86–87.

2. Preparation and charac-tion of stir cast-aluminum nitride reinforced aluminum metal matrix comp. / M.N. Wahab, A.R. Daud, M.J. Ghazali, Int. J. Mech // IJMME. – Switzerland: Springer, 2009. № 4. P. 115–117.

3. Физико-механические и электрические свойства литых сплавов на основе алюминия, упрочненных наночастицами алмаза / С.А. Ворожцов, А.П. Хрусталев, Д.Г. Эскин, С.Н. Кульков, N. Alba-Baena // Известия высших учебных заведений. Физика. Томск: Изд-во ФГАО ВО «НИ ТГУ», 2014. № 11. С. 31–36.

4. Contribution of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites / Z. Zhang, D.L. Chen // Mat. Sci. Eng: A.: Switzerland: Elsevier Science Publishing Company. Inc. 2008. 585 p.

References

1. Investigation of the influence of the TiB2 modifier on the structure and physicalmechanical properties of the alloy of the aluminum-magnesium system / N.I. Kakhidze, M.G. Khmeleva et al. // Problems of mechanics: abstracts. Nsk., 2020. P. 86–87.

2. Preparation and charac-tion of stir cast-aluminum nitride reinforced aluminum metal matrix comp. / M.N. Wahab, A. R. Daud, M.J. Ghazali, Int. J. Mech // IJMME. Switzerland: Springer, 2009. № 4. P. 115–117.

3. Physicomechanical and electrical properties of cast alloys based on aluminum, hardened by diamond nanoparticles. Vorozhtsov, A.P. Khrustalev, D.G. Eskin, S.N. Kulkov, N. Alba-116 Baena // News of higher educational institutions. Physics. Tomsk: Publishing house of FGAO VO "NI TSU", 2014. No 11. P. 31–36.

4. Contribution of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites / Z. Zhang, D.L. Chen // Mat. Sci. Eng: A.: Switzerland: Elsevier Science Publishing Company, Inc, 2008. 585 p.

СТРУКТУРНЫЙ ДИЗАЙН ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ZrB₂–SiC–M₀Si₂

А.С. Буяков, М.Д. Кормашова, В.Ф. Войцик, Ю.А. Мировой, В.В. Шмаков, С.П. Буякова

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия E-mail: Alesbuyakov@gmail.com

Ключевые слова: керамика, композит, структурный дизайн, трещиностойкость.

Аннотация. Несмотря на то, что прочность, коррозионная стойкость и температура плавления некоторых керамик существенно превосходит аналогичные характеристики большинства конструкционных металлов и сплавов, широкое применение керамик ограничено их имманентной хрупкостью. Настоящая работа посвящена изучению влияния макроструктурного фактора, на вязкость разрушения керамического композиционного материала ZrB_2 –SiC–MoSi₂. Материалом исследования является композиционного материала ZrB₂–SiC, а включения ZrB_2 –MoSi₂. Было обнаружено, что такой подход к структурному дизайну функционального материала обеспечивает прирост вязкости разрушения порядка 30%, по сравнению с гомогенным распределением компонентов в структуре материала, за счет диссипации энергии трещин на межфазных интерфейсах.

STRUCTURAL DESIGN OF FUNCTIONAL COMPOSITE MATERIALS BASED ON ZrB₂–SiC–MOSi₂

A. Buyakov, M. Kormashova, V. Voytsik, Yu. Mirovoy, V. Shmakov, S. Buyakova

Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Russian Federation National Research Tomsk State University, Russian Federation National Research Tomsk Polytechnic University, Russian Federation E-mail: Alesbuyakov@gmail.com

Keywords: ceramics, composite, structural design, fracture toughness.

Abstract. Despite the fact that the strength, corrosion resistance, and melting point of some ceramics significantly exceed those of most structural metals and alloys, the wide-spread use of ceramics is limited by their inherent fragility. This work is devoted to the study

of the influence of the macrostructural factor – dual composite structure, on the fracture toughness of the ceramic composite material, based on ZrB_2 –SiC–MoSi₂. The research material is a composite with a dual compositional structure, where the matrix is represented by ZrB_2 –SiC, and the inclusions are made of ZrB_2 –MoSi₂. It was found that this approach to the structural design of a functional material provides an increase in fracture toughness of the order of 30%, compared with a homogeneous distribution of components in the structure of the material, due to dissipation of crack energy at the interfacial interfaces.

Введение. В последние годы среди исследователей все чаще звучат слова о том, что классический подход к организации структуры керамических композиционных материалов, заключающийся в механическом смешивании исходных порошков, или комбинировании различных режимов высокоэнергетической активации, не позволяет достичь качественного прироста эксплуатационных характеристик, а борьба идет за единицы процентов. В то же время активно начинают развиваться различные подходы к инжинирингу и структурному дизайну композиционных материалов [1]. Настоящая работа посвящена организации двойной композиционной структуры, или, иными словами, «композита в композите», где бифазная матрица содержит включения, в свою очередь тоже являющиеся композитом.

Бориды, карбиды и нитриды переходных металлов относятся к классу высокотемпературных керамик и характеризуются устойчивостью к экстремальному нагреву в кислородосодержащей атмосфере. Так, диборид циркония (ZrB_2) обладает высокой теплопроводностью, стойкостью к термическому удару и химической инертностью. Одними из наиболее востребованных применений композитов на основе ZrB_2 являются теплозащитные материалы и конструкции, в том числе с эксплуатационной температурой выше 1800 °C.

Введение некоторых силикатов, например, карбида кремния (SiC) в матрицу ZrB_2 способно привести не только к увеличению механической прочности матрицы за счет большей твердости, но и формированию защитной боросиликатной оболочки при окислении в процессе эксплуатации. Введение дисилицида молибдена (MoSi₂) способствует уплотнению ZrB₂ при высокотемпературном компактировании и получению высокоплотной керамики при температурах, ниже требуемых в иных условиях для получения плотного ZrB₂ [2–4]. Тем не менее, широкое распространение такого рода функциональных керамических материалов ограничено их низкой устойчивостью к образованию эксплуатационных дефектов и катастрофической потерей прочности при формировании трещин.

Целью данной работы является создание многоуровневой композиционной структуры, обеспечивающей диссипацию энергии распространяющихся трещин на межфазовых интерфейсах [5].

Материалы и методы. В работе реализован подход к формированию двойной композиционной структуры керамического материала путем вве-

дения включений ZrB_2 –MoSi₂ в матрицу ZrB_2 –SiC. Были получены керамические композиционные материалы, представленные матрицей на основе ZrB_2 –SiC (90 и 10 вес. % соответственно), и включениями, в виде ZrB_2 –MoSi₂ гранул (80–20 вес. %). Объемная доля гранул в образцах составила 40 %, рис. 1. Гранулы были получены методом лиофильной сушки, средний размер гранул составил 157.31±84.96 мкм. Перед введением в матричный порошковый состав гранулы были предварительно спечены в вакууме при 1400 °C. Контрольные образцы имели аналогичный фазовый состав, однако были получены путем высокоэнергетического механического смешивания всех порошков исходных компонентов. Спекание композитов осуществлялось при 1900 °C под давлением 40 МПа.



Рис. 1. Микроструктура исследуемого композита ZrB2-SiC-MoSi2

Результаты. В результате проведенных исследований было обнаружено, что относительная плотность двойного композита составила 97 %, в то время как плотность композита с аналогичным составом, но гомогенным распределением компонент в объеме не достигала 96 %. Микроструктурные исследования показали, что после высокотемпературной консолидации под давлением гранулы сохранили форму, близкую к сферической. Твердость Hv композита с гомогенным распределением компонент составила 17.45±0.98 ГПа, что согласуется с данными, полученными другими авторами для керамик данного состава [2]. Твердость матрицы двойного композита составила 17.02±0.26 ГПа, а гранул 12.92±0.37 ГПа, что закономерно при более высокой локальной концентрации MoSi₂, снижающего твердость, по сравнению с композитом с гомогенным распределением MoSi₂ по всему объему исследуемого образца.

Вязкость разрушения исследуемых материалов определена с помощью SEVNB-метода. Вязкость разрушения композита с гомогенным распреде-

лением компонентов составила 2,96 \pm 0,06 МПа·м^{1/2}, а композита с двойной структурой – 3,54 \pm 0,07 МПа·м^{1/2}.

Заключение. В результате проведенных исследований была показана принципиальная возможность и состоятельность подхода к увеличению вязкости разрушения и трещиностойкости композиционных материалов при приложении методов структурного дизайна. Дальнейшим этапом реализуемого комплекса научных исследований станет проведение испытаний по устойчивости к образованию трещин в условиях воздействия потока высокотемпературной кислородсодержащей плазмы.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект FWRW-2021-0009.

Литература/References

1. Monteverde F. [et al.]. Escape from the strength-to-toughness paradox: Bulk ceramics through dual composite architectures // Journal of the European Ceramic Society. 2018. Vol. 38, No 8. C. 2961–2970.

2. *Guo S.Q. [et al.]*. Mechanical properties of hot-pressed ZrB₂–MoSii₂–SiC composites // Journal of the European Ceramic Society. 2008. Vol. 28, № 9. C. 1891–1898.

3. *Srinivasan S.R., Schwarz R.B., Embury J.D.* Ductile-to-brittle transition in MoSi₂. Издво MRS Online Proceedings Library Archive. 1992. 288 с.

4. Savchenko N.L. [$u \partial p$.]. Adaptation and self-healing effect of tribo-oxidizing in high-speed sliding friction on ZrB₂-SiC ceramic composite // Wear. 2020. Vol. 446. C. 203–204.

5. Buyakov A.S. [et al.]. Increasing fracture toughness of zirconia-based composites as a synergistic effect of the introducing different inclusions // Ceramics International. 2020. Vol. 47, No 8. C. 10582–10589.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕДОВЫХ ОБРАЗЦОВ, УСИЛЕННЫХ В СРЕДИННОМ СЕЧЕНИИ ТОНКОСТЕННЫМИ ТРУБАМИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.С. Васильев¹, В.Л. Земляк¹, В.М. Козин²

¹Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема», Россия ²Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, Россия E-mail: Vasil-grunt@mail.ru

Ключевые слова: ледовая балка, чистый изгиб, трубы из поливинилхлорида, напряженно-деформированное состояние, прогиб.

Аннотация. Устройство дорожных переправ на территории Арктического шельфа и районах крайнего Севера, а также реках Сибири и Дальнего Востока в зимний период, выполнение которой позволяет значительно сократить ресурсы на логистику при перевозке грузов по поверхности льда. В данной работе авторами исследовались композиционные материалы на основе льда, где в качестве армирующего материала выступали тонкостенные трубы из поливинилхлорида, помещаемые в середину сечения образцов. Испытывались два вида труб вентиляционные белые и оранжевые канализационные. Механические характеристики льда вычислялись при раздавливании образцов ледовых призм, длиной 60 см, с размерами сечения 15х15 см. Результаты испытаний показали, то при армировании трубой разрушение происходит более плавно, и деформации перед разрушением имеют большие значения. Однако тонкостенные трубы SN_2 и SN_4 не привнесли существенного вклада в увеличение несущей способности, в отличие от образца SN_8 , который повысил несущую способность порядка 7%, а пластичность порядка 100%. Таким образом, усиление срединного сечения ледяных образцов тонкостенными трубами из ПВХ увеличили пластичность образцов, без явного увеличения несущей способности.

INVESTIGATION OF ICE SPECIMENS, REINFORCED IN THE MIDDLE SECTION WITH THIN-WALLED PIPES MADE OF POLYMER MATERIALS

A. Vasilyev¹, V. Zemlyak¹, V. Kozin²

¹Sholom-Aleichem Priamursky State University, Russian Federation ² Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation E-mail: Vasil-grunt@mail.ru

Keywords: ice beam, pure bending, polyvinyl chloride pipes, stress-strain state; deflection.

Abstract. Arrangement of road crossings on the territory of the Arctic shelf and regions of the Far North, as well as the rivers of Siberia and the Far East in winter - the implementation of which can significantly reduce resources for logistics when transporting goods on the ice surface. In this work, the authors investigated composite materials based on ice, where thin-walled polyvinyl chloride pipes, placed in the middle of the cross section of the samples, acted as a reinforcing material. Two types of ventilation pipes, white and orange, were tested. The mechanical characteristics of ice were calculated by crushing samples of ice prisms, 60 cm long, with a section size of 15x15 cm.

The test results showed that when reinforced with a pipe, destruction occurs more smoothly, and the deformations before destruction are of great importance However, thin-walled pipes SN_2 and SN_4 did not make a significant contribution to the increase in bearing capacity, in contrast to the sample SN8, which increased the bearing capacity by about 7%, and the ductility by about 100%. Thus, the reinforcement of the middle section of ice specimens with thin-walled PVC pipes slightly increased the ductility of the specimens, without an obvious increase in the bearing capacity.

Введение. Известно, что при перемещении нагрузки с определенной (критической) скоростью по поверхности льда, в системе «лед-вода» возможно возникновение прогрессивных изгибно-гравитационных волн, при определенной интенсивности которых может произойти частичное или полное разрушения льда [1]. В связи с этим весьма актуальной становится задача прогнозирования пластичности и несущей способности льда в зависимости от его физико-механических свойств от воздействия на него дви-

жущихся нагрузок. Разрушения льда от нормальных, наклонных и радиальных трещин исследовали в своих работах W. Lu, R. Lubbad [2]; C.E. Renshaw; E.M. Schulson; S.J.G. Sigward, [3]; J.D. Tippmann; H. Kim, J.D. Rhymer [4].

В данной работе выполняется усиление льда тонкостенными трубами из поливинилхлорида и определяется степень их влияния на прочностные и пластические свойства композитного материала на основе льда. Существует два типа канализационных труб: серые и оранжевые. Основное отличие между ними – оранжевые трубы менее чувствительны к колебаниям температур, поэтому чаще применяются для прокладки наружных коммуникаций, в то время как серая труба – для прокладки внутренних. Данная работа посвящена усилению ледовых образцов полимерными материалами. Для усиления использовались трубы из поливинилхлорида, двух видов: гладкие канализационные оранжевые и гладкие белые вентиляционные. Трубы оранжевые из поливинилхлорида (ПВХ) предназначены наружной прокладки канализации. По восприятию механической нагрузки такие трубы подразделяются на три группы: SN₂ – менее прочные, легкие, с толщиной стенки 2,3 мм, способные воспринимать до 2 кН; SN₄ – средней прочности и легкости, толщиной от 2,5 до 12,3 мм способные воспринимать до 4 кН; SN₈ – наиболее прочные, тяжелые, толщиной от 3,2 до 15,3 мм, способные воспринимать до 8 кН.

Трубы для воздуховодов белые, с толщиной стенки в 1,5 мм. Классифицируются по сопротивляемости давлению следующим образом: низкому – до 900 Па; среднему от 900 до 2000 Па; высокому – сверх 2000 Па.

Актуальность. На сегодняшний день, использование композиционных материалов с ледовой основой становится необходимостью. Это обусловлено рядом факторов: возможностью регулирования прочности и пластичности льда, жёсткости и плотности, а также технологическими особенностями исполнения. В данной работе ледяные образцы армировались полимерными материалами: канализационными оранжевыми трубами, а также вентиляционными белыми. У полимерных материалов есть некоторые преимущества: они сравнительно дёшевы, имеют высокую химическую устойчивость, не корродируют. Также они имеют небольшую плотность, а значит низкую массу, и, следовательно, не уменьшают полезную нагрузку при усилении ледовой переправы. Канализационные трубы достаточно просто вморозить в лёд, в силу их плавучести. В работе авторами проверено, насколько полимерные тонкостенные трубы большого диаметра способны изменять механические свойства композитного материала на основе льда.

Цель: определить влияние тонкостенных труб из поливинилхлорида на пластичность и несущую способность ледовых образцов при их усилении.

Задачи:

1. Проведение модельных экспериментов и построение диаграмм нагрузка-прогиб для образцов, усиленных в срединном сечении тонкостенными трубами.

2. Проведение численных расчётов аналогичных образцов в ПК ANSYS с шагом нагружения, соответствующего шагу при модельных испытаниях.

3. Проверка работы модели при сопоставлении диаграмм результатов численных и модельных испытаний для труб SN_2 , а также белых вентиляционных труб.

4. Расчёт образцов труб SN_4 и SN_8 для выявления влияния различных образцов вентиляционных труб на физико-механические свойства материала на основе льда.

Методология исследования. Для данных экспериментов применялись трубы оранжевые канализационные и белые для вохдуховодов, диметром 160 мм, толщиной от 1,5 до 4 мм, способные воспринимать нагрузку до 2 кH.

Для труб под давлением величина продольного напряжения определяется следующим образом:

$$\sigma_m = (\rho \cdot R)/(2 \cdot \delta),$$

где ρ – давление в трубах (в данном случае давление, на которое эти трубы рассчитаны); R – радиус оболочки по средней линии; δ – толщина оболочки.

σ (m white pipe)=(2.0.08)/(2.0.0015)=53.3 кПа,

 $\sigma_{m_orange_pipe} = (2.0.08)/(2.0.004) = 20$ κΠa.

Для выполнения модельных экспериментов по исследованию возможности повышения несущей способности ледяного покрова путем внедрения в него армирующих элементов была спроектирована и разработана универсальная установка. Основу установки составил пневмогидравлический пресс, состоящий из стоек, станин, верхней и нижней балок и привода. Максимальное развиваемое усилие пресса равнялось 20 т. Номинальное давление 9 атм.

Стенки и дно опалубки выполнены из досок толщиной 40 мм. Представленная опалубка позволяет заготавливать ледовые образцы размерами L×B×H=2000×200×200 мм. В собранную опалубку закладывалась двухслойная полиэтиленовая плёнка, затем в случаи заготовки усиленных образцов устанавливались армирующие каркас. После этого заливалась вода. Жидкость подвергалась воздействию низких атмосферных температур (t<0°C) до её полного замерзания. Время приготовления образца в зависимости от погодных условий составляло от 5 до 7 сут при температуре окружающей среды от –16 до –28 °С.

Было разрушено по 10 образцов каждого вида, затем значения осреднялись и строилась диаграмма. Следует отметить, что явной разницы между результатами армирования образцов белой и оранжевой трубой обнаружено не было, поэтому данные результаты будут объединены в один



Рис. 1. Процесс нагружения ледяных балок, до разрушения сечения в середине пролёта балки

Численное исследование выполнялось в ПК ANSYS. Лёд моделировался конечными элементами SOLID-65 на основе модели прочности Willam-Warnke. Трубы моделировались конечными элементами SOLID-185, и представляли собой трёхмерные тонкостенные тела. Работоспособность модели подтверждается путем сопоставления численного расчета с данными модельных экспериментов.

Основные результаты и выводы. Расчёты показали, что пластиковая труба SN₂ не привнесла значительного вклада в увеличение несущей способности или жёсткости образцов. При этом наблюдается удовлетворительное совпадение расчётных и опытных данных при построении диаграмм нагрузка–прогиб при сопоставлении данных модельного эксперимента и расчёта для бразов усиленных SN₂.

Результаты испытаний показали, что армирование трубами при достаточных значениях прочности могут увеличить, как пластичность образцов, так и их несущую способность. Однако тонкостенные трубы SN_2 и SN_4 не привнесли существенного вклада в увеличение несущей способности, в отличие от образца SN_8 , который повысил несущую способность порядка 7%. Пластичность при этом возросла порядка 120%. Таким образом, уси-124

ление срединного сечения ледяных образцов тонкостенными трубами из ПВХ способно увеличить как пластичность, так и несущую способность ледяных образцов.

Литература

1. *Козин В.М., Земляк В.Л.* Физические основы разрушения ледяного покрова резонансным методом. Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ ДВО РАН, ПГУ им. Шолом-Алейхема, АмГПГУ. 2013. 250 с.

2. *Lu W.J., Lubbad R., Loset Sю* (2015). Out-of-plane failure of an ice floe: Radialcrack-initiation-controlled fracture, Cold regions science and technology, 119, 183–203. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.08.009.

3. *Renshaw CE, Schulson EM, Sigward SJG* (2017). Experimental observation of the onset of fracture percolation in columnar ice. Geophysical research letters, 44(4), 1795–1802. DOI: 10.1002/2016 GL071919.

4. *Tippmann JD, Kim H, Rhymer JD* (2013). Experimentally validated strain rate dependent material model for spherical ice impact simulation. International journal of impact engineering, 57, 43–54. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2013.01.013.

References

1. *Kozin V.M., Zemlyak V.L.* Physical foundations of ice cover destruction by the resonance method / Komsomolsk-on-Amur: IMiM FEB RAS, PSU im. Sholem Aleichem, AMSPGU. 2013. 250 p.

2. *Lu WJ, Lubbad R, Loset S* (2015). Out-of-plane failure of an ice floe: Radial-crack-initiation-controlled fracture, Cold regions science and technology, 119, 183–203. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.08.009.

3. *Renshaw CE, Schulson EM, Sigward SJG* (2017). Experimental observation of the onset of fracture percolation in columnar ice. Geophysical research letters, 44(4), 1795–1802. DOI: 10.1002/2016 GL071919.

4. *Tippmann JD, Kim H, Rhymer JD* (2013). Experimentally validated strain rate dependent material model for spherical ice impact simulation. International journal of impact engineering, 57, 43–54. DOI: 10.1016/j.ijimpeng. 2013.01.013.

СТРУКТУРНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОЙ КЕРАМИКИ (Zr–Nb–Hf)С

Ван Дакунь¹, А.Г. Бурлаченко², Ю.А. Мировой^{1,2}, Е.С. Дедова^{1,2} С.П. Буякова^{1,2,3}

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия ²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия ³Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия E-mail: lanyuyan1993@gmail.com

Ключевые слова: карбидная керамика, горячее прессование, структура.

Аннотация. В ходе выполнения работы керамические материалы ZrC-HfC-NbC были получены методом горячего прессования при температурах 1400÷ 1900 °C с шагом 100 °C. Установлено, что высокоэнтропийный твёрдый раствор (Zr-Nb-Hf)C с ГЦК-решеткой по типу NaCl формируется при температуре 1600 °C. Твёрдый раствор (Zr-Nb-Hf)C формируется засчет более простых двухкомпонентных соединений. Увеличение температуры горячего прессования с 1400 до 1900 °C привело к повышению плотности и уменьшению пористости исследуемых материалов.

STRUCTURAL EVOLUTION OF HIGH-ENTROPIC CERAMICS (Zr–Nb–Hf) C

Wan Dakun¹, A. Burlachenko², Yu. Mirovoy^{1,2}, E. Dedova, S. Buyakova^{1,2,3}

¹Tomsk Polytechnic University, Russian Federation ²Institute of Strength Physics and Materials Science Siberian, Branch of Russian Academy of Sciences, Russian Federation ³ National Research Tomsk State University, Russian Federation E-mail: lanyuyan1993@gmail.com

Keywords: carbide ceramics, hot-pressing, structure.

Abstract. In this work, ceramic materials ZrC–HfC–NbC were obtained by hot pressing at temperatures of 1400÷ 1900 °C with a step of 100 °C. It has been established that the highentropy solid solution (Zr–Nb–Hf)C with an FCC lattice of the NaCl type was formed at a temperature of 1600 °C. Solid solution (Zr–Nb–Hf)C is formed by simpler two-component compounds. An increase of the hot-pressing temperature from 1400 to 1900 °C led to an increase in the density and a decrease in the porosity of the obtained materials.

Введение. Высокоэнтропийные керамические материалы (HEC – high entropy ceramics) вызывают значительный научный и практический интерес вследствие уникального сочетания свойств, таких как высокая температура плавления, термическая устойчивость, высокая вязкость разрушения и т.д. [1]. В настоящее время карбидная керамика привлекает все большее внимание для потенциального использования в высокотемпературных областях применения благодаря высокой температуре плавления (> 3273 K) и механическим свойствам [2, 3]. На сегодняшний день большинство существующих исследований сосредоточено на получении и исследовании свойств высокоэнтропийных керамик [4, 5]. Однако остаются открытыми вопросы о структурно-фазовых превращениях, протекающих при формировании высокоэнтропйиных твердых растворов.

Целью настоящей работы является получение высокоэнтропийных твердых растворов на основе карбидов и исследование их структурообразования.

Материалом для исследований выступил высокоэнтропийный керамический твердый раствор (Zr–Nb–Hf)С, полученный из порошков ZrC, HfC и NbC в эквимолярном соотношении. Приготовление порошковых смесей с их одновременной активацией производилось в планетарной мельницеактиваторе в среде аргона в течение 3 мин при частоте вращения барабана 1820 об/мин⁻¹. Образцы керамических композитов получены методом горячего прессования при температурах спекания от 1400 до 1900 °C с шагом 100 °C при давлении 50 МПа в течение 30 мин в атмосфере аргона. Фазовый состав высокоэнтропийных керамик анализировался с помощью дифрактометра с СиКа-излучением. Микроскопические исследования проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа "Vega Tescan". Плотность керамических материалов определялась методом гидростатического взвешивания. Пористость керамических материалов была определена методом случайных секущих по микроизображениям полированной поверхности керамик.

Результаты и обсуждение эксперимента. Повышение температуры горячего прессования с 1400 до 1900 °С привело к уплотнению керамических материалов ZrC–NbC–HfC с 6,8 до 8,6 г/см³ соответственно, рис. 1, *а*. При этом наблюдалось уменьшение пористости с 10 до 5%.

| температуры горячего прессования | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|--|--|--|--|
| Т, ℃ | 1400 | 1500 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 | | | | |
| ρ, г/см ³ | 6,8 | 7,8 | 8,4 | 8,5 | 8,6 | 8,6 | | | | |
| φ, % | 10,1 | 8,3 | 7,6 | 6,9 | 6,1 | 5,1 | | | | |

Таблица 1. Плотность и пористость керамических материалов ZrC–NbC–HfC от температуры горячего прессования

Рентгеновские исследования показали, что фазовый состав керамических материалов, полученных при температуре горячего прессования до 1500 °C, был представлен карбидами переходных металлов ZrC, HfC и NbC. Повышение температуры спекания выше 1600 °C привело к формированию твердого раствора замещения (Zr–Nb–Hf)C с ГЦК-решеткой.



Рис. 1. РЭМ-изображения поверхности керамических материалов ZrC–NbC–HfC от температуры горячего прессования

Заключение. Повышение температуры горячего прессования приводит к уплотнению и снижению пористости полученных образцов. Образование твердого раствора системы ZrC–HfC–NbC с ГЦК-решеткой проводилось при 1600 °C.

Работа проводилась в рамках Государственного задания ИФПМ СО РАН (программа III.23.2.3).

Литература/References

1. *Rost C.M., Sachet E., Borman T., Mionsoballegh A., Dickey E.C., Hou D., Maria J.P.* (2015). Entropy-stabilized oxides. Nat Commun 6: 8485.

2. Sarker P., Harrington T., Toher C., Oses C., Samiee M., Maria J.P., Curtarolo S. (2018). High-entropy high-hardness metal carbides discovered by entropy descriptors. Nature communications, 9(1), 1–10.

3. *Yan X., Constantin L., Lu Y., Silvain J.F., Nastasi M., Cui B.* (2018). (Hf0. 2Zr0. 2Ta0. 2Nb0. 2Ti0. 2) C high-entropy ceramics with low thermal conductivity. Journal of the American Ceramic Society, 101(10), 4486–4491.

4. Chellali M.R., Sarkar A., Nandam S.H., Bhattacharya S.S., Breitung B., Hahn H., Velasco L. (2019). On the homogeneity of high entropy oxides: An investigation at the atomic scale. Scripta Materialia, 166, 58–63.

5. Zhang H., Akhtar F. (2019). Processing and characterization of refractory quaternary and quinary high-entropy carbide composite. Entropy, 21(5), 474.

О ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ ПРОПИТКИ ПОРИСТЫХ СРЕД НАНОСУСПЕНЗИЯМИ ПРИ СОЗДАНИИ МАТЕРИАЛОВ С ЗАДАННЫМИ СВОЙСТВАМИ

В.А. Демин, Б.С. Марышев, А.И. Меньшиков

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия E-mail: demin@psu.ru

Ключевые слова: пористая среда, фильтрация наножидкости, сорбционные процессы.

Аннотация. Представлены результаты прямого численного моделирования процесса изотермической пропитки наножидкостью образца в форме цилиндрического слоя, выполненного из пористого материала с заданными физическими свойствами. В основу физико-математической модели положена способность наночастиц адсорбироваться на стенках пористого скелета в ходе прокачки жидкости через поры материала. Показано, что для рассматриваемых суспензий картина насыщения материала наночастицами характеризуется возникновением специфического концентрационного фронта иммобильной примеси, который нестационарно движется под действием внешнего градиента давления. Расчеты выявили разную динамику оседания примеси на стенках пор в зависимости от кривизны концентрационного фронта.

HYDRODYNAMIC REGIMES OF POROUS MEDIA SATURATION BY NANOSUSPENSIONS DURING CREATION OF MATERIALS WITH PREDICTABLE PROPERTIES

V. Demin, B. Maryshev, A. Menshikov

Perm State National Research University, Russian Federation E-mail: demin@psu.ru

Keywords: porous medium, filtration of nanosuspension, sorptive processes.

Abstract. The results of direct numerical simulation, devoted to an isothermal saturation process of a porous material in the form of cylindrical layer with a suspension, are presented. The mixture is prepared on the basis of a carrier liquid mixed with nanoparticles, having specific physical properties. Mathematical model is based on the ability of nanoparticles to adsorb on the walls of tubules during the pumping of a liquid through a porous medium. The calculations were carried out taking into account the complex dynamics of pore clogging caused by changes of the medium porosity and permeability during filtration. It is shown that for the suspensions and materials under consideration, the saturation pattern of the material with nanoparticles is characterized by the appearance of a specific concentration front of the immobilized impurity, which moves monotonously under the action of an external pressure gradient. The essentially nonlinear behavior of the concentration front in time is demonstrated which is a consequence of the strong feedback in the system. Initially, adsorption by reducing the porosity weakens the pressure movement, and this in turn entails an even greater increase in the adsorption process. The analysis of the motion of the immobile impurity front depending on the radius of curvature of the cylindrical layer is carried out. The calculations revealed different dynamics of impurity deposition on the pore walls depending on the curvature of the concentration front

Введение и постановка задачи. Современные методы получения новых материалов с заданными свойствами зачастую требуют применения новых подходов, включая эксперимент и полноценное численное моделирование. Необходимость привлечения оригинальных теоретических моделей напрямую связана с производством композитных материалов. Описание процесса пропитки материалов различными наполнителями является актуальной и перспективной задачей, направленной на улучшение новых технологий. Для описания процесса пропитки была выбрана МІМ-модель, особенностью которой является разделение примеси на две фазы: мобильную – дрейфующую в потоке, и иммобильную – осевшую на скелет заготовки. В ходе фильтрационных процессов [1] возможны достаточно большие перепады давления, что приводит к высоким скоростям на начальных этапах пропитки. В этом случае стандартная МІМ модель нуждается в доработке. Ее модификация представляет собой добавление дополнительной нелинейности для более корректного описания рассматриваемого пропесса.

Методика решения и основные результаты. Двумерная краевая задача в частных производных решалась методом конечных разностей по явной схеме. Шаг по времени выбирался из соображений устойчивости численной процедуры (критерий Куранта–Фридрихса–Леви). В ходе расчетов по времени применялась процедура установления. Компьютерный код реализован на языке программирования FORTRAN-90.



Рис. 1. Распределение иммобильной фазы вдоль радиальной координаты для следующих параметров: Rp = 30, Pe = 800, $u_c = 300$, a = 600, b = 20, $\phi_0 = 0.5$; кривые *1*–9 соответствуют моментам безразмерного времени: 0.001, 0.002, 0.003, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3

С точки зрения пропитки материалов наибольший практический интерес вызывает распределение иммобильной концентрации в зависимости от времени. Поперечные сечения поля иммобильного компонента в разные моменты времени приведены на рис. 1. Эти распределения характеризуются наличием ярко выраженного концентрационного фронта. Изначально примесь довольно быстро проникает вглубь материала на небольшое расстояние, образуя пограничный слой. В нем сразу начинается процесс ад-130 сорбции. Как следствие, включается механизм обратного влияния иммобильной примеси на адсорбционный процесс и соответственно на скорость фильтрации. С ростом концентрации иммобильной примеси скорость фильтрации резко падает, в результате чего возникает укручение концентрационного фронта. Значение концентрации иммобильной примеси относительно быстро достигает насыщения, и скорость еще больше уменьшается. Тем не менее, процесс фильтрации не прекращается полностью, а медленно, на протяжении всего времени концентрационный фронт продолжает продвигаться вглубь пористого образца вплоть до противоположной границы.

Здесь u_c – критическая скорость, определяющая порог действия десорбционного механизма, ϕ_0 – начальная пористость, *a* и *b* характеризуют адсорбционные и десорбционные процессы, число Пекле (Pe) описывает интенсивность прокачки в системе, число Рэлея–Дарси (Rp) отвечает за действие силы тяжести.

Литература/References

1. Nield D.A., Bejan A. Convection in porous media. New York: Springer. 2006. 654 p.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЕНИЯ СМЕСЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ, СОДЕРЖАЩИХ АЛЮМИНИЙ И БОР

М.О. Енков¹, Т.И. Горбенко¹, М.В. Горбенко²

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия ²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия E-mail: enkov_maksim@mail.ru

Ключевые слова: смесевые композиции, алюминий, бор, термодинамический расчет, удельный импульс.

Аннотация. В работе представлены результаты термодинамического моделирования характеристик горения смесевых композиций, содержащих металлическое горючее – алюминий или бор. Определено влияние компонентного состава на адиабатическую температуру горения, удельный импульс, на содержание хлорида водорода и конденсированных веществ в продуктах сгорания. Дана оценка эффективного применения смесевых композиций в зависимости от типа металлического горючего.

STUDY OF COMBUSTION CHARACTERISTICS OF MIXED COMPOSITIONS CONTAINING ALUMINUM AND BORON

M. Enkov¹, T. Gorbenko¹, M. Gorbenko²

¹National Research Tomsk State University, Russian Federation ²National Research Tomsk Polytechnic University, Russian Federation E-mail: enkov_maksim@mail.ru

Keywords: mixed compositions, aluminum, boron, thermodynamic calculation, specific impulse.

Abstract. The paper presents the results of thermodynamic modeling of the combustion characteristics of mixed compositions containing metallic fuel aluminum or boron. The influence of the component composition on the adiabatic combustion temperature, specific impulse, on the content of hydrogen chloride and condensed substances in the combustion products is determined. Evaluation of the effective use of mixed compositions depending on the type of metal fuel is given.

Алюминий и бор находят широкое применение в качестве металлического горючего в составах смесевых композиций (СК), применяемых в энергетических установках специального назначения [1, 2]. Алюминий и бор наряду с достоинствами имеют определенные недостатки. Основным продуктом горения алюминия является оксид алюминия (Al_2O_3), который практически не существует в газовой фазе. Это обусловливает эффективность его применения в высокотемпературных топливах. В отличие от оксида алюминия оксид бора B_2O_3 , и более низкие его оксиды существуют в газовой фазе. Это позволяет рассматривать бор не только в качестве энергетической добавки, но также в качестве дополнительного источника рабочего тела. Существенным недостатком бора является трудность воспламенения его частиц, это может приводить к неполноте его сгорания в двигателе или энергетической установке [3, 4].

Цель данной работы – исследование энергетических характеристик смесевых композиций (СК), содержащих алюминий или бор, при различных значениях давления в камере сгорания и коэффициента избытка окислителя (а).

Для достижения поставленной цели были выбраны композиции, содержащие горючее связующее марки СКДМ-80 и окислитель перхлорат аммония (ПХА). Коэффициенты избытка окислителя приняты равными α=0.5 и 0.6. Содержание металлического горючего (А1 или В) варьировалось от 10 до 20 масс.%.

Для определения энергетических характеристик смесевых композиций, а также содержания конденсированной фазы (к-фазы) в продуктах сгорания и других параметров использовали программу термохимических равновесий TERRA, разработанную в МГТУ им. Н.Э. Баумана [5]. Увеличение содержания металлического горючего проведено за счет уменьшения содержания окислителя и горючего связующего при сохранении значения α .

| | | А | 1 | В | | | | | |
|--|----------|-------------|-------------|-------------|-------|--|--|--|--|
| Параметры | Давление | α=0.5 | α=0.6 | α=0.5 | α=0.6 | | | | |
| | (р, МПа) | | Содержани | е металла % | | | | | |
| | | 10–15 | 10–15 | 10–15 | 10 | | | | |
| <i>Т</i> _{ад} , К | 4 | 2725-3061 | 3073-3334 | 2419-2464 | 2869 | | | | |
| | 7 | 2735-3086 | 3097-3376 | 2471-2515 | 2885 | | | | |
| <i>I</i> _{уд} , с | 4 | 256–267 | 265-271 | 259–255 | 260 | | | | |
| | 7 | 264–277 | 274–282 | 271–268 | 271 | | | | |
| Z | 4 | 0.189-0.283 | 0.189-0.283 | 0.263-0.230 | 0.129 | | | | |
| | 7 | 0.189-0.283 | 0.189-0.283 | 0.291-0.278 | 0.178 | | | | |
| Содержание конденсированных продуктов сгорания (моль/кг) | | | | | | | | | |
| Al ₂ O ₃ | 4 | 1.853-2.780 | 1.853-2.779 | _ | _ | | | | |
| | 7 | 1.853-2.780 | 1.853-2.780 | — | — | | | | |
| B ₂ O ₃ | 4 | — | — | 3.772-2.748 | 1.858 | | | | |
| | 7 | — | — | 4.178-3.349 | 2.563 | | | | |
| BN | 4 | _ | _ | 0-1.556 | _ | | | | |
| | 7 | _ | _ | 0-1.823 | _ | | | | |

Таблица 1. Результаты термодинамических расчетов

Термодинамический расчет характеристик горения смесевых композиций проведен при давлении в камере сгорания 4 и 7 МПа, а на срезе сопла 0.1 МПа. Расчеты показали, что для обеспечения требуемых физикомеханических свойств СК и поддержания высоких значений удельного импульса увеличение содержания Al целесообразно не выше 15 масс.%, содержание бора при α =0.5 допустимо в диапазоне 10–15 масс.%, при α =0.6 содержание бора допустимо не выше 10 масс.%. Установлено, что введение в базовый состав (ПХА+СКДМ-80) алюминия или бора приводит к снижению содержания хлорида водорода в 1.3 раза, что является важным при повышении экологических характеристик продуктов сгорания.

В табл. 1 представлены основные характеристики горения такие, как влияние количества металла в смесевой композиции на адиабатическую температуру горения (T_{ag}), на величину удельного импульса (I_{yg}), на содержание конденсированной фазы (z), на содержание в продуктах сгорания конденсированного оксида алюминия, оксида бора и нитрида бора.

Анализ расчетов показал, что при увеличении значений давления (от 4 до 7 МПа) и α (0.5 и 0.6) все значения энергетических характеристик в СК (T_{ad} , I_{yd}), содержащих алюминий или бор, возрастают. В смесевых композициях, содержащих алюминий, на значения содержания конденсированных продуктов сгорания в большей степени влияет количество вводимого алюминия в состав смесевой композиции. Так, при повышении содержания

металла значения величины z и содержание конденсированного Al_2O_3 увеличиваются в 1.5 раза, при этом изменение давления и α не оказывают влияния. В композициях, содержащих бор, повышение давления приводит к незначительному возрастанию содержания конденсированных продуктов горения, а повышение коэффициента α от 0.5 до 0.6 способствует снижению содержания конденсированной фазы в 2 раза при p=4 МПа и в 1.6 раза при p=7 МПа.

Известно, что бору требуется для окисления гораздо больше кислорода, чем алюминию; горение бора затруднено и протекает медленно из-за высокой температуры плавления бора и способности жидкого оксида бора покрывать поверхность частицы.

Обобщая полученные результаты, можно также отметить, что эффективность использования металлического горючего алюминия для достижения высоких энергетических характеристик реализуется в высокотемпературных составах при адиабатической температуре горения порядка 2500 К и выше. Борсодержащие смесевые композиции при указанных выше температурах, по сравнению с композициями на основе алюминия характеризуются пониженными значениями I_{yd} , и содержат значительно больше конденсированной фазы. В связи с этим борсодержащие композиции более эффективны при пониженных температурах горения порядка 1700–2000 К, что возможно при замене перхлората аммония на нитрат аммония.

Литература

1. *Кузнецов Г.П., Колесников-Свинарёв В.И., Ассовский И.Г.* О горении алюминия, бора и их композиции в кислородсодержащих средах // Горение и взрыв. 2017. Т. 10. №2. С. 112–115.

2. Gorbenko T.I., Gorbenko M.V, Orlova M.P., Volkov S.A. The study of the effect of aluminum powders dispersion on the oxidation and kinetic characteristics // J. Phys.: Conf. Ser. 919 012022. 2017.

3. Van Devener B., Perez J. P. L., Jankovich J., Anderson S. L. Oxide-free, catalystcoated, fuel-soluble, air-stable boron nanopowder as combined combustion catalyst and high energy density fuel // Energy Fuels. 2009. Vol. 23, № 12. P. 6111–6120.

4. *Liang D., Liu J., Xiao J., et al.* Effect of metal additives on the composition and combustion characteristics of primary combustion products of B-based propellants // J. Therm. Anal. Calorim. 2015. Vol. 122. P. 497–508.

5. *Трусов Б.Г.* Программная система ТЕРРА для моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах // Горение и плазмохимия: Ш Междунар. симпоз. Алматы: Изд-во Казах. нац. ун-та, 2005. С. 52–57.

References

1. *Kuznetsov G.P., Kolesnikov-Svinarov V.I., Assovskiy I.G.* O gorenii alyuminiya, bora i ikh kompozitsii v kislorodsoderzhashchikh sredakh // Goreniye i vzryv. 2017. T. 10. №2. S. 112–115.

2. Gorbenko T.I., Gorbenko M.V., Orlova M.P., Volkov S.A. The study of the effect of aluminum powders dispersion on the oxidation and kinetic characteristics // 2017. J. Phys.: Conf. Ser. 919 012022.

3. Van Devener B., Perez J. P. L., Jankovich J., Anderson S. L. Oxide-free, catalystcoated, fuel-soluble, air-stable boron nanopowder as combined combustion catalyst and high energy density fuel // Energy Fuels. 2009. Vol. 23, N 12. P. 6111–6120.

4. *Liang D., Liu J., Xiao J., et al.* Effect of metal additives on the composition and combustion characteristics of primary combustion products of B-based propellants // J. Therm. Anal. Calorim. 2015. Vol. 122. P. 497–508.

5. *Trusov B. G.* Programmaya sistema TERRA dlya modelirovaniya fazovykh i khimicheskikh ravnovesiy pri vysokikh temperaturakh // Goreniye i plazmokhimiya: III Mezhdunar. simpoz. Almaty: Izd-vo Kazakhskogo nats. un-ta, 2005. S. 52–57.

ДЕФОРМАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

К.В. Иохим, В.В. Скрипняк, В.А. Скрипняк

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

Ключевые слова: численное моделирование, деформация, напряжение, трёхосность.

Аннотация. В данной работе исследуется влияние трехосного напряжения на механическое поведение и разрушение титанового сплава Ti-5Al-2.5Sn в практически значимом диапазоне скоростей деформации от 0.1 до 1000 с⁻¹. Испытания на растяжение проводились на плоских сглаженных образцах и образцах с надрезом на сервогидравлической испытательной машине Instron VHS 40 / 50-20. Скоростная видеорегистрация проводилась камерой Phantom 711 Сатега. Поля деформаций на измерительной площади образца исследовались методом корреляции цифровых изображений (DIC). Поля напряжений и деформаций при испытаниях альфа-титанового сплава анализировались методом численного моделирования. Эволюция полей деформации в исследуемом режиме нагружения указывает на то, что в полосах локализации происходит большая пластическая деформация. Сплав разрушается за счет зарождения, роста и слияния повреждений в полосах локализованной пластической деформации, ориентированных вдоль максимальных касательных напряжений. Результаты подтверждают, что разрушение почти альфа-титановых сплавов имеет пластичное поведение при скоростях деформации от 0.1 до 1000 с⁻¹, параметре трехосности напряжений 0.33 $< \eta < 0.6$ и температуре, близкой к 295 К.

DEFORMATION AND FRACTURE OF TITANIUM ALLOYS IN A COMPLEX STRESS STATE UNDER DYNAMIC IMPACTS

K. Iokhim, V.V. Skripnyak, V.A. Skripnyak

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

Keywords: numerical simulation, deformation, stress, triaxiality.

Abstract. The present study investigates the effect of stress triaxiality on mechanical behavior and fracture of titanium alloy in a practical relevant strain rate range from 0.1 to 1000 s⁻¹. Tensile tests were carried out on flat smoothed and notched specimens using an Instron VHS 40/50-20 servo-hydraulic test machine. High-speed video registration was conducted by Phantom 711 Camera. Strain fields on the specimen gauge area were investigated by the digital image correlation method (DIC). Stress and strain fields during testing of the alpha titanium alloy were analyzed by the numerical simulation method. The evolution of strain fields at the investigated loading condition indicates that large plastic deformation occurs in localization bands. The alloy undergoes fracture governing by damage nucleation, growth, and coalescence in the localized plastic strain bands oriented along the maximum shear stresses. Results confirm that the fracture of near alpha titanium alloys has ductile behavior at strain rates from 0.1 to 1000 s⁻¹, stress triaxiality parameter 0.33 < η < 0.6, and temperature close to 295 K.

Альфа-титановый сплав Ti–5Al–2.5Sn был исследован при растяжении в диапазоне скоростей деформации от 0.1 до 1000 с⁻¹ и при комнатной температуре. Образцы были вырезаны из листа титанового сплава электроэрозионным методом. Толщина листового образца составляла 1.3 ± 0.05 мм. Образцы сплава Ti–5Al–2.5Sn имели средний размер зерна 40 мкм. Начальная калибровочная длина 0.1 мм. Плоские образцы с надрезом имели радиусы кривизны 2.5, 5 и 10 мм соответственно.

Пластический потенциал описывался с помощью модели Гурсона– Твергаарда–Нидельмана (GTN) [1, 2, 3]. Удельная теплоемкость титанового сплава Ti–5Al–2.5Sn рассчитывалась по феноменологическим соотношениям в интервале температур 293–1115 К [4, 5]

Результаты подтверждают, что разрушение альфа-титановых сплавов имеет пластичное поведение при скоростях деформации от 0.1 до 1000 с⁻¹, параметре трехосности напряжений 0.33 < η <0.6 и температуре, близкой к 295 К. Переход от пластичного к хрупкому состоянию не происходит.

Сплав подвергается разрушению за счет зарождения, роста и слияния повреждений в полосах локализованной пластической деформации, ориентированных вдоль максимальных касательных напряжений. В зоне шейки, образовавшейся при растяжении гладких образцов, угол ориентации трещин и полос локализованного сдвига близок к 45 ° к оси растяжения.

Формирование полос адиабатического сдвига в сплаве Ti-5Al-2.5Sn в исследуемых условиях нагружения не обнаружено. Это подтверждается 136

довольно высокой шероховатостью поверхностей излома. Траектория полос локализации пластических деформаций и их пересечения в зоне отрыва определяет ориентацию трещин отрыва вблизи зоны концентратора напряжений.



Рис. 1. Схема плоского образца и образца с надрезом

Результаты численного моделирования показывают, что эволюция напряжений и параметр трехосности напряжений η вблизи зоны пересечения полос сдвига влияют на накопление повреждений и формирование траектории зоны разрушения.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 20-79-00102.

Литература/References

1. *Bai Y., Wierzbicki T.* A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence, Int. J. Plast. 2008, *24*, 1071–1096, doi:10.1016/j.ijplas.2007.09.004.

2. *Neilsen K.L.; Tvergaard V.* Ductile shear failure or plug failure of spot welds modelled by modified Gurson model. Eng. Fract. Mech. 2010, 77, 1031–1047, doi:10.1016/j.engfracmech. 2010.02.031.

3. *Tvergaard V*. Study of localization in a void-sheet under stress states near pure shear. Int. J. Solids Struct. 2015, *60–61*, 28–34, doi:10.1016/j.ijsolstr.2015.08.008.

4. *Donachie M.J., Jr.* Titanium A Technical Guide, 2nd ed.; ASM: Materials Park, OH, USA, 2000; ISBN 978-0-87170-686-7.

5. Bros H.; Michel M.-L.; Castanet R. Enthalpy and heat capacity of titanium based alloys. J. Therm. Anal. 1994, 41, 7–24, doi:10.1007/bf02547007.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СПЛАВОВ Zr-Nb ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗЁРЕН ПО РАЗМЕРАМ

К.В. Иохим, Н.В. Скрипняк, Е.Г. Скрипняк

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

Ключевые слова: повреждения, зёрна, сплавы, деформация.

Аннотация. В настоящей работе методом многоуровневого компьютерного моделирования было исследовано влияние распределения зерен по размерам на механическое поведение сплавов Zr–Nb при высокоскоростном растяжении. Разработанная расчетная модель позволяет описать деформацию и разрушение сплава Zr–Nb с унимодальной и бимодальной зеренной структурой при растяжении при высоких скоростях макроскопической деформации. Резкое увеличение деформации до разрушения и плавное снижение предела текучести и прочности на разрыв сплава Zr–Nb наблюдается при увеличении объемной концентрации крупных зерен от 0 до 30%. Рациональное сочетание повышенного предела текучести и прочности на разрыв с удовлетворительной пластичностью для скоростей деформации от 100 до 1000 с⁻¹ может быть достигнута в сплаве Zr–Nb, когда отношение объема субмикронных зерен к объему крупных зерен составляет примерно 3:7.

SIMULATION OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF Zr–Nb ALLOYS AT HIGH RATE DEFORMATION DEPENDING ON THE GRAIN SIZE DISTRIBUTION

K. Iokhim, N. Skripnyak, E. Skripnyak

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

Keywords: damage, grains, allows, deformation.

Abstract. Two-level computer simulation is used to study the effect of bimodal grain size distribution on the plastic flow, damage evolution, and fracture of Zr–Nb alloys with a hexagonal close-packed crystal lattice under tension at strain rates of 100 and 1000 s⁻¹. The developed computational model allows one to describe the strain and fracture of the Zr–Nb alloy with unimodal and bimodal grain structures under tension at high macroscopic strain rates. It is shown that the damages that cause the fracture of the Zr–Nb alloy arise at the boundaries between coarse grains and volumes with an ultrafine-grained structure at high tensile strain rates. A sharp increase in the strain to fracture and a smooth decrease of the yield strength and tensile strength of the Zr–Nb alloy are observed at increasing volume concentration of large grains from 0 to 30 %. A rational combination of the increased yield strength and tensile strength with satisfactory ductility for strain rates ranging from 100 to 1000 s⁻¹ can be

achieved in the Zr–Nb alloy when the ratio of the volume of submicron grains to the volume of coarse grains is about 3:7.

В данной работе рассматривалось влияние одномодального и бимодального распределения размеров зёрен на пластическое течение и разрушение сплавов Zr–Nb. Для калибровки модели были использованы экспериментальные данные [1].

Удельный объем ультрадисперсных зерен (с размером зерен 100 нм $<d_g<1$ мкм), микроструктурных зерен (1 $<d_g<10$ мкм) и крупных зерен (10 мкм $<d_g<d_g$ max) оценивали с использованием функции плотности вероятности g (d_g) гранулометрического состава:

$$C_{UFG} = \int_{d_g^{min}}^{1\mu m} g_1(x) dx , C_{FG} = \int_{1\mu m}^{10\mu m} g_2(x) dx , C_{CG} = \int_{10\mu m}^{d_g^{max}} g_3(x) dx , (1)$$

где C_{UFG} , C_{FG} , C_{CG} – удельный объем ульрамелких зерен (C_{UFG}), мелких (C_{FG}) и крупных зерен (C_{CG}); g_1 , g_2 , g_3 – функции плотности вероятности ульрамелких зерен (C_{UFG}), мелких (C_{FG}) и крупных зерен (C_{CG}), соответственно. Влияние повреждения на напряжение течения было учтено с использованием модели Гурсона–Твергаарда [2, 3, 4]:

$$(\sigma_{eq}^{2} / \sigma_{s}^{2}) + 2q_{1}f^{*}\cosh(-q_{2}p/2\sigma_{s}) - 1 - q_{3}(f^{*})^{2} = 0, \qquad (2)$$

где σ_s – предел текучести, а q_1 , q_2 и q_3 – параметры модели; p – давление; f^* – параметр поврежденности. Модель Нидлемана была использована для описания кинетики роста повреждений [5].



Рис. 1. Схема граничных условий

Относительный объем ультрамелких и крупных зерен в представительном объеме Zr–Nb сплава определяли в соответствии с функцией плотности вероятности распределения зерен по размерам. На рис. 1 показана 3Dмодель представительного объема (RVE) из Zr–Nb сплава с бимодальным распределением зерен по размерам. Использовали RVE с размерами 14х8х1 (мкм).

$$u_{x} (x_{k}, t) = 0, x_{k} \in S_{1}$$

$$u_{x} (x_{k}, t) = v_{x}, x_{k} \in S_{2}$$

$$\sigma_{22} = 0, x_{k} \in S_{3}, x_{k} \in S_{4}$$

$$u_{z} = 0, x_{k} \in S_{5}, x_{k} \in S_{6}$$

$$u_{k}^{A} - u_{k}^{B} = 0, \sigma_{n}^{A} = -\sigma_{n}^{B}, k = 1, 2, 3, x_{k} \in S_{7}$$
(3)

Вычислительная модель использует теоретические основы механики континуального повреждения. Система уравнений включает в себя: уравнения сохранения, кинематические отношения, определяющее уравнение, уравнение состояния, уравнение релаксации для девиатора тензора напряжений.

Результаты компьютерного моделирования показали, что зарождение повреждений в сплавах с бимодальным распределением зерен по размерам происходит в полосах сдвига и зонах их пересечения. Повреждение возникает на границе между крупнозернистой и ультрамелкозернистой структурами.

Таким образом, компьютерное моделирование может быть использовано для оценки влияния гранулометрического состава на динамическую прочность и пластичность сплавов.

Локализация пластического течения в ГПУ-сплавах с бимодальным распределением зерен по размерам при растяжении при высоких скоростях деформации зависит от соотношения объемных концентраций мелких и крупных зерен. В результате напряжение до разрушения ГПУ-сплавов с бимодальным распределением зерен по размерам нелинейно изменяется со скоростью растяжения в диапазоне от 0.001 до 1000 1/с.

Динамическая пластичность сплавов с бимодальным гранулометрическим составом увеличивается, когда удельный объем крупных зерен превышает 30%.

Эволюция полей деформаций в исследуемых условиях нагружения указывает на то, что в зонах локализации происходит большая пластическая деформация. Наличие четко определенных полос локализации деформации является свидетельством интенсивного деформационного упрочнения в Zr–Nb, происходящего на мезоскопическом уровне. Это явление приводит к значительной неоднородности в полях напряжений и деформаций. Поэтому поверхность разрушения имеет сложный рельеф не только изза дискретизации сетки объема материала при моделировании. На основании результатов испытаний на растяжение можно определить параметры конститутивной модели и модели разрушения. Основную модель и модель разрушения были подтверждены численным моделированием испытаний на растяжение.

Результаты, полученные в данной работе, могут быть полезны для модернизации инструментов и технологий резки и сверления Zr–Nb. Вычислительная модель может быть использована для анализа механического поведения материала и конструкций, полученных при селективном лазерном плавлении проволоки и порошков Zr–Nb.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 18-71-00117.

Литература/References

1. *Sharkeev Y.P., Vavilov V.P., Skripnyak V.A. et al.* Research on the processes of deformation and failure in coarse- and ultrafine-grain states of Zr–1Nb alloys by digital image correlation and infrared thermography // Materials Science and Engineering: A. 2020 Vol. 784. Art. 139203. DOI: 10.1016/j.msea.2020.139203.

2. *Neilsen K.L., Tvergaard V.* Ductile shear failure or plug failure of spot welds modelled by modified Gurson model // Eng. Fract. Mech. 2010. Vol. 77. P. 1031–1047. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2010.02.031.

3. *Tvergaard V*. Study of localization in a void-sheet under stress states near pure shear // Int. J. Solids Struct. 2015. Vol. 75–76. P. 134–142. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2015.08.008.

4. *Behera A.N., Chaudhuri A., Kapoor R., Chakravartty J.K., Suwas S.* High temperature deformation behavior of Nb–1 wt. % Zr alloy // Materials and Design. 2016. Vol. 92. P. 750–759. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.12.077.

5. *Wang Y.M., Chen M.W., Zhou F.H., Ma E.* High tensile ductility in a nanostructured metal // Nature. 2002. Vol. 419. P. 912–5. DOI: 10.1038/nature01133.

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД ОЦЕНКИ СТРУКТУРЫ И ЭФФЕКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЕКАЕМОЙ КЕРАМИКИ

В.Н. Лейцин¹, А.О. Товпинец¹, М.А. Дмитриева¹, С.В. Пономарев²

¹ Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия ² Национальный исследовательский Томский государственный университет», Россия E-mail: vleitsin@kantiana.ru

Ключевые слова: компьютерное моделирование, синтез и спекание, полифракционные реагирующие порошковые материалы.

Аннотация. Представленный подход компьютерного моделирования связанных физикохимических процессов в химически реагирующих и спекаемых порошковых материалах позволяет исследовать комплекс основных технологических этапов спека-

ния керамических композитов, получаемых методами аддитивных технологий: формирование исходного порошкового слоя с заданной дисперсией концентраций и полифракционности исходных компонентов и пор, которое сопровождается возможностью удаления межслойных пор и последующей усадки; деструкцию (расплав и испарение) связующего в локальных микрообъемах спекаемого слоя; условий формирования каркаса отдельных фракций тугоплавких компонентов; фазовых переходов и процессов тепло- и массопереноса; кинетики спекания и химических превращений компонентов. Изучены определяющие факторы формирования структуры спекаемой керамики, исходный компакт которой наращивается послойно. Комплексный подход позволяет проводить оценку и оптимизацию эффективных характеристик полученного материала, получить прогноз степени и анизотропии усадки, значения и характер остаточных напряжений. Компьютерное моделирование связанных процессов синтеза и спекания многокомпонентных керамик производится с модельных представлений теории структурно-неоднородных сред.

AN INTEGRATED APPROACH TO ASSESSING THE STRUCTURE AND EFFECTIVE CHARACTERISTICS OF SINTERED CERAMICS

V. Leitsin¹, A. Tovpinets¹, M. Dmitrieva¹, S. Ponomarev²

¹ Immanuel Kant Baltic Federal University, Russian Federation ² National Research Tomsk State University, Russian Federation E-mail: vleitsin@kantiana.ru

Keywords: computer simulation, synthesis and sintering, polyfractional reactive powder materials.

Abstract. The presented approach to computer modeling of related physicochemical processes in chemically reacting and sintered powder materials makes it possible to study the complex of the main technological stages of sintering ceramic composites obtained by additive technologies: the formation of an initial powder layer with a given dispersion of concentrations and polyfractionality of the initial components and pores, which is accompanied by the possibility of removing interlayer pores. and subsequent shrinkage; destruction (melt and evaporation) of the binder in local microvolumes of the sintered layer; conditions for the formation of the framework of individual fractions of refractory components; phase transitions and processes of heat and mass transfer; sintering kinetics and chemical transformations of components. The determining factors of the formation of the structure of sintered ceramics, the initial compact of which is built up layer by layer, have been studied. An integrated approach allows one to evaluate and optimize the effective characteristics of the obtained material, to obtain a forecast of the degree and anisotropy of shrinkage, the values and nature of residual stresses. Computer modeling of related processes of synthesis and sintering of multicomponent ceramics is carried out from the model concepts of the theory of structurally inhomogeneous media.

Введение. Внедрение аддитивных технологий производства керамических элементов конструкций, формируемых послойным наращиванием исходного материала с последующим спеканием, делает актуальным развитие подхода компьютерного моделирования физико-химических процессов в термомеханически нагруженных дисперсных средах с заданной дисперсией концентраций и полифракционности исходных компонентов и пор, методов прогноза структуры спекаемой керамики на всех технологических этапах, степени и анизотропии усадки, значений и характера остаточных напряжений. В низкотемпературной керамике консолидация материала обеспечивается наличием в исходной смеси легкоплавких компонентов, образующих матрицу при температуре, не превышающей температур плавления или деструкции (диссоциации) каких-либо ответственных тугоплавких компонентов исходной дисперсии. Исходные компакты низкотемпературной керамики в рамках аддитивных технологий формируются из слоев материала, в которых неоднородность размеров частиц и плотностей их укладки является некоторым технологическим параметром формирования слоев или их нанесения. К этой неоднородности следует добавить неоднородность сопряжения различных слоев и формирование межслойных интерфейсов [1]. Адекватная модельная структура исходного компакта должна отражать общую неоднородность концентраций и размеров порошковых компонентов и пор в исходных слоях и в межслойных интерфейсах. С позиций механики композиционных материалов гетерогенному материалу можно поставить в соответствие эффективную среду с периодической макроструктурой при выполнении естественных статистических ограничений усреднения. Процесс спекания [2] сопровождается и ограничивается возможностью уменьшения свободных границ частиц исходных компонентов и относительного объема пор.

Структура тугоплавких дисперсных компонентов спекаемой керамики определяется процессами упаковки. Для полидисперсных частиц возможно формирование блочных структур. Согласно результатам [3] вероятностный механизм формирования блочных структур реализуется при соотношении размеров фракций: $\sqrt{10}-\sqrt{30} \sim 3-5$. В этом случае частицы мелкой фракции при уплотнении располагаются между частицами крупной, не создавая стесненные условия упаковки.

Если на начальной стадии послойного наращивания исходного материала применялось связующее, то развиваемый комплексный подход должен включать моделирование процессов термодеструкции связующего. При этом требуется учет возможности образования твердого не возгоняемого остатка. Считается, что дисперсный остаток термодеструкции связующего формирует дополнительный тугоплавкий компонент исходной порошковой смеси.

Формирование плотной упаковки взаимодействующих частиц отдельных фракций тугоплавких компонентов, в которой каждая частица имеет некоторое число контактов с соседними тугоплавкими частицами, является одним из определяющих факторов формирования поровой структуры материала [1]. Плотные упаковки формируют каркас спекаемого тела, обеспечивающий прочность и устойчивость структуры. Но с момента формирования такого каркаса процессы уплотнения дисперсии внутри каркаса ограничиваются. На разных структурных уровнях, определяемых различными размерами фракции тугоплавких частиц, плотные упаковки формируют некоторый каркас спекаемого тела, обеспечивающий прочность и устойчивость структуры, но, с момента его окончательного формирования, ограничивающий дальнейшую консолидацию дисперсии внутри каркаса.

Термические остаточные напряжения в спеченном композиционном материале вызваны разностью коэффициентов термического расширения дисперсных компонентов и матрицы. Для оценки остаточных термических напряжений предлагается ввести в рассмотрение температурную точку перехода материала в упругое состояние [4]. В этой работе обосновано допущение о скачкообразном переходе в упругое состояние, с учетом которого можно считать, что в процессе охлаждения от температуры спекания до температурной точки перехода температурные напряжения релаксируют до пренебрежимо низкого уровня. При переходе в упругое состояние остаточные напряжения перестают релаксировать и оценка термических напряжений возможна с позиций термоупругости [5].

Методология исследования. В основе исследований лежит развитие подхода компьютерного моделирования механохимических процессов в ударно-нагруженных реагирующих порошковых материалах, способных к экзотермическим химическим превращениям, представленного в [1].

В модель физико-химических процессов добавлены новые элементы, учитывающие предварительное уплотнение (прессование) полифракционного материала; размягчение и возгонку (расплав и испарение) связующего в локальных микрообъемах спекаемого слоя; условия, как химического взаимодействия, так и спекания дисперсных компонентов; оценку структурных характеристик полученного материала на разных структурных уровнях, усадки и остаточных напряжений.

Выбор структуры представительного объема гетерогенной дискретной системы производится с модельных представлений теории структурнонеоднородных сред – теории композиционных материалов. Представительный объем исходной дисперсной смеси, сформированной аддитивной технологией, представляется ячейкой периодичности макроскопической структуры порошковой смеси и элемент межслойного интерфейса. Твердокристаллические продукты термодеструкции связующего могут являться добавкой к концентрации тугоплавкого компонента в исходном компакте. На этой стадии компьютерного моделирования фиксируется структура и распределение компонентов модифицированной модельной ячейки периодичности.

В общем случае модельная структура спеченного композиционного материала представляется непрерывной фазой, наполненной набором дискретных фаз – включений различной формы из тугоплавких компонентов
исходной смеси, компонентов, сформированных в процессе химических превращений и твердокристаллических продуктов термодеструкции связующего.

На всех этапах синтеза низкотемпературная керамика имеет не детерминированную макроскопическую структуру с определенным разбросом эффективных толщин слоев, размеров и формы керамических включений.

После удаления связующего дискретная система на основе скомпактированной смеси керамических частиц и частиц легкоплавких компонентов представляется пористым многокомпонентным порошковым телом.

Прогрев легкоплавких компонентов в волне прогрева вызывает спекание дисперсных частиц (при этом консолидация частиц сопровождается усадкой за счет уменьшения объема пор) и возможность образования расплава. Последнее приводит к конвективному тепло- и массопереносу в зоне расплава, реализующих процессы вынужденной фильтрации жидкой фазы под действием термокапилярных сил с учетом несущей способности твердофазного каркаса, определяемой, в первую очередь, адгезионной прочностью ансамбля тугоплавких керамических частиц и силами внутреннего трения. По результатам этой стадии спекания фиксируется новая структура и распределение компонентов среды.

Моделируется макроскопически плоская волна прогрева, распространяемая в пористую среду (спекаемый слой), характеризуемую эффективными детерминированными структурными и физическими параметрами на каждом микрослое (сечении). Рассматривается пошаговое термомеханическое нагружение микрослоев порошкового тела. Для каждого временного шага оцениваются возможные изменения пористости, степени фазовых переходов, степени кристаллизации и т.п. превращений каждого микрослоя.

На каждом шаге по времени в каждом микрослое пересчитывается объем ячейки периодичности, ее размеры, концентрации компонентов и пористость. Итерационное уточнение обеспечивает связанность задачи концентрационно-фазовой модификации спекаемой системы с задачами теплового баланса, макрокинетики превращений и фильтрации.

Для проверки достоверности результатов моделирования по спеканию керамики проведены лабораторные исследования реального спеченного композита, которые показали сходство с вычислительным экспериментом [1]. Показано, что для полидисперсных составов возможность формирования каркасов отдельных фракций тугоплавких компонентов является определяющим фактором формирования поровой структуры спеченной низкотемпературной керамики, а параметры исходной дисперсии определяют характеристики распределения минимальной пористости. Корректный подбор фракционного состава тугоплавкого компонента обеспечивает устойчивость исходной смеси к седиментационным процессам, достижения требуемых структурных характеристик спеченной низкотемпературной керамики.

Основные результаты и выводы. Предложенный подход исследования позволяет получить прогноз анизотропии усадки, как следствие условия сплошности эффективной среды. Развитая схема моделирования дает возможность оценить значения и характер остаточных напряжений в материале в процессе подготовки исходного компакта спекаемого образца и термодеструкции связующего. А также, проводить оценку и оптимизацию эффективных механических характеристик в спеченных образцах.

Литература

1. Leitsin V.N., Dmitrieva M.A., Tovpinets A.O., Narikovich A.S., Ivonin I.V., Ponomarev S.V., Polyushko V.A. Determining factors in the formation of low-temperature ceramics structure. // Physical Mesomechanics. 2018. T. 21. № 6. C. 529–537

2. *Скороход В.В.* Реологические основы теории спекания. Киев: Наук. думка, 1972. 152 с.

3. *Иванов В.И*. Вероятностный механизм формирования блочных структур // Доклады академии наук, 2012, т. 443, № 2. С. 176–180.

4. *Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М., Пономарев И.И.* Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах. М.: Наука, 1996. 240 с.

5. Witold Nowacki: Teoria sprężystości // Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1970. 760 p.

References

1. Leitsin V.N., Dmitrieva M.A., Tovpinets A.O., Narikovich A.S., Ivonin I.V., Ponomarev S.V., Polyushko V.A. Determining factors in the formation of low-temperature ceramics structure. // Physical Mesomechanics. 2018. T. 21. № 6. C. 529–537.

2. Skorohod V.V. Rheological bases of sintering theory (Naukova Dumka, Kiev, 1972), 152 p.

3. *Ivanov V.I.* Probabilistic mechanism of the formation of block structures. // Dokl. Akademii Nauk, 2012, volume 443, no. 2. P. 176–180.

4. Chernyshev G.N., Popov A.L., Kozintsev V.M., Ponomarev I.I. Residual stresses in deformable solids. Moscow: Nauka, 1996. 240 p.

5. Witold Nowacki: Teoria sprężystości // Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1970. 760 p.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ α-ТИТАНА С ЯВНЫМ УЧЕТОМ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

М.А. Писарев, Е.С. Емельянова

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия E-mail: pisarev@ispmc.ru

Ключевые слова: микромеханика, физическая теория пластичности, поликристаллическая структура, численное моделирование, системы скольжения.

Аннотация. Деформационное поведение поликристаллического титана численно моделируется в рамках физической теории пластичности кристаллов. На основе экспериментальных данных методом пошагового заполнения сгенерирована трехмерная модель поликристаллической структуры. Определяющие соотношения для описания деформационного поведения зерен построены в рамках физической теории пластичности кристаллов с явным учетом геометрических особенностей дислокационного скольжения по призматическим, базисным и пирамидальным системам. Краевая задача решается численно методом конечных элементов. Для тестирования корректности введенной модели и параметров проведены расчеты деформирования монокристаллов титана с различной ориентацией. Используя разработанную модель, численно исследованы вклады различных систем скольжения в деформационный отклик поликристалла.

MICROSTRUCTURE-BASED MODELING OF THE DEFORMATION BEHAVIOUR OF POLYCRYSTALLINE TITANIUM

M. Pisarev, E. Emelianova

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, Russian Federation E-mail: pisarev@ispmc.ru

Keywords: micromechanics, crystal plasticity theory, polycrystalline structure, numerical simulation, slip systems.

Abstract. The deformation behavior of polycrystalline titanium was studied by numerical simulation in the framework of crystal plasticity. Based on experimental data, a threedimensional model of the polycrystalline structure was generated by the step-by-step packing method. Constitutive equations of crystal plasticity describing the deformation behavior of grains were derived to take into account features of dislocation slip on the prismatic, basal, and pyramidal systems in hcp crystals. The boundary value problem was numerically solved by the finite element method. The model developed and its parameters were tested by calculating the elastoplastic deformation of titanium single crystals with different orientations. Using the model, the contribution of various slip systems to the deformation response of a polycrystal was numerically investigated.

Одной из ключевых проблем математического моделирования в рамках механики сплошной среды является построение моделей, реалистично описывающих деформационное поведение материалов. Известно, что свойства поликристаллического титана существенно зависят от ориентации кристаллической решетки относительно оси нагружения. В связи с этим для адекватного описания его деформационного отклика необходим учет анизотропии упруго-пластических свойств на уровне отдельных зерен. Для этого в настоящей работе построена модель деформационного поведения поликристаллического титана, в которой поведение зерен описывается в рамках физической теории пластичности кристаллов с явным учетом систем скольжения в ГПУ кристаллах. Поликристалл рассматривается как конгломерат монокристаллов с различными кристаллографическими ориентациями. Для верификации модели были проведены тестовые расчеты одноосного растяжения 12 монокристаллов титана с различными ориентациями относительно оси нагружения. Расчеты проводились в трехмерпостановке использованием кончено-элементного ной С пакета ABAQUS/Explicit. Показано, что результаты согласуются с аналитическими оценками активации систем скольжения и начальных напряжений течения, полученными из закона Шмида. Проведены оценки вкладов различных систем скольжения в пластическую деформацию поликристаллического титана. Показано, что определяющий вклад в пластическую деформацию поликристалла вносят призматические системы скольжения в зернах, благоприятно ориентированных относительно оси нагружения. Базисные системы скольжения активируются на более поздней стадии деформирования. Призматические системы скольжения активируются лишь в единичных областях, преимущественно в области тройных стыков зерен, где они играют важную роль в релаксации высокого уровня напряжений.

Авторы выражают глубокую благодарность своему научному руководителю В.А. Романовой за полезные дискуссии и ценные замечания.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00600).

Литература/References

1. *Panin V.E., Surikova N.S., Lider A.M. et al.* Multiscale Mechanism of Fatigue Fracture of Ti–6A1-4V Titanium Alloy within the Mesomechanical Space-Time-Energy Approach // Phys. Mesomech. 21, 452–463 (2018). https://doi.org/10.1134/S1029959918050090

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ AL₂O₃ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО АЛЮМИНИЯ

М.А. Селиховкин, Н.И. Кахидзе, И.А. Жуков

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

Ключевые слова: алюминий, микроструктура, деформация, оксид алюминия, скорость деформации.

Аннотация. В настоящей работе рассматривается изменение структуры и механических свойств технически чистого алюминия при добавлении в него наночастиц Al_2O_3 , введённых в составе лигатур, полученных методом ударно-волнового компактирования. Рассчитан параметр SRS при изменении скорости деформации от 0.001 до 0.1 с⁻¹. Приведены результаты исследования влияния оксида алюминия на изменение в структуре сплава, показана зависимость увеличение скорости деформации при растяжении на деформационное упрочнение.

INFLUENCE OF AL₂O₃ NANOPARTICLES ON MECHANICAL CHARACTERISTICS AND DEFORMATION BEHAVIOR OF TECHNICAL PURE ALUMINUM

M. Selikhovkin, N. Kahidze, I. Zhukov

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

Keywords: aluminum, microstructure, deformation, alumina, deformation rate.

Abstract. The change in the structure and mechanical properties of technically pure aluminum upon the addition of Al_2O_3 nanoparticles is considered. The SRS parameter is calculated when the strain rate changes from 0.001 to 0.1 s⁻¹. It identifies peculiarities of structure. Attention is paid to the role of dependence of the deformation rate.

Современные автомобилестроительные компании нацелены на снижение веса машины, используя материалы, которые имеют высокие физикомеханические показатели. Выгодно использование алюминиевых сплавов в качестве металлической основы ввиду их низкой стоимости, высоких технологических и эксплуатационных свойств. Известно, что повысить механические характеристики алюминиевых сплавов возможно с помощью легирования скандием или цирконием [1]. Однако данные добавки повышают цену сплава, с чем вызван поиск более оптимальных схем повышения механических характеристик алюминиевых сплавов.

Перспективным является метод, сочетающий в себе дисперсное упрочнение и модификацию структуры, – введение в расплав металла нанораз-

мерных керамических частиц [2]. При исследовании влияния наночастиц на структуру и свойства алюминиевых сплавов, в качестве матрицы выступают сплавы, имеющие сложный химический состав. Возникает проблема корректной оценки вклада наночастиц на структуру и деформационное поведение матрицы.

Целью работы является изучение влияния наночастиц оксида алюминия Al₂O₃ в различных концентрациях на механические свойства и структуру технически чистого алюминия.

Исходным материалом был алюминий марки A0. Модификатором являлись тугоплавкие наночастицы Al_2O_3 со средним размером 50 нм (рис. 1, *a*). При ведении наночастиц в расплав существуют проблемы, связанные с процессами агломерации и флотации. Наночастицы Al_2O_3 (5 мас. %) предварительно деагломерировались в микроразмерном порошке алюминия (95 мас. %), после чего полученная смесь подвергалась ударно-волновому компактированию в лигатуры. Были получены отливки алюминия с содержанием 0.1, 0.5, 1, 1.5 мас. % наночастиц Al_2O_3 . Методы получения исследуемых сплавов описаны в [3].

На электронном сканирующем микроскопе Tescan Vega II LMU методом EBSD получены изображения микроструктуры (рис. 1, *б*, *в*) исследуемых образцов. Средний размер зерна подсчитан методом случайных секущих. Твёрдость определялась методом Бринелля на микроскопе Olympus GX-71. На сервогидравлическом стенде INSTRON 40/50–20 проводились испытания на одноосное растяжение плоских образцов при скоростях деформации 0.001, 0.01, 0.1 с⁻¹, на основании чего получены параметры чувствительности к скорости деформации SRS.



Рис. 1. ПЭМ-изображение наночастиц оксида алюминия Al₂O₃ (*a*); Изобр. микроструктуры: исходный сплав A0 (б), A0 + 1 мас. % Al₂O₃ (*в*)

Были произведены измерения твердости, микротвёрдости и среднего значения зерна сплавов с различной концентрацией Al₂O₃. Исходя из полученных данных, твёрдость сплава увеличивается с повышением концентрации оксида алюминия. Микротвёрдость сплава растёт при повышении концентрации частиц, однако наибольшей показатель получен при содержании 1.0 мас. % Al₂O₃. Исходный сплав имеет средний размер зерна 150

264 мкм, с увеличение концентрации Al_2O_3 средний размер зерна уменьшается до 59 мкм при содержании в 1.5 мас. %.

| Концентрация | Скорость | σ _{0.2} , МПа | σ _B , | ϵ_{max} , |
|------------------------------------|-------------------------|------------------------|------------------|--------------------|
| Al ₂ O ₃ , % | деф-ии, с ⁻¹ | | МПа | % |
| 0 | 0.001 | 11 ± 3 | 46 ± 9 | 47 ± 5 |
| | 0.01 | 24 ± 5 | 74 ± 11 | 45 ± 6 |
| | 0.1 | 31 ± 6 | 79 ± 12 | 43 ± 5 |
| 0.1 | 0.001 | 19 ± 5 | 70 ± 11 | 47 ± 5 |
| | 0.01 | 26 ± 5 | 72 ± 11 | 45 ± 5 |
| | 0.1 | 33 ± 6 | 73 ± 11 | 26 ± 4 |
| 0.5 | 0.001 | 20 ± 5 | 69 ± 11 | 48 ± 6 |
| | 0.01 | 26 ± 6 | 74 ± 11 | 46 ± 5 |
| | 0.1 | 24 ± 5 | 77 ± 13 | 38 ± 5 |
| 1 | 0.001 | 18 ± 4 | 66 ± 11 | 42 ± 6 |
| | 0.01 | 28 ± 6 | 78 ± 12 | 29 ± 5 |
| | 0.1 | 36 ± 6 | 84 ± 12 | 40 ± 5 |

Таблица 1. Характеристики полученных образцов

В табл. 1 отражены данные, полученные после обработки деформационных кривых. Показано, что с повышением скорости деформации при растяжении от 0.001 до 0.1 с⁻¹ сплавы демонстрируют деформационное упрочнение. Сплавы с содержанием 0.1, 0.5 и 1 мас. % Al₂O₃, демонстрируют увеличение предела прочности с 70 до 73, 69 до 77 и с 66 до 84 МПа, предела текучести с 19 до 33, с 20 до 24 и с 18 до 36 МПа, соответственно. Данная направленность сохраняется и для исходного сплава: для предела прочности 46—79 МПа и предела текучести 11—31 МПа. Однако при увеличении скорости деформации одновременно происходит уменьшение значений максимальных деформаций. Наиболее выражено это у сплава с содержанием 0.1 мас. % Al₂O₃, показатель которого уменьшается с 48 до 38%. Стоит отметить, что наибольшее увеличение характеристик достигается у исходного сплава без наночастиц.

Определена чувствительность сплавов к изменению скорости деформации SRS. Данный параметр определяет влияние внешних нагрузок и воздействий на материал. Наименьшее значение параметра показывает более устойчивый материал к различным видам нагрузок.

Параметр SRS – наклон аппроксимирующей зависимости экспериментальных данных пластического течения, соответствующих различным скоростям деформации в двойных логарифмических координатах. Значение SRS увеличивается при большей чувствительности к характеру нагружения. Исходный сплав имеет значение 0.223, сплавы, содержащие наночастицы оксида алюминия, имеют значения в диапазоне 0.150–0.065. Следует отметить, что у алюминия, упрочнённого большими степенями пластической деформацией параметр SRS составляет 0.013. Были получены микрофотографии поверхностей разрушения сплавов после испытаний на растяжение, полученных при фрактографическом анализе изломов. Поверхности разрушения состоят из мелких ямок отрыва одинакового размера, внутри которых присутствуют микропоры. Повидимому, разрушение инициировано образованием и ростом большого количества микропор на границах микродефектов или частиц. На стенках и в основании отдельных ямок зафиксированы образования второй фазы в виде агломератов частиц Al₂O₃ размерами до 2.5 мкм.

Исследования, проведенные в данной работе, показали, что использование в качестве добавки наночастиц оксида алюминия способствует измельчению зеренной структуры чистого алюминия. Отмечено деформационное упрочнение исследуемых сплавов с повышением скорости деформации при растяжении с 0.001 до 0.1 с⁻¹. Разрушение исследуемых образцов обусловлено образованием и ростом микропор по транскристаллитному механизму.

Литература

1. Технологические основы восстановления и упрочнения деталей сельскохозяйственной техники из алюминиевых сплавов электрохимическими способами / А.И. Новиков. 1999. С. 270.

2. Tiegs T. // Handbook of Ceramic Composites. 2005. Part III. P. 307-323.

3. Исследование влияния модификатора TiB₂ на структуру и физико-механические свойства сплава системы алюминий – магний / Н.И. Кахидзе, М.Г. Хмелева, А.П. Хрусталёв, И.А. Жуков // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: тезисы докладов XIV Всерос. шк.-конф. молодых ученых. Новосибирск, 2020. С. 86–87.

References

1. *Novikov A.N.* Technological bases for the restoration and hardening of agricultural machinery parts made of aluminum alloys by electrochemical methods. 1999. P. 270.

2. Tiegs T. // Handbook of Ceramic Composites. 2005. Part III. P. 307–323.

3. *Kakhidze N. I., Khmeleva M.G., Khrustalev A.P., Zhukov I.A.* Investigation of the influence of the TiB₂ modifier on the strength and physical and mechanical properties of the alloy of the aluminum –magnesium system // Problems of mechanics: theory, experiment and new technologies: these of report XIV All-Russia. School-conf. young scientists. Novosibirsk, 2020. P. 86–87.

РОЛЬ НИЗКОМОДУЛЬНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ MWCNT/BN В ПОЛИФАЗНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТАХ

Хань Лян, И.А. Фотин, С.П. Буякова

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия E-mail: fiercehan0108@gmail.com

Ключевые слова: керамика, полифазный, цирконий, твёрдость.

Аннотация. В работе рассмотрены керамические композиты на основе диборида циркония, карбида кремния, нитрида бора и углеродных нанотрубок, исследованы свойства полученных композитов методом горячего прессования, а также проведен рентгенофазовый анализ образцов. Установлено, что добавление многостенных углеродных нанотрубок в состав исследуемых композитов приводит к увеличению их твердости. Показана возможность использования полифазной керамики путем введения вторичных фаз, препятствующих распространению трещин в хрупких материалах.

ROLE OF LOW-MODULUS MWCNT / BN INCLUSIONS IN POLYPHASE CERAMIC COMPOSITES

L. Han, I. Fotin, S. Buyakova

Scientific research institution - Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Russian Federation E-mail: fiercehan0108@gmail.com

Keywords: ceramics, polyphase, zirconium, hardness.

Abstract. In this work, ceramic composites based on zirconium diboride, silicon carbide, boron nitride, and carbon nanotubes are considered. The properties of the composites obtained by hot pressing are studied, and an X-ray phase analysis of the samples is carried out. It was found that the addition of multi-walled carbon nanotubes to the composition of the studied composites leads to an increase in their hardness. It is shown that it is possible to use polyphase ceramics by introducing secondary phases that prevent the propagation of cracks in brittle materials.

Введение. С точки зрения использования керамики в узлах трибосопряжения, особое внимание привлекают керамические композиты, в которых при относительно невысоких температурах происходит образование стеклоподобных фаз, что обеспечивает залечивание дефектов (микротрещин, микросколов), образующихся в процессе трения, и тем самым обеспечивает управление износом этих материалов и стабильность их трибохарактеристик. К числу керамик, в которых образование стеклофаз происходит в широком температурном интервале, относятся керамические композиты ZrB₂–SiC. Создание в композитах ZrB₂–SiC структурно-фазовых предпосылок к синергетическому действию диссипативных механизмов на разных уровнях структурной иерархии обеспечит устойчивость эксплуатационных характеристик при их использовании в узлах трибосопряжения.

Актуальность. Актуальной является задача разработки материалов в структурно-фазовом состоянии, обеспечивающем сохранение требуемого в высоконагруженных условиях эксплуатации комплекса трибологических характеристик. В качестве материалов трибосопряжения в последнее время особое внимание привлекают керамические композиты. В сравнении с металлическими и углеродными материалами, используемыми в трибосопряжении, отличительной особенностью керамик, является стабильность физико-механических свойств в более широком температурном интервале [1]. Между тем, применение керамических материалов не только в трибосопряжении, но и в других нагруженных элементах машин и механизмов весьма ограничено вследствие их низкой ударной вязкости.

Цель исследования данной работы – получение полифазных гетеромодульных керамических композитов ZrB₂-SiC-BN-CNT, изучение их структуры и свойств.

Материалы и методики исследований:

В качестве исходных компонентов использованы порошки ZrB₂ (средний размер частиц $\langle d \rangle = 2.9$ µм), SiC (средний размер частиц $\langle d \rangle =$ =5.5 μ м), h- BN (средний размер частиц $\langle d \rangle = 6.0 \mu$ м, и многостенные vrлеродные нанотрубки MWCNT.Порошковые смеси готовились с соотношением компонентов ZrB₂ и SiC являются основные компоненты, с добавлением BN 5 vol.% и MWCNT 1 vol.%, ZSB5(ZrB2-SiC-BN); ZSC1(ZrB2-SiC-MWCNT); ZSB₅C1(ZrB₂-SiC-BN-MWCNT). Порошки ZrB₂, SiC, BN, СNТ смешивали в планетарной мельнице. Образцы керамических композитов ZrB₂-SiC-BN-CNT были получены горячим прессованием порошковых смесей. Данные о морфологии порошковых смесей и структуре композитов были получены при помощи сканирующего электронного микроскопа TESCAN Vega 3. Анализ фазового состава исходных порошков и композитов был проведен по дифрактограммам. Твердость композитов определена при индентировании пирамиды Berkovich H_{Berk} с нагрузкой 500 мН. Основным результатами данного исследования являются результаты сравнительного анализа относительной плотности и твердости всех образцов. Плотность полученной композита ZSB₅ равно 5.37 g/cm³, ZSC1, 5.46 g/cm³, ZSB₅C1, 5.36 g/cm³. Все материалы были получены горячем прессованием. Плотность была измерена гидростатическим методом. Установлено, что компоненты с содержанием ZSC1 имеют наибольшую твердость 40.59±0.4 GPa в сравнивании с ZSB_5 и ZSB_5C1 , в связи с содержанием 1% CNT.

Результаты и обсуждение

| ruomunu r. Obonerbu vopusadob | | | | | | |
|-------------------------------|------------|----------------------------|-------------|-----------|--|--|
| Матери- | Теоретиче- | Практиче- | Относитель- | Твер- | | |
| ал ис- | ская плот- | ская плот- | ная плот- | дость | | |
| следова- | ность | ность (g/cm ³) | ность | (Gpa) | | |
| ния | (g/cm^3) | | (%) | | | |
| ZSB5 | 5.48 | 5.37 | 98 | 26.44±0.3 | | |
| ZSBC1 | 5.62 | 5.46 | 97 | 40.59±0.4 | | |
| ZSB5C1 | 5.48 | 5.36 | 98 | 28.28±0.2 | | |

Таблица 1 Свойствя образиов

Показана возможность использовать полифазной керамики, путем введения вторичных фаз, препятствующих распространению трещин в хрупких материалах.

Литература/References

1. Lu Y., Zou J., Xu F., Zhang G.-J. (2018). Volatility diagram of ZrB₂–SiC–ZrC system and experimental validation / Journal of the American Ceramic Society, 101(8), 3627–3635. 2. Buyakov A.S., Mirovoy Yu.A., Buyakova S.P. Effects of Low-Modulus BN Inclusions on Properties of Y-TZP Ceramic // Inorg. Mater.: Appl. Res. 2019. Vol. 10, № 5. P. 1159–1163.

Секция 4

Баллистика и Небесная механика

Подсекция 4.1 Баллистика

Председатель:

к.ф.-м.н., Н.П. Савкина

Внешняя баллистика Внутренняя баллистика Механика жидкости и газа Газовая динамика Тепломассоперенос Прикладная аэродинамика

Session 4

Ballistics and celestial mechanics

Subsection 4.1 Ballistics

Chair:

PhD. Nadezda Savkina

External ballistics Internal ballistics Mechanics Fluid- and Aerodynamics Thermodynamics

Подсекция 4.1 БАЛЛИСТИКА

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ПРИСОЕДИНЕНОГО ЗАРЯДА ИЗ ПАСТООБРАЗНОГО ТОПЛИВА В БАЛЛИСТИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

В.А. Бураков, В.В. Буркин, А.С. Дьячковский, А.Н. Ищенко, В.З. Касимов, К.С. Рогаев, Н.М. Саморокова

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия E-mail: rogaev@ftf.tsu.ru

Ключевые слова: горение топлив, пастообразные топлива, ствольные системы, газодинамика, присоединенный заряд.

Аннотация. Проведено экспериментально-теоретическое исследование, посвященное изучению горения пастообразного топлива при использовании его в качества присоединенного заряда. В работе принято, что топливо диспергирует на частицы, которые догорают в заснарядном объеме. Для скорости диспергирования топлива рассмотрен эмпирический закон как функция ускорения метаемой сборки (снаряд+присоединенный заряд). Показан метод определения параметров этого закона как единых параметров согласования расчетных и экспериментальных данных для серии опытов с различными массами снаряда и типами порохового заряда. Проведено сравнение с известным общепринятым законом, где скорость диспергирования зависит от давления в газе.

THE RESEARCH OF THE COMBUSTION OF A TRAVELLING CHARGE MADE OF PASTE-LIKE PROPELLANT DURING A BALLISTIC EXPERIMENT

V. Burakov, V. Burkin, A. Diachkovskiy, A. Ishchenko, V. Kasimov, K. Rogaev, N. Samorokova

National Research Tomsk State University, Russian Federation E-mail: rogaev@ftf.tsu.ru

Keywords: propellants combustion, paste-like propellants, barrel systems, gas dynamics, travelling charge.

Abstract. Experimental and theoretical research was conducted which was dedicated to studying paste-like propellant combustion when the propellant is used as a travelling charge. In the work it is accepted that the propellant disperses into particles which burn out in the space behind the shot. The empirical law as an acceleration function of a throwing assembly (charge + attached charge) is considered for the propellant dispersion velocity. The method of identifying these parameters is shown as integrated parameters of matching calculating

and experimental data for the series of experiments with different charge masses and types of powder charge. The comparison with well-known conventional law is made in which the dispersion velocity depends on gas pressure.

Использование в выстреле присоединенного заряда (ПЗ) из высокоэнергетичного пастообразного топлива является одним из перспективных способов повышения дульной скорости метаемого элемента (МЭ) [1, 2]. Для эффективного и безопасного использования топлива необходимо проведение прогнозных расчетов и изучение газодинамической картины выстрела. Достоверность расчетов определяется тем, насколько точно описывается в математической модели горение топлива.

Одним из способов получения закона горения топлива – получение параметров закона диспергирования на основании баллистического экспериментов. В проведенных экспериментах использовались МЭ трех масс q == 100, 200 и 400 г и три вида порохового метательного заряда с разной толщиной горящего свода (2e) 0.22, 0.4, 0.6 мм с целью обеспечения различных условий разгона и нагрузки ПЗ. При проведении экспериментов измерялись давление в камере заряжания P(t), скорость МЭ V(t) в стволе и скорость МЭ на дульном срезе V_{Π} . Масса порохового заряда выбрана так, чтобы максимальное давление камере заряжания составляло В 230±10 МПа.

Коэффициенты в законе горения определяются как параметры согласования расчетных и экспериментальных данных при решении прямой задачи внутренней баллистики. В серии расчетов эти параметры меняются в определенном диапазоне с целью достижения максимально возможного совпадения экспериментальных и расчетных величин P_{max} и $V_{\text{д}}$, и формы кривых P(t) и V(t). В этом случае важную роль играет выбор изменяемых коэффициентов и вида исследуемой зависимости.

Для математического моделирования использовался программный комплекс, разработанный в НИИ ПММ ТГУ [3]. Он реализован на базе математической модели, основанной на общепринятых допущениях механики многофазных сред. В математической модели принято допущение, что фронт диспергирования ПЗ считается поверхностью сильного разрыва. Соответствующими условиями динамической совместности связаны параметры справа и слева от фронта. Топливо на фронте диспергирования частично превращается в газ (в данном случае 10 %), а частично распадается на частицы, которые горят в послойном режиме [3, 4].

$$U_{\rm c} = U_1 \frac{P}{P_{\rm atm}}$$

где U_1 – коэффициент, зависящий от химической природы топлива; P – давление в газе; $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, толщина горящего свода частиц считалась равной 0.3 мм.

Считаем, что ПЗ начинает гореть позже порохового заряда. Характеристикой начала диспергирования ПЗ является импульс давления на фронте горения

$$I = \int P dt$$

Данный параметр использовался как параметр согласования расчетноэкспериментальных данных.

Принято считать, что скорость диспергирования ПЗ зависит от давления в газе на фронте горения [4]. Однако в работе [5] показано, что ПЗ горит медленнее с тяжелым снарядом. Так как чем тяжелее снаряд, тем меньше перепад давления по длине ПЗ dP_s/dl при одинаковом давлении на фронте горения P_{s1} и длине ПЗ *l*, предположено существование зависимости скорости диспергирования U_s от dP_s/dl . Если считать, что плотность топлива $\rho = \text{const}$, то

$$\frac{dP_{s}}{dl} = \frac{P_{s1} - P_{s2}}{l} = \frac{(P_{s1} - P_{s2})S}{m}\rho = \frac{dV}{dt}\rho$$

где *P*_{s2} – давление на правой границе ПЗ; *S* – площадь поперечного сечения ПЗ; *m* – масса ПЗ.

То есть можно использовать зависимость скорости диспергирования от ускорения метаемой сборки МЭ+ПЗ как более удобное в данной математической модели

$$U_{s} = 0, \text{ при } I < I_{1},$$

$$U_{s} = A_{s} \frac{dV/dt}{g}, \text{ при } I \ge I_{1}.$$
(1)

где I_1 – импульс начала диспергирования ПЗ; A_s – коэффициент в законе скорости диспергирования; g – ускорение свободного падения.

В результате для всей серии опытов при коэффициенте скорости диспергирования ПЗ $A_s = 1.05$ мм/с и послойного горения частиц $U_I = 0.05$ мм/с получено практически полное совпадение расчетных и экспериментальных временных зависимостей, рассогласование расчетных и экспериментальных данных составляет не более 2 % по давлению и не более 1 % по дульной скорости. Закон диспергирования имеет универсальный характер не только при различных массах снаряда [5], но и при различный типах порохового заряда. Построив для данной серии опытов зависимость скорости диспергирования от давления (рис. 1) видим, что при одном давлении величина скорости диспергирования различна для разных типов пороха и масс MC, что свидетельствует о влиянии динамики нарастания давления на фронте горения ПЗ. Можно сделать вывод, что не существует единый закон для скорости диспергирования в зависимости от давления. Зависимость от P может быть определена и использована при одном типе порохового заряда и фиксированной массе МЭ, когда изменения давления P и ускорения dV/dt примерно пропорциональны.



Рис. 1. Зависимость скорости диспергирования ПЗ от давления в газе на фронте в опытах с МЭ массой соответственно 100, 200 и 400 г: --- порох 2e = 0.22; --- порох 2e = 0.4; --- порох 2e = 0.6

В данной работе рассмотрен закон горения и диспергирования пастообразного топлива как зависимость от ускорения метаемой сборки применимый в достаточно широком диапазоне параметров выстрела. Предложен метод определения параметров этого закона как параметров согласования расчетных и экспериментальных данных для серии опытов с различными массами МЭ и различными типами порохового заряда.

В настоящей работе использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта № 8.2.09.2018 Программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского государственного университета.

Литература

1. *Xin Lu, Yanhuang Zhou, Yonggang Yu* // Experimental and numerical investigations on traveling charge gun using liquid fuels. J. Appl. Mech. 2011. Вып. 78. № 5. С. 051002-1–051002-6.

2. *Ермолаев Б.С., А.В. Романьков Б.С., Сулимов А.А.* Баллистическое подобие для выстрелов с присоединенным зарядом // Горение и взрыв, 2019. Т. 12. № 4. С. 138–144.

3. *Хоменко Ю.П., Ищенко А.Н., Касимов В.З.* Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 256 с.

4. *Серебряков М.Е.* Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. М.: Оборонгиз, 1962. 703 с.

5. Дьячковский А.С., Ищенко А.Н., Касимов В.З., Рогаев К.С., Саморокова Н.М. Особенности диспергирования и горения пастообразного топлива в баллистических экспериментах: сб. материалов IX Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», посвященной 55-летию полета Ю.А. Гагарина, г. Томск, 21–25 сентября 2016 г. Томск, 2016. С. 157–158.

References

1. *Xin Lu, Yanhuang Zhou, Yonggang Yu.* Experimental and numerical investigations on traveling charge gun using liquid fuels. J. Appl. Mech. 2011. Vol. 78, Is. 5. P. 051002-1–051002-6.

2. *Ermolaev B.S., Roman'kov A.V., Sulimov A.A.* Ballistic similarity for gun shots with a traveling charge. Combustion and Explosion. 2019. Vol. 12. Is. 4. P. 138–144. (Rus.)

3. *Khomenko Yu.P., Ishchenko A.N. and Kasimov V.Z.* Mathematical modeling of processes in the internalballistics barrel systems. Novosibirsk: Publication of SB RAS. 1999. 256 p. (Rus.)

4. *Serebryakov M.E.* Internal ballistics of barrel systems and powder rockets. Moscow: Oborongiz. 1962. 703 p. (Rus.)

5. D'yachkovskiy A.S., *Ishchenko A.N., Kasimov V.Z., Rogaev K.S., Samorokova N.M.* Features of dispersion and combustion of paste-like propellant in ballistic experiments. Proceedings of the IX All-Russian Conference "Fundamental and Applied Problems of Modern Mechanics", Tomsk: RIAMM. P. 157–158. (Rus.)

МОДЕРНИЗАЦИЯ КЛАССИЧЕСКОГО ВЫСТРЕЛА ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТОПЛИВ И ЭЛЕКТРОТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ МЕТАНИЯ

В.В. Буркин, А.Н. Ищенко, В.З. Касимов, Н.М. Саморокова, А.Д. Сидоров

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия E-mail: aleksid92@gmail.com

Ключевые слова: баллистика, топливо, выстрел, дульная скорость.

Аннотация. Проведены модельные расчеты выстрела с присоединенным зарядом, состоящего из высокоэнергетического топлива, применительно к модельной баллистической установке малого калибра. Продемонстрирован положительный эффект применения электроразрядной плазмы в условиях выстрела с присоединенным зарядом. Определены условия заряжания для достижения максимального прироста дульной скорости.

MODERNIZING A CLASSICAL SHOT BY MEANS OF APPLYING HIGH-ENERGY PROPELLANTS AND ELECTROTHERMAL CHEMICAL TECHNOLOGY OF THROWING

V. Burkin, A. Ishchenko, V. Kasimov, N. Samorokova, A. Sidorov

National Research Tomsk State University, Russian Federation E-mail: aleksid92@gmail.com

Keywords: ballistics, propellants, shot, muzzle velocity.

Abstract. Model calculations of a scheme of shooting with a traveling charge made of high-energy propellant are conducted in reference to a model ballistic set up of a small caliber. A positive effect of applying electric discharge plasm is shown which under the conditions of shooting with a traveling charge is used. The conditions of loading are determined for reaching a maximal muzzle velocity growth.

Введение. Традиционные способы повышения дульной скорости снаряда выстрела по классической схеме заряжания не позволяют добиться значительного результата. В связи с повышением характеристик защищенности бронированных целей поиск путей для повышения скорости снаряда не утратил своей актуальности и в настоящее время. В работе представлена модернизация классического выстрела с применением нового пастообразного высокоэнергетического топлива, что позволяет увеличить суммарную массу заряда. В процессе выстрела топливо воспламеняется после инициирования пороха и работает в режиме присоединенного заряда (ПЗ). Происходит перераспределение энергии продуктов сгорания в заснарядном пространстве, растёт давление на дне снаряда. Возникает реактивный подгон снаряда в стволе [1].

Цель работы: выработка теоретических рекомендаций для модернизации выстрела по классической схеме заряжания. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: провести параметрические исследования выстрела с использованием ПЗ и ЭТХ технологии метания и определить условия, позволяющие добиться максимального повышения дульной скорости.

В работе использован теоретический подход. Исследования возможностей повышения скорости проведены при использовании программного комплекса [2]. Считалось, что топливо воспламенялось после максимума

порохового давления. Топливо и порох, имеют параметры горения, близкие к реальным. Энергетика топлива на 20% выше пороха. Базовые значения дульной скорости и максимального давления: 1160 м/с и 427.7 МПа. В серии расчетов проводилась замена части пороха топливом, располагаемым за снарядом, при сохранении насыпной плотности заряжания пороха. Результат серии расчетов дульной скорости снаряда для разных масс топлива представлен на рис. 1. При использовании 200 г топлива максимальное повышение дульной скорости снаряда составило 9.9 % (1275 м/с) по отношению к базовому выстрелу. При дальнейшем увеличении массы топлива дульная скорость снижается, что вызвано значительным снижением максимального давления. Для сохранения уровня давления базового выстрела использована электротермохимическая технология управления баллистическими параметрами выстрела (ЭТХ) путем введения дополнительной энергии в порох [3]. Уровень дополнительной энергии подбирался так, чтобы давление возрастало до базового значения. Результат серии расчетов представлен на рис. 1. Введение 38 кДж в порох позволило добиться повышения дульной скорости снаряда на 13.8% (1320 м/с).



Рис. 1. Зависимость дульной скорости снаряда от массы присоединенного заряда

Заключение. Показана теоретическая возможность модернизации классического выстрела с использованием высокоэнергетического топлива. При использовании 200 г топлива дульная скорость выросла на 9.9%. Продемонстрирован положительный эффект применения ЭТХ технологии метания. Введение 38 кДж в порох позволило поднять давление до базового значения и повысить дульную скорость снаряда на 13.8%.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0032.

Литература

1. Конвективное горение блочных зарядов из семиканальных пороховых зерен, ингибированных поливинилбутиралем / Б.С. Ермолаев [и др.] // Химическая физика, 2015. Т. 34, № 5. С. 1–11.

2. *Ищенко А*. Математическая модель и программный комплекс для теоретического исследования внутрибаллистических процессов в ствольных системах / А. Ищенко, В. Касимов. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2015. 72 с.

3. Seong Ho Kim, Kyung Seung Yang. Electrothermal-Chemical Ignition Research on 120-mm Gun in Korea // IEEE Transactions on Magnetics. 2009. Vol. 45, № 1. P. 341–346.

References

1. Convective combustion of block charges from seven-channel powder grains inhibited by polyvinyl butyral / B.S. Ermolaev [et al.] // Chemical Physics, 2015. Vol. 34, no. 5. P. 1–11.

2. *Ishchenko A*. Mathematical model and software package for theoretical research of intraballistic processes in stem systems / A. Ishchenko, V. Kasimov. Tomsk: Pub. House of Tomsk state University, 2015. 72 p.

3. Seong Ho Kim, Kyung Seung Yang. Electrothermal-Chemical Ignition Research on 120mm Gun in Korea // IEEE Transactions on Magnetics. 2009. Vol. 45, №1. P. 341–346.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА НА СВЕРХЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ С ВЫДУВОМ В ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ

Н.Р. Гимаева

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия E-mail: natalia.gimaeva@inbox.ru

Ключевые слова: математическое моделирование, сверхзвуковые течения, экспериментальное исследование, струйные органы управления, пограничный слой.

Аннотация. Летательные аппараты в форме конуса, а именно зонды, широко применяются в атмосфере Земли и других планет. Использование конусов объясняется высоким аэродинамическим качеством данных тел и умеренными тепловыми потоками к основной части их поверхности. Исследованию острых и затупленных конических тел как элементов конструкций сверхзвуковых летательных аппаратов до сих пор уделяется большое внимание. По сравнению с экспериментальным исследованием численное моделирование обтекания сложных составных тел характеризуется большим количеством данных о термодинамических параметрах обтекания. В работе представлено численное исследование динамической постановки задачи движения тела на сверхзвуковых скоростях с выдувом в пограничный слой. Скорость внешнего потока, набегающего на модель, принимала значения, соответствующие числам Маха M = 3, M = 4, M = 5 и M = 6. Начальные и граничные условия для численного решения поставленной задачи выбирались в соответствии с проведенными ранее аэродинамическими испытаниями. Проанализировано влияние теплобмена на формирование отрывов потока около исследуемого тела.

MATHEMATICAL MODELING OF DYNAMIC FLOW OVER A BODY AT SUPERSONIC SPEEDS WITH BLOWING INTO THE BOUNDARY LAYER

N. Gimayeva

National Research Tomsk State University, Russian Federation E-mail: natalia.gimaeva@inbox.ru

Keywords: mathematical modeling, supersonic flows, experimental research, jet controls, boundary layer.

Abstract. Cone-shaped aircraft, namely probes, are widely used in the atmosphere of the Earth and other planets. The usage of cones is explained by the high aerodynamic quality of these bodies and moderate heat fluxes to the main part of their surface. Researchers have paid great attention to the study of sharp and blunt conical bodies as structural elements of supersonic aircraft. The paper presents a numerical study dynamic problem of body motion at supersonic speeds with blowing into the boundary layer. The speed of the external flow incident on the model took values corresponding to the Mach numbers M = 3, M = 4, M = 5, and M = 6. The initial and boundary conditions for the numerical solution of the problem posed were selected in accordance with the aerodynamic tests carried out earlier. A qualitative and quantitative comparison of the results of solving the problem with experimental data is carried out.

Во всем мире проводятся исследования газоструйных органов управления, так как способы управления движением такого рода обладают рядом преимуществ: возможность эффективной работы систем управления при любых условиях внешней среды, быстродействие системы, возможность в любое время полета необходимое управляющее воздействие. Помимо достоинств данной системы управления существует и ряд недостатков, среди которых можно выделить следующие: время работы газоструйной системы управления ограничено из-за необходимости использования источника рабочего тела, сложность картины течения при взаимодействии набегающего потока с выдуваемой газовой струей, а также сложность предсказания формирующихся в результате этого взаимодействия сил на поверхности ЛА, вследствие зависимости от большого множества параметров.

Основой для создания более эффективной системы управления, базирующейся на газоструйном воздействии, является лучшее понимание условий, влияющих на изменение основных аэродинамических характеристик летательного аппарата.

В данной работе будет рассмотрена задача обтекания конуса с выдувом струи в нестационарной постановке. Решая задачу в нестационарной постановке можно отследить процесс движения газа, то есть отследить весь процесс формирования головной ударной волны и волны разряжения, созданной за счет газа, выдуваемого из бокового отверстия.

В рамках использования методики, предложенной в работе [1], численное решение задачи обтекания модели прямоточного воздушнореактивного двигателя сводится к классической задаче внешнего обтекания [2] тела равномерным высокоскоростным потоком с известными параметрами (M, P, T).

Для описания движения вязкой сжимаемой сплошной среды используется система нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (URANS-подход). На входе в расчетную область задавалось направление вектора скорости и его скалярное значение (в числах Маха), статическое давление и статическая температура. Выдув газа осуществлялся через отверстие диаметром 2 мм, расположенное на боковой поверхности конуса, рассматривается массовый расход выдуваемого газа в пределах 0.008–0.009 кг/с. На выходе – мягкие граничные условия. По поверхности модели – условие прилипания и непротекания. В начальный момент времени (t = 0) температура и давление во всей расчетной области соответствует атмосферным условиям T = 293.15 K, P = 101325 Па.

По результатам проверки сеточной сходимости для проведения серии расчетов была выбрана сетка с числом элементов $1.5 \cdot 10^6$. Решение задачи производилось методом конечных объемов в вычислительном комплексе Ansys Fluent [3].

Для анализа результата решения описанной выше задачи были рассмотрены поля давления, полученные при моделировании процесса обтекания конуса с выдувом струи в нестационарной постановке при скорости набегающего потока 3 Маха. При расчетном времени равном 0.08 сек происходит зарождение волны, формируемой за счет выдува (рис. 1, *a*), при времени 0.12 сек можно зафиксировать один из переходных процессов, который в дальнейшем приведет к стационарной, устойчивой форме наблюдаемой волны (0.16 сек), которая в дальнейшем начинает изменяться вверх по течению (0.24 сек), и наконец принимает окончательную форму в момент времени 0.3 сек (рис. 1, д). Также с момента времени 0.08 можно зафиксировать начало формирования небольшого фронта ударной волны, который плотно прилегает к боковым стенкам конуса, затем фронт волны начинает расти, взаимодействовать с волной разряжения, формируемой выдувом, и в момент времени 0.3 сек выходит на стационар. Данные периоды развития течения можно зафиксировать и для распределения температуры, за исключением хвостового течения, до момента времени 0.16 сек данное течение формируется симметрично, затем хвостовое течение становится асимметричным, так как в расчетах моделируется выдув через одно отверстие, расположенное в верхней части модели, стоит отметить, что прогрев носка конуса идет симметрично в каждый момент времени. Проводя аналогичный анализ полей температур, можно отметить влияние турбулентного характера течения и сопряженного теплообмена на структуру потока и распределение газодинамических параметров в потоке. Выявлено, что турбулентный характер течения и учет теплообмена приводит к формированию зон отрывов потока, идентичных обнаруженным экспериментально зонам. Отсутствие теплообмена и ламинарный режим течения затягивают момент отрыва потока, смещают соответствующие точки отрыва и присоединения [4].



Рис. 1. Поля давления:

а – фрагмент видеоряда в момент времени 0.08 сек (скорость потока M = 3); б – фрагмент видеоряда в момент времени 0.12 сек; в – фрагмент видеоряда в момент времени 0.16 сек; г – фрагмент видеоряда в момент времени 0.24 сек ком; д – фрагмент видеоряда в момент времени 0.3 сек; е – фрагмент видеоряда в момент времени 0.5 сек

Таким образом, был смоделирован весь процесс формирования головной ударной волны и волны разряжения, созданной за счет газа, выдуваемого из бокового отверстия. Также можно отметить, что турбулентный характер течения и процесс теплообмена влияют на изменения, происходящие в пограничном слое, и влияют на формирование «особых» зон течения газа

Литература

1. Маслов Е.А., Савкина Н.В., Скибина Н.П., Фарапонов В.В. Численный расчет аэродинамических и газодинамических параметров обтекания тела сверхзвуковым потоком при наличии локального вдува газа в пограничный слой // Актуальные проблемы

современной механики сплошных сред и небесной механики. 2018: VIII Всероссийская молодежная конференция, г. Томск, 26–28 ноября 2018 г. / под ред. М.Ю. Орлова. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2019. 134 с. (Труды Томского государственного университета. Серия физико-математическая. Т. 303). DOI: 10.17223. 978-5-7511-2582-0/2.

2. Звегинцев В.И. Газодинамические установки кратковременного действия. Ч. І. Установки для научных исследований. Новосибирск: Параллель, 2014. 551 с.

3. *Носатов В.В., Семенёв П.А.* Расчетно-экспериментальное исследование сверхзвукового турбулентного отрывного течения и локальной теплоотдачи в плоском канале с внезапным расширением // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э Баумана. Серия «Естественные науки». 2014. №. 1 (52).

4. Чжен П., Голубинский А.И. Отрывные течения / пер. с англ. Т. 1. М.: Мир, 1972.

References

1. *Maslov E.A., Savkina N.V., Skibina N.P., Faraponov V.V.* Numerical calculation of aerodynamic and gas-dynamic parameters of a supersonic flow around a body with local injection into the boundary layer // Works of Tomsk State University / Physical and Mathematical Series. 2019. T 78 Vol. 303: Current Issues of Continium Mechanics and Celestial Mechanics / ed. by M. Orlov. Tomsk: Tomsk State University Publishig House. P. 24–33. DOI: 10.17223. 978-5-7511-2582-0/2.

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

3. *Nosatov V.V., Semenev P.A.* Computational and experimental study of supersonic separated turbulent flow and local heat transfer in a flat channel with a sudden expansion // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya «Estestvennye nauki». 2014. №. 1 (52).

4. Chang P.K. Separation of flow. Elsevier, 2014.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА ВЕДУЩИХ ПОЯСКОВ ВНУТРИ КАНАЛА СТВОЛА

А.А. Квашнёв, А.В. Гуськов, М.С. Хребтова

Новосибирский государственный технический университет, Россия E-mail: kvashnyov.2015@stud.nstu.ru

Ключевые слова: ведущий поясок, температура, артиллерия, снаряд.

Аннотация. В работе представлены результаты исследования процесса нагрева ведущего пояска при прохождении по каналу ствола при выстреле. Существенные физические воздействия в слоях материала, прилегающих к границе контакта пары «ведущий поясок-канал ствола», приводят к возникновению интенсивных пластических деформаций, из-за чего в участках касания возникают локальные очаги плавления, которые увеличиваются по мере возрастания скорости перемещения, тем самым формируя площадь полного контакта. Кроме того, указанная пара подвергается значительному нагреву в результате фрикционного взаимодействия. В качестве объекта исследования выбран 122 мм осколочно-фугасный снаряд с медными и стальными ведущими поясками. Исследование проводится для разных длин стволов орудий. Результат исследования заключается в том, что по прохождении определенного расстояния, контактирующие с нарезами канала ствола поверхности ведущих поясков, достигают температуры плавления.

INVESTIGATION OF THE HEATING OF THE DRIVING BELTS INSIDE THE BORE

A. Kvashnev, A. Guskov, M. Khrebtova

Novosibirsk State Technical University, Russian Federation E-mail: kvashnyov.2015@stud.nstu.ru

Keywords: driving belt, temperature, artillery, shell.

Abstract. The paper summarizes the heating process study results for the driving belt inside the channel bore during shot. Significant physical influences in the layers of contact boundary materials of the pair "driving belt-barrel bore" lead to the intense plastic deformations occurrence. Appearing local melting areas increase as the speed of movement increases, thereby forming full contact area. In addition, the specified material pair is exposed to significant heating as a result of frictional interaction. As an object of research, a 122 mm high-explosive fragmentation projectile with copper and steel driving belts was selected. The study is carried out for different lengths of gun barrels. The results show that after passing a certain distance the outer surfaces of the driving belts reach the melting point.

Использование современных мощных систем артиллерийских орудий приводит к значительному увеличению скорости снаряда в связи с появлением новых пороховых зарядов. Условия, создаваемые значительным рабочим давлением пороховых газов и высокими скоростями скольжения артиллерийских снарядов внутри канала ствола, приводят к возрастанию скорости скольжения артиллерийских снарядов в канале ствола. Это обуславливает критические условия работы.

Трение пары «ведущий поясок-канал ствола» при скоростях скольжения от ста до нескольких тысяч метров в секунду представляет собой предельный случай внешнего трения [1]. Контактные температуры в области трения ведущего пояска и канала ствола могут достигать температур равных или даже превышающих температуру плавления одного из материалов трущейся пары, что вызвано интенсивным выделением тепла в области контакта. Первым источником тепла является пластическая деформация материала ведущего пояска при врезании и формировании площадок контакта. Второй источник тепла – трение сформированных площадок о профильные поверхности канала ствола, что приводит к возникновению локальных очагов плавления. По мере возрастания скорости движения снаряда внутри канала ствола очаги превращаются в оплавляемые области больших масштабов. И в итоге площадь полного контакта образуется за счет слияния областей плавления. В 1976 году R.S. Montgomery провёл испытания износа материалов ведущего пояска артиллерийского снаряда в условиях высокоскоростного скольжения [2]. Основным его предположением было то, что износ канала ствола крупнокалиберной пушки напрямую влияет на срок её службы. Монтгомери сделал вывод, что при образовании расплавленной плёнки на поверхности ведущего пояска скольжение становится смазанным, а трение можно определить гидродинамически. В этом случае износ конкретного ленточного материала определяется количеством тепла, передаваемого ему. Таким образом, из-за того, что частично расплавленный поверхностный слой удаляется, в конкретном случае указанный слой переносится частично на поверхность канала ствола, что и приводит к омеднению. Это подтверждает необходимость материала ведущего пояска с высокой температурой плавления, чтобы при процессе прохождения по каналу ствола перенос материала не происходил.

Математическую модель распределения температуры можно получить, используя теории температуры вспышки Х. Блока. Температура поверхности *T* в любой точке, перекрываемой тепловым источником, равна:

$$T = 2Q \left(\frac{t}{\pi k \rho c}\right)^{1/2} \tag{1}$$

где t – время прохождения теплового источника через рассматриваемую точку; Q – удельная мощность; k – теплопроводность; ρ – плотность; c – удельная теплоемкость.

Источником тепла является фрикционный контакт «ведущий поясокканал ствола». Мощность тепловыделения в области контакта:

$$Q = f \rho V$$

где p – удельное давление; f – коэффициент трения; V – скорость.

Температура на поверхности контакта описы

$$Q = f \rho V \tag{2}$$

Температура на поверхности контакта описывается выражением:

$$T_{\rm max} = 2\,\mu P \left(\frac{BV}{\pi k\,\rho c}\right)^{1/2} \tag{3}$$

Коэффициент трения пары «медь–сталь» на начальный момент времени принимался равным 0,165 [3,4]. Удельное давление на всем протяжении канала ствола во время выстрела постоянно. Для материала М1 типового ведущего пояска она равна 1053 °C, что соответствует температуре плавления 1083°C за вычетом температуры окружающей среды, равной 30 °C. Для стали коэффициент трения пары «сталь–сталь» на начальный момент времени принимался равным 0,0846, «температура вспышки» равна 1420 °C, что соответствует температуре плавления 1450 °C за вычетом температуры окружающей среды, равной 30 °C.



Рис. 1. Распределение зависимости температуры боевой грани от расстояния пройденного медным (*a*) и стальным (*б*) ведущим пояском

Средние контактные давления P, зависящие от точности изготовления ведущего пояска. Для меди: в случае изготовления ведущего пояска при максимальных допусках использовалось P_1 =1250 МПа, при минимальных допусках P_2 =1239 МПа. Аналогично при расчетах температуры на поверх-

ности контакта стального ВП: P_1 =641,6 МПа и P_2 =633,6 МПа соответственно.

По результатам расчетов выведены зависимости (рису. 1, *a*, *б*) распределения температуры T, °C, от длины канала ствола *l*, м.

По полученным зависимостям можно сделать следующие выводы:

 – рост температуры на поверхностном слое материала ведущего пояска как типового медного, так и нового, изготовленного из материала корпуса можно разделить на три этапа:

 наблюдается резкий рост температуры на расстоянии 0,5 м от начала пути для обоих случаев;

приповерхностный слой медного ведущего пояска достигает температуры плавления на расстоянии 0,6 м от начала пути;

– приповерхностный слой ведущего пояска, изготовленного из стали, достигает температуры плавления на расстоянии около 4 м от начала пути;

– температура рекристаллизации стального ведущего пояска нового типа достигается при 0,6 м от начала пути.

Литература

1. *Балакин В.А.* Трение и износ при высоких скоростях скольжения / В.А. Балакин. М.: Машиностроение, 1980. 136 с.

2. *Montgomery R.S.* Surface Melting of Rotating Bands / R.S. Montgomery // Wear. 1976. Vol. 38. P. 235–243.

3. *Guskov A.V.* Experimental studies of the physical process for forming the profile of a friction unit in a ballistic installation / A.V. Guskov, M.A. Kormushkin, K.E. Milevskii // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 919. Art. 012011 (7 p.).

4. *Малинин Н.Н.* Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н. Малинин. М.: Машиностроение, 1975. 400 с.

5. Дель Г.Д. Связь между напряжениями, твердостью и пластической деформацией при повышенных температурах / Г.Д. Дель, Ф.Х. Томилов // Известия АН СССР. Металлы. 1970. № 1. С. 144–149.

References

1. Balakin, V.A. Treniye i iznos pri vysokikh skorostyakh skol'zheniya (Moskva: Mashi-nostroyeniye, 1980), 136 p.

2. Montgomery R. S. Surface Melting of Rotating Bands (Wear, Vol. 38, 1976). P. 235–243.

3. *Guskov A.V., Kormushkin M.A., Milevskii K.E.* Experimental studies of the physical process for forming the profile of a friction unit in a ballistic installation (Journal of Physics: Conference Series. Vol. 919, 2017), 7 p.

4. *Malinin N.N.* Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti (Moskva: Mashinostroyeniye, 1975), 400 p.

5. *Del'*, *G.D.*, *Tomilov F.K.H.* Svyaz' mezhdu napryazheniyami, tverdost'yu i plasticheskoy deformatsiyey pri povyshennykh temperaturakh (Izvestiya AN SSSR. Metally, 1970). P. 144–149.

УЧЕТ ВОЗМУЩАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА В АЛГОРИТМАХ УПРАВЛЕНИЯ СТРЕЛЬБОЙ

С.А. Королев¹, А.М. Липанов^{1,2}, И.Г. Русяк¹

¹Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, Россия ²Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Россия E-mail: stkj@mail.ru

Ключевые слова: внешняя баллистика, вертолет, несущий винт, точность стрельбы, нейронная сеть.

Аннотация. Работа посвящена разработке математического аппарата и алгоритма учета возмущающего действия воздушного потока несущего винта в прицельных системах вертолета с целью повышения точности стрельбы снарядами и неуправляемыми ракетами. Реализована методика моделирования воздушного потока несущего винта на основе численного решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье– Стокса и *k*–є модели турбулентности. Полученные распределения скорости воздушного потока используются при решении задачи расчета траектории движения снарядов и ракет. С помощью разработанного программного комплекса моделирования стрельбы с подвижного носителя (вертолета) проведены исследования влияния воздушного потока несущего винта на отклонение траекторий снарядов и ракет. На основе созданной базы данных вычислительных экспериментов с использованием нейронных сетей и деревьев решений построены аппроксимирующие модели, позволяющие учесть влияние несущего винта в алгоритмах управления стрельбой.

TAKING INTO ACCOUNT THE DISTURBING EFFECT OF THE HELICOPTER MAIN ROTOR AIR FLOW IN THE FIRE CONTROL ALGORITHMS

S. Korolev¹, A. Lipanov^{1,2}, I. Rusyak¹

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russian Federation ²Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Federation E-mail: stkj@mail.ru

Keywords: external ballistics, helicopter, main rotor, firing accuracy, neural network.

Abstract. The work is devoted to the development of a mathematical models and an algorithm for accounting for the disturbing effect of the air flow of the main rotor in the aiming systems of a helicopter in order to increase the accuracy of firing projectiles and unguided rockets. The technique of modeling the air flow of the main rotor based on the numerical solution of the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations and the k- ϵ turbulence model is implemented. The obtained distributions of the air flow velocity are used to solve the problem of calculating the trajectory of projectiles and rockets. Using the developed software complex for simulating firing from a mobile carrier (helicopter), studies of the influence of the main rotor air flow on the deviation of the trajectories of projectiles and rockets were car-

ried out. On the basis of the created database of computational experiments with the use of neural networks and decision trees, approximating models are constructed that allow taking into account the influence of the main rotor in the firing control algorithms.

При стрельбе с вертолета необходимо учитывать множество факторов, влияющих на точность стрельбы: механические, связанные с движением и вибрациями вертолета; аэродинамические, вызванные влиянием воздушных потоков, создаваемых вертолетом при движении [1]. Одним из основных аэродинамических факторов, влияющим на стрельбу с вертолета, является воздушный поток, создаваемый несущим винтом.

Для исследования влияния несущего винта на траекторию движения снарядов и ракет проводилось численное моделирование воздушного потока, создаваемого несущим винтом вертолета. Применен подход, основанный на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса с использованием k- ε модели турбулентности. Методика численного решения задачи реализована в системе ANSYS Fluent.

На основе трехмерной модели корпуса вертолета, строилась геометрия расчетной области, представляющая собой прямоугольный объем, включающий корпус вертолета и плоскость несущего винта. Расчетная область разбивалась на несколько частей, в каждой из которой задавались различные параметры расчетной сетки. В областях со сложной геометрией строилась тетраэдральная конечно-объемная сетка методом объемной триангуляции. В областях с регулярной геометрией строилась прямоугольная сетка. Для обеспечения сеточной сходимости проводилось измельчение сетки в областях с высокими градиентами параметров.

Расчетные исследования показывают, что для несущих винтов, имеющих более трех лопастей, поле создаваемых индуктивных скоростей, слабо зависит от числа лопастей и их количество практически не сказывается на форме струи [2]. Поэтому в соответствии с дисковой теорией несущего винта рассматривается осредненное монотонное распределение скорости в плоскости несущего винта. Распределение индуктивной скорости задается в виде комбинации двух характерных видов распределений индуктивной скорости: при вертикальном полете и горизонтальном полете с максимальной скоростью, в зависимости от скорости движения вертолета [3].

По результатам моделирования воздушного потока от несущего винта вертолета определяется распределение индуктивной скорости в области расположения вооружения (рис. 1). Полученные распределения скорости воздушного потока затем используются при решении задачи расчета траектории движения снарядов и ракет [4].



Рис. 1. Распределение вертикальной компоненты индуктивной скорости v_y^{HB} на различном расстоянии *у* от плоскости винта по высоте: *а* – в продольной плоскости *Оху*; *б* – в поперечной плоскости *Оуz*

Результаты численных исследований показали, что существенное влияние воздушный поток от несущего винта вертолета оказывает на движение ракет. Воздушный поток, создаваемый несущим винтом, действуя на ракету на начальном участке траектории, приводит к значительному возрастанию амплитуды угла атаки. Это, в свою очередь, приводит к изменению направления вектора тяги и отклонению ракеты от заданной траектории.

Отклонения ракет от точки прицеливания, вызванные влиянием струи несущего винта вертолета, зависят от целого ряда факторов: координаты подвижного носителя $\mathbf{P}_0 = (X_0, Y_0, Z_0)$ и точки прицеливания $\mathbf{P}_u = (X_u, Y_u, Z_u)$; углы ориентации вертолета $(\Psi^{\Pi H}, \Psi^{\Pi H}, \theta^{\Pi H})$, составляющие линейной $\mathbf{V}^{\Pi H} = (V_x^{\Pi H}, V_y^{\Pi H}, V_z^{\Pi H})$ и угловой $\boldsymbol{\omega}^{\Pi H} = (\omega_x^{\Pi H}, \omega_y^{\Pi H}, \omega_z^{\Pi H})$ скоростей; параметры вооружения, метеорологические и геофизические данные.

Для определения поправок к углам наведения на цель (поправка по углу тангажа $\Delta \theta^{\text{тн}}$, поправка по углу рыскания $\Delta \psi^{\text{тн}}$) строятся аппроксимирующие модели различного типа. В работе решение задачи основано на методах аппроксимации данных с использованием нейронных сетей, деревьев решений и генетических алгоритмов [5]. Такой подход является более универсальным и позволяет строить аппроксимации для любого вида зависимостей и большого количества входных и выходных параметров.

Используя алгоритм численного решения прямой задачи внешней баллистики, создается база данных вычислительных экспериментов:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x}^{h} \\ \mathbf{q}^{h} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{0}, Y_{0}, Z_{0}, X_{u}, Y_{u}, Z_{u}, \boldsymbol{\varphi}^{nH}, \boldsymbol{\psi}^{nH}, \boldsymbol{\theta}^{nH}, V_{x}^{nH}, V_{y}^{nH}, V_{z}^{nH}, \boldsymbol{\omega}_{x}^{nH}, \boldsymbol{\omega}_{y}^{nH}, \boldsymbol{\omega}_{z}^{nH} \\ \Delta \boldsymbol{\psi}^{nH}, \Delta \boldsymbol{\theta}^{nH} \end{pmatrix}, \ h = \overline{\mathbf{1}, H} ,$$

где *H* – объем выборки. На основе созданной базы данных вычислительных экспериментов строится аппроксимирующая модель в виде многослойной нейронной сети или нечеткого дерева решений.

Аппроксимационный метод учета возмущающего действия несущего винта вертолета, реализованный с помощью многослойной нейронной сети или деревьев решений, обеспечивает простой и быстрый алгоритм решения обратной задачи внешней баллистики, не приводящий к повышению технических требований к программным и аппаратным средствам систем управления стрельбой.

Литература

1. Королев С.А., Русяк И.Г., Суфиянов В.Г. Исследование влияния возмущающих факторов на траекторию движения снарядов и ракет при стрельбе с подвижного носителя // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2017. № 11-3. С. 23–33.

2. Шайдаков В.И. Дисковая вихревая теория несущего винта вертолета в режиме осевой обдувки с учетом нелинейности вихревого следа // Вестник МАИ. 2010. Т. 17. № 5. С. 49–56.

3. *Браверман А.С., Вайнтруб А.П.* Динамика вертолета. Предельные режимы полета. М.: Машиностроение, 1988. 280 с.

4. Королев С.А., Липанов А.М., Русяк И.Г. К вопросу о точности решения прямой задачи внешней баллистики // Вестник Томского гос. ун-та. Математика и механика. 2017. № 47. С. 63–74.

5. *Тененев В.А., Якимович Б.А.* Генетические алгоритмы в моделировании систем. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2010. 308 с.

References

1. *Korolev S.A., Rusyak I.G., Sufiyanov V.G.* Reseach the influence of disturbing factors on the trajectory of projectiles and rockets shooting from moving carrier // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2017. No. 11-3. P. 23–33. (in Rus.)

2. *Shaidakov V.I.* Diskovaya vikhrevaya teoriya nesushchego vinta vertoleta v rezhime osevoy obduvki s uchetom nelineynosti vikhrevogo sleda // Vestnik MAI. 2010. Vol. 17. No. 5. P. 49–56. (in Rus.)

3. *Braverman A.S., Vayntrub A.P.* Dinamika vertoleta. Predel'nyye rezhimy poleta. M.: Mashinostroyeniye, 1988. 280 p. (in Rus.)

4. *Korolev S.A., Lipanov A.M., Rusyak I.G.* On the issue of accuracy of the solution of the direct problem of external ballistics // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta: Matematika i mehanika. 2017. No. 47. P. 63–74. (in Rus.)

5. *Tenenev V.A., Yakimovich B.A.* Geneticheskiye algoritmy v modelirovanii sistem. Izhevsk: Izdatel'stvo IzhGTU, 2010. 308 p. (in Rus.)

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОПЛАЗМЕННОГО УСТРОЙСТВА С МНОГООЧАГОВЫМ РЕЖИМОМ ЗАЖИГАНИЯ ПОРОХОВЫХ ЗАРЯДОВ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Е.Ю. Степанов, А.Н. Ищенко, В.В. Буркин, А.С. Дьячковский, Л.В. Корольков, А.Ю. Саммель, А.В. Чупашев

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

Ключевые слова: электроплазменное устройство, плазма, многоочаговый зажигания.

Аннотация. В настоящей работе рассмотрено применение электроразрядной плазмы в задачах инициирования пороховых зарядов баллистических установок. Проведен анализ функционирования электроплазменного устройства для реализации многоочагового режима зажигания заряда баллистической установки. Приведены результаты экспериментов с применением электроплазменного устройства, изготовленного методом послойного наплавления. Показана возможность эффективного увеличения площади поверхности воздействия электроразрядной плазмы на заряд с использованием разработанного варианта электроплазменного устройства.

DEVELOPMENT OF AN ELECTROPLASMA DEVICE WITH A MULTI-FOCAL MODE OF BALLISTIC INSTALLATIONS POWDER CHARGES IGNITION

E. Stepanov, A. Ishchenko, V. Burkin, A. Diachkovskiy, L. Korolkov, A. Sammel, A. Chupashev

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

Keywords: electroplasma device, plasma, multi-focal ignition.

Abstract: An electroplasma device functioning analysis for implementing the multi-focal mode of ballistic installation charge ignition is carried out. Results of experiments using the electroplasma device made by layer-by-layer deposition are presented. The possibility of effectively increasing the surface area of the electric-discharge plasma action on the charge using the developed version of the electroplasma device is shown.

Введение: В отличие от традиционного инициирования заряда с применением электрокапсюльной втулки в схеме с использованием электроразрядной плазмы, инициирование заряда происходит за счет воздействия высокотемпературных продуктов образующиеся в электроплазменном устройстве (ЭПУ).

Актуальность: Применение электроразрядной плазмы для инициирования пороховых зарядов баллистических установок [1, 2] позволяет эффективно «управлять» периодом зажигания зарядов в широком диапазоне их начальных температур [3]. К наиболее значимым преимуществам стоит отнести существенное снижение влияния начальной температуры заряда на воспламенительный период, возможность управлять параметрами теплового воздействия на заряд и возможность организовывать многоочаговый режим зажигания заряда. Такие преимущества обусловлены двумя особенностями, характерными для электроразрядной плазмы: высоким уровнем температуры (~10⁴ K) и высоким излучающим тепловым потоком (~10⁹ BT/м²).

Цели и задачи: В данной работе рассмотрен ЭПУ типа «Флейта» этот вариант ЭПУ представляет собой металлическую трубку с радиальными отверстиями. Внутри трубки соосно располагается медный проводник, который при подаче на него напряжения от системы электропитания формирует дуговой разряд. Высокотемпературные продукты взрыва проводника и последующего дугового разряда истекают из радиальных отверстий непосредственно в заряд.

Методология: При проведении экспериментальных работ в качестве внешнего источника энергии использовался емкостной накопитель, состоящий из конденсаторов К75-40 суммарной емкостью 17,32 мФ. Зарядное напряжение накопителя составляло 400 В. Коммутация обеспечивалась применением вакуумного управляемого разрядника PBУ 47. Токи измерялись поясом Роговского (CWT-ROGOWSKI CURRENT TRANSDUCER). Напряжение на разрядном промежутке фиксировалось с помощью делителя напряжения. Изучение динамики развития и оценка продолжительности воздействия многоочагового режима работы ЭПУ осуществлялось с проведением высокоскоростной видеосъемки камерой «Phantom V711» (до 720 тыс. к/с).

Результаты: Анализ экспериментальных данных показал, что применение металлического корпуса «Флейты» приводит к шунтированию разряда на ближайшее отверстие, которое сделано в металлическом корпусе. Вследствие чего происходит локализация дугового разряда в первом сечении, и высокотемпературная плазма истекает преимущественно из отверстий, расположенных в этом сечении рис. 1, *а*.

Для избавления от шунтирования корпус «Флейты» изготавливался полностью диэлектрическим и неразборным методом послойного наплавления. Этот метод позволяет реализовать изготовление ЭПУ с необходимой внутренней геометрией в варианте 3d-печати. Разработанный вариант ЭПУ изготавливался из пластика PetG.


Рис. 1. Нарезка кадров видеосъемки функционирования ЭПУ «Флейта» изготовленного из *а* – стали; *б* – РЕТ-G пластика

Выводы: Анализ экспериментальных данных функционирования, разработанного ЭПУ показал практически равномерное истечение электроразрядной плазмы во всех сечениях ЭПУ в течении исследуемого всего временного промежутка истечения плазмы. Таким образом, разработанный и испытанный вариант ЭПУ позволяет реализовать многоочаговый режим зажигания заряда и, тем самым, увеличить площадь поверхности воздействия электроразрядной плазмы на заряд.

В настоящей работе использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта НУ 8.2.09.2018 Л Программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского государственного университета.

Литература

1. Thomas H.G., Weise G., Kruse J., Schaffers P., Haak H-K. Status and Results of R& D Program on ETC Technologies// IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, vol. 37, N 1, JANUARI 2001. P. 46–51.

2. *Kappen K., Bauder Uve H.* Calculation of Plasma Radiation Transport for Description of Propellant Ignition and Simulation of Interior Ballistics in ETC Guns // IEEE TRANSAC-TIONS ON MAGNETICS, vol. 37, № 1, JANUARI 2001. P. 169–173.

3. Барышев М.С., Бураков В.А., Буркин В.В., Ищенко А.Н., Касимов В.З., Саморокова Н.М., Хоменко Ю.П., Широков В.М. Применение плазмотрона для инициирования зарядов баллистических установок // Химическая физика и мезоскопия. 2006. Т. 8, № 1. С. 46–52.

References

1. *Thomas H.G., Weise G., Kruse J., Schaffers P., Haak H-K.* Status and Results of R&D Program on ETC Technologies// IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, vol. 37, № 1, JANUARI 2001. P. 46–51.

2. *Kappen K., Bauder Uve H.* Calculation of Plasma Radiation Transport for Description of Propellant Ignition and Simulation of Interior Ballistics in ETC Guns// IEEE TRANSAC-TIONS ON MAGNETICS, vol. 37, № 1, JANUARI 2001. P. 169–173.

3. Baryshev M.S., Burakov V.A., Burkin V.V., Ishchenko A.N., Kasimov V.Z., Samorokova N.M., Khomenko Y.P., Shirokov V.M. Primenenie plazmotrona dlya initsiirovaniya zaryadov ballisticheskikh ustanovok [The usage of plasmotron for initiating charges of ballistic set ups], Chemical physics and mezoscopy, 2006, vol. 8, no. 1. P. 46–52.

Секция 4. Баллистика и Небесная механика

Подсекция 4.2 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 4.2 Celestial mechanics

> Chairman Ph.D., Tatiana Galushina

> > Space debris, Spacecraft, Asteroids, Comets, Age-old resonances MEGNO analysis

Подсекция 4.2 НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЙ С ДВАЖДЫ ДВОЙНОЙ ТОЧНОСТЬЮ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ДВИЖЕНИЯ АСТЕРОИДОВ

А.П. Батурин

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия E-mail: alexbaturin@sibmail.com

Ключевые слова: дважды двойная точность, четверная точность, численное интегрирование, астероиды.

Аннотация. Исследуется эффективность расчетов с дважды двойной точностью, выполняемых с помощью численной библиотеки QD, при прогнозировании движения астероидов. Выполняется сравнение точности и скорости таких вычислений и вычислений, использующих стандартные числа четверной точности. Показано, что при сравнимой точности результатов вычисления с дважды двойной точностью выполняются в два раза быстрее вычислений с четверной точностью.

INVESTIGATION OF THE EFFICIENCY OF DOUBLE-DOUBLE CALCULATION IN THE PROBLEM OF ASTEROID'S MOTION SIMULATION

A. Baturin

National Research Tomsk State University, Russian Federation E-mail: alexbaturin@sibmail.com

Keywords: double-double precision, quadruple precision, numerical integration, asteroids.

Abstract. The efficiency of double-double calculations which are realized in the numerical library QD has been investigated on the example of solving the problem of asteroid's motion simulation. The comparison of the performance and the accuracy of such calculations with the ones of the quad-precision calculations has been done. It has been demonstrated that the accuracy of these two kinds of calculations is almost the same while the speed of doubledouble calculations is two times greater than the speed of quad-precision calculations.

Введение. В работе исследуется эффективность применения численной библиотеки QD (https://www. davidhbailey.com/dhbsoftware/qd-2.3.22.tar.gz), предназначенной для вычислений с дважды и четырежды двойной точностью, при прогнозировании движения астероидов, сближающихся с Землей. Эта библиотека [1] была разработана с целью обеспечения возможности расчетов с повышенной точностью на языках программирования Си и Фортран. Особенность библиотеки заключается в использовании понятия чисел дважды и четырежды двойной точности, которые хранятся в памяти компьютера соответственно в двух и четырех обычных числах двойной точности, имеющих размер 8 байт. Таким образом, число дважды двойной точности занимает 16 байт; число четырежды двойной точности – 32 байта. В библиотеке QD реализована поддержка арифметических и других операций для таких чисел, а также всех встроенных функций, входящих в стандарт языков Си и Фортран.

Библиотека QD впервые была разработана в конце 1990-х гг., когда еще не существовало компиляторов Си и Фортрана для персональных компьютеров, поддерживающих типы данных с плавающей точкой размером более 8 байт. По мере развития компиляторов языка Фортран такая поддержка появилась. Так, современные компиляторы GNU-фортран и Silverfrostфортран поддерживают числа с плавающей точкой размером 10 байт (так называемые числа расширенной точности). Кроме того, компиляторы GNU-фортран, Intel-фортран и Lahey-фортран поддерживают числа с плавающей точкой размером 16 байт (так называемые числа четверной точности). Современные компиляторы языка Си также позволяют использовать эти два типа чисел с плавающей точкой. Расчеты с расширенной и четверной точностью все более часто применяются в астрономической практике при моделировании движения различных космических объектов, поэтому представляет интерес сравнение эффективности использования библиотеки QD и стандартных чисел четверной точности при решении таких задач.

Библиотека QD разработана ее авторами только для Unix-подобных операционных систем, поэтому напрямую использовать эту библиотеку, например, в операционной системе Windows невозможно. Однако существует ряд эмуляторов операционной системы Linux, работающих в среде Windows, которые позволяют решить эту проблему. Автором был использован эмулятор Msys2 (https://www.msys2.org), который имитирует работу Linux таким образом, что все создаваемые в нем исполняемые файлы являются приложениями Windows.

Методика исследования. Наиболее распространенной задачей в небесной механике является численное интегрирование уравнений движения какого-либо объекта (астероида, кометы, искусственного спутника Земли) с целью получения его эфемериды, т.е. вычисления каких-либо параметров его движения на заданные моменты времени в будущем или прошлом. Оценивание точности численного интегрирования, как правило, выполняется путем сравнения результатов прямого и обратного интегрирования, выдаваемых на одни и те же моменты времени.

В качестве модельной задачи была использована задача многих (двенадцати) тел: рассматриваемого объекта (астероида) и десяти возмущающих тел (девяти планет и Луны). Уравнения движения всех этих тел, записанные в гелиоцентрической системе координат, интегрировались совместно, причем масса астероида полагалась равной нулю.

В качестве модельных объектов были использованы три астероида, сближающихся с Землей, выбранные из таблицы потенциально опасных объектов на сайте (https://cneos.jpl.nasa.gov/sentry): 2014 MR26, 2016 WN55 и 2020 UJ7. Начальные элементы орбиты астероидов были взяты с сайта Центра малых планет (https://minorplanetcenter.net). Три элемента орбиты для каждого объекта следующие: 2014 MR26 – a = 2.885 a.e., e = 0.844, $i = 10.79^{\circ}$; 2016 WN55 – a = 0.825 a.e., e = 0.323, $i = 10.48^{\circ}$; 2020 UJ7 – a = 1.034 a.e., e = 0.072, $i = 1.29^{\circ}$.

Начальные параметры движения (координаты и скорости) возмущающих тел были взяты из эфемерид больших планет и Луны DE438 (ftp://ssd.jpl.nasa.gov/pub/eph/ planets).

Для выбранных трех объектов было выполнено прямое и обратное интегрирование от начальной эпохи, расположенной недалеко от 2020 г. на интервал времени в 100 000 сут с выдачей координат и компонент скорости через каждые 50 сут. Для численного интегрирования был использован метод Эверхарта 31 порядка с постоянным шагом, равным 1 сут. По окончании интегрирования вычислялись модули разности выданных на одинаковые моменты времени векторов положения (Δr) и скорости (Δv).

Для компиляции программ был использован свободно распространяемый компилятор GNU-фортран (https://gcc.gnu.org/fortran).

Процесс прямого и обратного интегрирования для каждого объекта выполнялся в двух вариантах:

1) с использованием чисел дважды двойной точности, вводимых с помощью подключения к программе библиотеки QD;

2) с использованием стандартных чисел четверной точности, поддерживаемых компилятором GNU-фортран.

Результаты исследования. Результаты приведены на рис. 1. Кривые *1* соответствуют результатам, полученным с использованием чисел дважды двойной точности (вариант 1); кривые 2 – стандартных чисел четверной точности (вариант 2). Черные кривые соответствуют значениям Δr (a.e.), серые – значениям Δv (a.e./сут). Через *T* обозначен интервал интегрирования в одном направлении.

Как видно из рис. 1, для объекта 2014 MR26 точность интегрирования в варианте 1 примерно на 2 порядка ниже, чем в варианте 2, что является естественным результатом, так как числа дважды двойной точности содержат 32 значащих цифры в десятичной системе счисления, а числа четверной точности – 34 значащих цифры.

Для объектов 2016 WN55 и 2020 UJ7 вначале имеет место похожая картина, однако в некоторый момент (примерно через 33 000 сут для 2016 WN55 и через 57 000 сут для 2020 UJ7) происходит резкое падение

точности интегрирования, вызванное, по-видимому, тесным сближением с Землей. После этого сближения результаты оценок точности в вариантах 1 и 2 практически не различаются (кривые 1 и 2 совпадают), так как различие результатов прямого и обратного интегрирования в этих случаях становится значительно больше различия результатов использования чисел дважды двойной и четверной точности.

В табл. 1 приведено время вычислений во всех выполненных вариантах расчета, а также отношение времени вычислений в варианте 2 и 1.

| <i>Таблица 1</i> . Время вычислений | | | | | |
|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|--|--|
| Астероид | Вариант 1 | Вариант 2 | Отношение | | |
| 2014 MR26 | 927 c | 1881 c | 2.03 | | |
| 2016 WN55 | 928 c | 1895 c | 2.04 | | |
| 2020 UJ7 | 927 c | 1882 c | 2.03 | | |
| | | | | | |



Рис. 1. Сравнение результатов прямого и обратного численного интегрирования

Как видно из табл. 1, вычисления с дважды двойной точностью занимают практически ровно вдвое меньше времени, чем вычисления с четверной точностью.

Что касается вычислений с четырежды двойной точностью, то, как показали численные эксперименты автора, они занимают примерно в шесть раз больше времени, чем расчеты с дважды двойной точностью. Разрядная сетка при таких расчетах составляет 64 значащих цифры в десятичной системе счисления, что является явно избыточным в современных задачах небесной механики.

Выводы. Выполненное исследование позволяет заключить, что применение библиотеки QD, а именно ее части, обеспечивающей расчеты с дважды двойной точностью, позволяет сократить время вычислений в два раза по сравнению с использованием стандартных чисел четверной точности, поддерживаемых современными компиляторами. Точность вычислений при этом может понизиться всего на 2 порядка, что при разрядной сетке в 32- или 34-десятичных цифры практически не имеет значения.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0721-2020-0049).

Литература/References

1. Yozo Hida, Xiaoye S. Li, and David H. Bailey Quad-double arithmetic: Algorithms, implementation, and application. Technical Report LBNL-46996, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, October 2000.

НЕЛИНЕЙНОСТЬ В ОБРАТНЫХ ЗАДАЧАХ ДИНАМИКИ ВНЕШНИХ СПУТНИКОВ ЮПИТЕРА

М.А. Баньщикова, В.А. Авдюшев, Е.Е. Шмидт

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

Ключевые слова: спутники Юпитера, внутренняя нелинейность, полная нелинейность, обратная задача, спутниковая динамика.

Аннотация. В докладе представлены результаты исследования полной и внутренней нелинейностей применительно к далеким спутникам Юпитера, наблюдавшихся на короткой дуге. Выявлена взаимосвязь между нелинейностью и условиями спутниковых наблюдений. В частности, показано, что полная нелинейность очень сильная, когда период наблюдений меньше 0.1 от орбитального периода, в то время как внутренняя нелинейность достаточно слабая для всех спутников, что указывает на возможность применения нелинейных методов для адекватного моделирования их орбитальной неопределенности.

NONLINEARITY IN INVERSE DYNAMICS PROBLEMS JUPITER'S OUTER SATELLITES

M. Banshchikova, V. Avdyushev, E. Shmidt

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

Keywords: satellites of Jupiter, intrinsic nonlinearity, total nonlinearity, inverse problems, satellite dynamics.

Abstract. The report presents the results of a study of the total and intrinsic nonlinearities as applied to the outer satellites of Jupiter observed on a short arc. The relationship between the nonlinearities and the conditions of satellite observations is revealed. In particular, it is shown that the total nonlinearity is very strong when the observation period is less than 0.1 of the orbital period, while the intrinsic nonlinearity is weak enough for all satellites, which indicates the possibility of using nonlinear methods for adequate modeling of their orbital uncertainty.

Большинство внешних спутников Юпитера было открыто в самом начале XXI столетия [1, 2]. Между тем орбиты многих из этих спутников до сих пор плохо определены вследствие скудного состава их наблюдений, несмотря на то, что со времени открытия спутников прошло уже почти два десятка лет. Для некоторых объектов орбиты определены настолько ненадежно, что даже не совсем ясно, являются ли они вообще спутниками или это астероиды, временно захваченные Юпитером. Ответить на этот вопрос можно только исходя из вероятностных оценок, полученных на основе стохастического моделирования орбитальной неопределенности [3, 4].

Поскольку для новых представителей спутниковой системы Юпитера неопределенность в орбитальных параметрах достаточно большая, подход к ее моделированию весьма деликатный. Исследователь становится перед выбором метода стохастического моделирования: линейного или нелинейного [3–5]. Линейные методы очень простые, но грубые при сильной нелинейности обратной задачи, которая как раз сопряжена с большой орбитальной неопределенностью. Все нелинейные методы очень сложные и трудоемкие, но более точные. При этом всегда нужно иметь в виду, что адекватность нелинейных методов определяется так называемой внутренней нелинейностью [3–5]. В своей работе мы поставили перед собой цель оценить нелинейность в обратных задачах орбитальной динамики для всех новых внешних спутников.

Чтобы выявить взаимосвязь между нелинейностью и условиями спутниковых наблюдений, мы предварительно исследовали проблему на примере нормализованной круговой задачи двух тел. Мы оценивали полную \mathfrak{E} и внутреннюю \mathfrak{E} нелинейности [3] при четырех наблюдениях, распределенных на дугах $\Delta t / T = 10^{-1}$ и 10^{-2} , где Δt – временной интервал наблюдения, а $T = 2\pi$ – период обращения спутника. На рис. 1 показаны значения показателей нелинейности в зависимости от начального положения объекта, определяемого аномалией φ , и от угла между картиной и орбитальной плоскостями ψ . Заливка полутонами серого цвета применяется только к уровням показателей, превышающих критическое значение 10^{-3} [3].



в модельной задаче

Как видно из рисунка, внутренняя нелинейность при всех обстоятельствах наблюдений довольно слабая, что является практическим основанием для применения нелинейных методов стохастического моделирования при исследовании орбитальной неопределенности. Полная нелинейность значительно сильнее, и ее показатели в большинстве случаев превышают критическое значение. Слабая полная нелинейность имеет место лишь при определенных обстоятельствах, когда $\Delta t / T = 10^{-1}$. На рисунке им соответствуют угловые величины около оврага, проходящего через значения $\varphi = 30^{\circ} \& \psi = 75^{\circ}$, $\varphi = 45^{\circ} \& \psi = 45^{\circ}$, $\varphi = 75^{\circ} \& \psi = 30^{\circ}$.

В табл. 1 представлены значения показателей нелинейности для далеких спутников Юпитера, у которых наблюдения покрывают дугу орбиты меньше одного оборота спутника. Здесь *N* – количество моментов наблюдений. Спутники отсортированы по возрастанию значения полной нели-

нейности æ. Светло-серым цветом отмечены спутники с умеренной нелинейностью, а темно-серым – с сильной нелинейностью.

| Спутник | æ | $\hat{\mathbf{a}}$ | N | $\Delta t \ / \ {\rm T}$ | Спутник | æ | $\hat{\mathbf{a}}$ | N | $\Delta t \ / \ {\rm T}$ |
|----------|--------|--------------------|----|--------------------------|----------|--------|--------------------|----|--------------------------|
| Apxe | 0.0003 | 0.0000 | 31 | 0.64 | S2003J17 | 0.0214 | 0.0006 | 12 | 0.07 |
| Автоное | 0.0004 | 0.0000 | 33 | 0.96 | S2003J15 | 0.0218 | 0.0004 | 12 | 0.08 |
| S2003J13 | 0.0011 | 0.0002 | 22 | 0.61 | S2003J11 | 0.0279 | 0.0001 | 17 | 0.43 |
| Спондее | 0.0021 | 0.0001 | 16 | 0.59 | S2003J23 | 0.0317 | 0.0011 | 16 | 0.04 |
| Ортозие | 0.0031 | 0.0001 | 23 | 0.75 | Пазифее | 0.0462 | 0.0036 | 17 | 0.62 |
| Эванте | 0.0035 | 0.0002 | 21 | 0.72 | S2003J18 | 0.0563 | 0.0053 | 18 | 0.13 |
| S2003J16 | 0.0036 | 0.0000 | 12 | 0.09 | S2003J09 | 0.1600 | 0.0035 | 17 | 0.06 |
| S2003J20 | 0.0036 | 0.0001 | 37 | 0.76 | S2003J14 | 0.1800 | 0.0056 | 11 | 0.06 |
| S2003J07 | 0.0046 | 0.0001 | 32 | 0.69 | S2003J05 | 0.5800 | 0.0037 | 16 | 0.04 |
| Гермиппе | 0.0085 | 0.0002 | 30 | 0.83 | S2003J03 | 0.7300 | 0.0095 | 15 | 0.05 |
| S2003J06 | 0.0117 | 0.0014 | 33 | 0.51 | S2003J12 | 0.8100 | 0.0018 | 11 | 0.05 |
| Eukelade | 0.0143 | 0.0012 | 18 | 0.11 | S2003J02 | 0.9000 | 0.0114 | 8 | 0.03 |
| S2003J19 | 0.0178 | 0.0001 | 10 | 0.07 | S2003J10 | 0.9100 | 0.0047 | 11 | 0.04 |
| S2003J22 | 0.0211 | 0.0001 | 22 | 0.77 | S2003J04 | 1 | 0.0008 | 11 | 0.05 |

Таблица 1. Показатели нелинейности для далеких спутников Юпитера

Из таблицы видно, что полная нелинейность, как и в модельной задаче, очень сильная, когда период наблюдений меньше 0.1 от орбитального периода. В то же время внутренняя нелинейность достаточно слабая для всех спутников, что указывает на возможность применения нелинейных методов для адекватного моделирования их орбитальной неопределенности.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0721-2020-0049).

Литература

1. *Jacobson R.A.* The Orbits of the Outer Jovian Satellites // Astron. J. 2000. Vol. 120. I. 5. P. 2679–2686.

2. Sheppard S.S., Jewitt D.C., Kleyna J., MarsdenB.G., Jacobson R.A. Satellites of Jupiter // IAU Circ., 7900. Vol. 1. 2002.

3. *Авдюшев В.А., Сюсина О.М. Тамаров В.А.* Нелинейность в обратных задачах астероидной динамики // Астрон. вестн. 2021. Т. 55. № 1. С. 1–13.

4. *Desmars J., Arlot S., Arlot J.-E., Lainey V., Vienne A.* Estimating the accuracy of satellite ephemerides using the bootstrap method // Astron. Astrophys. 2009. Vol. 62. P. 321–330.

5. Bates D.M., Watts D.G. Nonlinear Regression Analysis and Its Applications. John Wiley & Sons Inc. // John Wiley & Sons Inc. 1988. 365 p.

References

1. *Jacobson R.A.* The Orbits of the Outer Jovian Satellites // Astron. J. 2000. Vol. 120. I. 5. P. 2679–2686.

2. Sheppard S.S., Jewitt D.C., Kleyna J., MarsdenB.G., Jacobson R.A. Satellites of Jupiter // IAU Circ., 7900. Vol. 1. 2002.

3. Avdyushev V.A., Syusina O.M. Tamarov V.A. Nonlinearity in the inverse problems of asteroid dynamics // Astronomicheskii Vestnik. 2021. Vol. 55. № 1. P. 1–13. (Rus.)

4. *Desmars J., Arlot S., Arlot J.-E., Lainey V., Vienne A.* Estimating the accuracy of satellite ephemerides using the bootstrap method // Astron. Astrophys. 2009. Vol. 62. P. 321–330.

5. Bates D.M., Watts D.G. Nonlinear Regression Analysis and Its Applications. John Wiley & Sons Inc. // John Wiley & Sons Inc. 1988. 365 p.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОБЪЕКТА 84414 ИЗ КАТАЛОГА NORAD

Е.В. Блинкова, Т.В. Бордовицына

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия E-mail: zbizk322@mail.ru

Ключевые слова: динамика околоземных объектов, вековые апсидальнонодальные резонансы, световое давление, MEGNO-анализ.

Аннотация. В работе представлены результаты исследования динамики объекта 84414 из каталога NORAD. Объект интересен тем, что на него действует большое количество вековых резонансов, в том числе резонансы со средним движением возмущающего тела. Рассмотрена орбитальная эволюция объекта на интервале 100 лет, выявлены все апсидально-нодальные резонансы и резонансы со средним движением Луны и Солнца. Исследованы особенности динамики объекта при различных значениях парусности. Показано, что объект обладает высокой степенью хаотизации движения, что связанно с действующим на объект световым давлением и большим количеством резонансов.

STUDY OF THE DYNAMICS OF OBJECT 84414 FROM THE NORA CATALOG

E. Blinkova, T. Bordovitsyna

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

Keywords: near-earth object dynamics, secular resonances, light pressure, MEGNO analysis.

Abstract. The paper presents the results of a study of the dynamics of object 84414 from the NORAD catalog. The object is interesting in that it is affected by a large number of secular resonances, including resonances with the average motion of the disturbing body. The orbital evolution of the object over an interval of 100 years is considered, all apsidal-nodal resonances and resonances with the mean motion of the Moon and the Sun are revealed. The features of the dynamics of the object are investigated for different values of windage. It is shown that the object has a high degree of randomization of movement, which is associated with the active objects of light and high resonance.

В работе представлены результаты исследования динамики объекта 84414 из каталога NORAD. Объект интересен тем, что на него действует большое количество вековых резонансов, в том числе резонансы со средним движением Солнца. В работе [1] высказано предположение, что вековые резонансы со средним движением Солнца способны усиливать влияние светового давления, поскольку в результате сочетания этих факторов действие силы светового давления становится резонансным.

Для выяснения особенностей динамики объекта была исследована его орбитальная эволюция на интервале 100 лет, выявлены все апсидальнонодальные резонансы и резонансы со средним движением Луны и Солнца. Исследованы особенности динамики объекта при различных значениях парусности. Результаты долговременной эволюции объекта при различных значениях парусности приведены на рис. 1. Перечень вековых резонансов, действующих на объект, приведен в табл. 1. На объект действует 14 апсидально-нодальных резонансов и 6 резонансов со средним движением Солнца.

| Тин разонананого | | | Тип | | Тип | | |
|--|--|----|---|----|---|--|--|
| № | | | резонансного | № | резонансного | | |
| | соотношения | | соотношения | | соотношения | | |
| | Апсидально-нодальные резонансы | | | | | | |
| 1 | $\left(\dot{\Omega}-\dot{\Omega}_{s}^{\prime} ight)+\dot{\omega}-\dot{\omega}_{s}^{\prime}$ | 6 | $\left(\dot{\Omega}-\dot{\Omega}_{S}'\right)+\dot{\omega}$ | 11 | $\left(\dot{\Omega}-\dot{\Omega}_{L}^{\prime} ight)$ | | |
| 2 | $\left(\dot{\Omega}-\dot{\Omega}_{L}^{\prime} ight)-\dot{\omega}+\dot{\omega}_{L}^{\prime}$ | 7 | $\left(\dot{\Omega}-\dot{\Omega}_{L}^{\prime} ight)-\dot{\omega}$ | 12 | $\dot{\omega} - \dot{\omega}'_{S,L}$ | | |
| 3 | $\left(\dot{\Omega}-\dot{\Omega}_{S}^{\prime}\right)+\dot{\omega}+\dot{\omega}_{S}^{\prime}$ | 8 | $\left(\dot{\Omega}-\dot{\Omega}_{S,L}' ight)-2\dot{\omega}$ | 13 | $\dot{\omega} + \dot{\omega}'_{S,L}$ | | |
| 4 | $\left(\dot{\Omega}-\dot{\Omega}_{S,L}'\right)-2\dot{\omega}+2\dot{\omega}_{S,L}'$ | 9 | $\left(\dot{\Omega}-\dot{\Omega}_{L}^{\prime} ight)+\dot{\omega}_{L}^{\prime}$ | 14 | ŵ | | |
| 5 | $\left(\dot{\Omega}-\dot{\Omega}_{S}'\right)-2\dot{\omega}-2\dot{\omega}_{S}'$ | 10 | $\left(\dot{\Omega}-\dot{\Omega}_{L}^{\prime} ight)+2\dot{\omega}_{L}^{\prime}$ | | | | |
| Резонансы со средним движением третьего тела | | | | | | | |
| 1 | $\overline{n}'_S + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}')$ | 3 | $\overline{n}_{S}' + \dot{\omega} + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}')$ | 5 | \overline{n}'_{S} + 2 $\dot{\omega}$ + ($\dot{\Omega}$ – $\dot{\Omega}'$) | | |
| 2 | $\overline{n}'_S - \dot{\omega} + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}')$ | 4 | $\overline{n}'_S + 2(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}')$ | 6 | $\overline{n}'_{S} - 2\dot{\omega} + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}')$ | | |

Таблица 1. Типы резонансных соотношений действующих резонансов

Из рис. 1 видно, что объект отличается высокой степенью хаотичности движения, причем, чем больше парусность объекта, тем быстрее растет MEGNO-параметр. Уже при парусности 4м²/кг, объект падает на Землю примерно за полгода.



Рис. 1. Орбитальная эволюция объекта 84414 при значениях парусности: *a* – 1м²/кг; *б* – 2 м²/кг; *в* – 3 м²/кг; *г* – 4 м²/кг; расположение графиков в кадрах: *a, б, в* (сверху вниз) наклонение, эксцентриситет, большая полуось, параметр MEGNO и интеграл Лидова–Козаи

Сохранение интеграла Лидова–Козаи и рассмотрение особенностей динамики объекта в отсутствии светового давление говорит о том, что эффект Лидова–Козаи присутствует в динамике объекта, но, повидимому, подавляется действием светового давления и других вековых резонансов. Подтвердить или опровергнуть гипотезу, высказанную в [1] на примере данного реального объекта, не представляется возможным изза присутствия в его динамике большого числа апсидально-нодальных резонансов. Исследование выполнено за счет гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-32-90095).

Литература/References

1. Alessi E.M., Alessandro G., Rossi A., Valsecchi G.B. Solar radiation pressure resonances in Low Earth Orbits // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2018. Vol. 473. № 2. P. 2407–2414.

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ОБЪЕКТОВ, ДВИЖУЩИХСЯ В ОБЛАСТЯХ LEO-MEO ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЕКОВЫХ РЕЗОНАНСОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Е.В. Блинкова, А.Г. Александрова, Т.В. Бордовицына, Н.А. Попандопуло, И.В. Томилова

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия E-mail: zbizk322@mail.ru

Ключевые слова: околоземное орбитальное пространство, области LEO-MEO, резонансная структура, хаотическое движение.

Аннотация. В работе представлены результаты исследования динамической структуры околоземного орбитального пространства в области LEO-MEO. В результате численного моделирования были выявлены вековые резонансы и построены соответствующие карты их распределения. Исследована динамическая эволюция орбит под действием вековых резонансов различных типов с использованием быстрой ляпуновской характеристики MEGNO. Несмотря на обилие резонансов, совместное влияние нескольких резонансов встречается редко и не приводит к хаотизации движения, если резонансы устойчивые.

SPECIFIC FEATURES OF THE DYNAMICS OF OBJECTS MOVING IN THE LEO-MEO REGIONS OF THE ORBITAL SPACE UNDER THE ACTION OF SECULAR RESONANCES OF DIFFERENT TYPES

E. Blinkova, A. Aleksandrova, T. Bordovitsyna, N. Popandopulo, I. Tomilova

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

Keywords: near–Earth orbital space, LEO-MEO regions, resonance structure, chaotic motion. **Abstract.** The paper presents the results of a study of the dynamic structure of the near-Earth orbital space in the LEO-MEO region. As a result of numerical modeling, secular resonances were identified and corresponding maps of their distribution were constructed. The dynamic evolution of orbits under the action of secular resonances of various types is studied using the fast Lyapunov characteristic MEGNO. Despite the abundance of resonances, the combined effect of several resonances is rare and does not lead to chaos of motion if the resonances are stable.

Исследование динамической структуры околоземного орбитального пространства является актуальной задачей, поскольку знание динамических особенностей пространства необходимо и при разработке новых спутниковых систем, и при определении областей паркинга отработавших объектов.

Целью данной работы является детальное описание структуры вековых резонансов LEO-MEO областей и исследование особенностей долговременной орбитальной динамики объектов, движущихся в этих областях. Исследование осуществляется путем численного моделирования на кластере «СКИФ Суberia» НИ ТГУ при помощи усовершенствованного программного комплекса «Численная модель движения систем ИСЗ». В процессе моделирования учитывались возмущения от гармоник геопотенциала до 10 порядка и степени, а также возмущения от Луны и Солнца. Моделирование производилось с использованием методик, изложенных в [1]. Совместно с уравнениями движения интегрировались уравнения для вычисления параметров MEGNO (Mean Exponential Growth of Nearby Orbits) [2].

Для реализации поставленной цели были решены следующие задачи:

 выявлены резонансные возмущения в рассматриваемой орбитальной области и построены соответствующие карты распределения вековых резонансов;

– проанализированы особенности динамической эволюции орбит под действием резонансов;

– исследована динамическая структура орбитального пространства с использованием быстрой ляпуновской характеристики MEGNO.

Численный эксперимент осуществлялся в диапазоне наклонений от 0 до 180 градусов и в диапазоне больших полуосей от 8000 до 26000 км. В результате численного моделирования были получены карты распределения вековых резонансов. Для примера, на рис. 1 представлена карта распределения вековых апсидально-нодальных резонансов областей LEO-MEO. Типы резонансных соотношений, действующих в данной области, приведены в табл. 1.

| N⁰ | Тип резонансного соотношения | N⁰ | Тип резонансного соотношения | No | Тип резонансного соотношения |
|----|---|----|--|----|--|
| 1 | $\left(\dot{\Omega}-\dot{\Omega}_{S,L}'\right)+\dot{\omega}-\dot{\omega}_{S,L}'$ | 8 | $\left(\dot{\Omega}-\dot{\Omega}_{S,L}'\right)-2\dot{\omega}-2\dot{\omega}_{S,L}'$ | 15 | $\left(\dot{\Omega}-\dot{\Omega}_{S,L}'\right)+2\dot{\omega}_{S,L}'$ |
| 2 | $\left(\dot{\Omega}-\dot{\Omega}'_{S,L}\right)-\dot{\omega}+\dot{\omega}'_{S,L}$ | 9 | $\left(\dot{\Omega}-\dot{\Omega}_{S,L}'\right)+\dot{\omega}$ | 16 | $\left(\dot{\Omega}-\dot{\Omega}_{S,L}'\right)-2\dot{\omega}_{S,L}'$ |
| 3 | $\left(\dot{\Omega}-\dot{\Omega}'_{S,L}\right)+\dot{\omega}+\dot{\omega}'_{S,L}$ | 10 | $\left(\dot{\Omega}-\dot{\Omega}_{S,L}' ight)-\dot{\omega}$ | 17 | $\left(\dot{\Omega}\!-\!\dot{\Omega}_{{\scriptscriptstyle S},{\scriptscriptstyle L}}' ight)$ |
| 4 | $\left(\dot{\Omega}-\dot{\Omega}'_{S,L}\right)-\dot{\omega}-\dot{\omega}'_{S,L}$ | 11 | $\left(\dot{\Omega}-\dot{\Omega}_{S,L}'\right)+2\dot{\omega}$ | 18 | $\dot{\omega} - \dot{\omega}'_{S,L}$ |
| 5 | $\left(\dot{\Omega}-\dot{\Omega}'_{S,L}\right)+2\dot{\omega}-2\dot{\omega}'_{S,L}$ | 12 | $\left(\dot{\Omega}-\dot{\Omega}_{S,L}^{\prime}\right)-2\dot{\omega}$ | 19 | $\dot{\omega} + \dot{\omega}'_{S,L}$ |
| 6 | $\left(\dot{\Omega}-\dot{\Omega}_{S,L}'\right)-2\dot{\omega}+2\dot{\omega}_{S,L}'$ | 13 | $\left(\dot{\Omega}-\dot{\Omega}_{S,L}'\right)+\dot{\omega}_{S,L}'$ | 20 | ώ |
| 7 | $\left(\dot{\Omega}-\overline{\dot{\Omega}'_{S,L}}\right)+2\dot{\omega}+2\dot{\omega}'_{S,L}$ | 14 | $\left(\dot{\Omega}-\dot{\Omega}'_{S,L}\right)-\dot{\omega}'_{S,L}$ | | |

Таблица 1. Типы резонансных соотношений низких порядков



Рис. 1. Карта распределения вековых апсидально-нодальных резонансов, связанных: *а* – с Солнцем; *б* – с Луной

Как видно из рис. 1, апсидально-нодальные резонансы, связанные с прецессией орбиты Луны более плотно покрывают рассматриваемую область орбитального пространства, чем аналогичные резонансы, связанные с прецессией орбиты Солнца, которое является отражение прецессии орбиты Земли.

Анализ динамической эволюции орбит показал, что наложение нескольких устойчивых резонансов не приводит к росту хаотизации движения. Данная область интересна тем, что здесь впервые начинает действовать апсидальный резонанс Лидова–Козаи $\dot{\psi}_{20} = \dot{\omega}[3-4]$, а нодальный резонанс $\dot{\psi}_{17} = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L})$ для Солнца и Луны, действует во всей области при наклонениях 0°, 90° и 180°. Именно эти резонансы рассмотрены в работе наиболее подробно.

Используемая в работе методика выявляет резонанс Лидова–Козаи, начиная с больших полуосей, равных 20000 км, при наклонении близком 60° к экватору Земли. Анализ орбитальной эволюции объектов, имеющих наклонение орбиты к экватору на 60°, показывает, что механизм Лидова–Козаи присутствует и на более низких орбитах, но его проявление подавляется влиянием несферичности Земли.

Что касается резонанса $\underline{\psi} = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) \approx 0$, то его влияние в орбитальной эволюции проявляется наличием долгопериодических колебаний в наклонении орбиты.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-10022).

Литература

1. Александрова А.Г., Бордовицына Т.В., Попандопуло Н.А., Томилова И.В. Новый подход к вычислению вековых частот в динамике околоземных объектов на орбитах с большими эксцентриситетами // Изв. вузов. Физика, 2020. Т. 63. № 1 (745). С. 57–62.

2. *Cincotta P.M., Girdano C.M., Simo* C. Phase space structure of multi-dimensional systems by means of the mean exponential growth factor of nearby orbits. Physica D. 2003. Vol. 182. P. 151–178.

3. *Kozai, Y.* Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity // Astron. J. 1962. Vol. 67. P. 591–598.

4. *Lidov M.L.* The evolution of orbits of artificial satellites of planets under the action of gravitational perturbations of external bodies// Planetary and Space Science, 1962 Vol. 9. Is. 10. P. 719–759.

References

1. Aleksandrova A.G., Bordovitsyna T.V., Popandopulo N.A. et al. A New Approach to Calculation of Secular Frequencies in the Dynamics of Near-Earth Objects in Orbits with Large Eccentricities, Russ Phys J. Vol. 63. No 1. P. 64–70, 2020.

2. *Cincotta P.M., Girdano C.M., Simo C.* Phase space structure of multi-dimensional systems by means of the mean exponential growth factor of nearby orbits. Physica D 2003.Vol. 182. P. 151–178.

3. *Kozai Y*. Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity // Astron.J.1962. Vol. 67. P. 591–598.

4. *Lidov M.L.* The evolution of orbits of artificial satellites of planets under the action of gravitational perturbations of external bodies // Planetary and Space Science, 1962 Vol. 9. Is. 10. P. 719–759.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ИЗБРАННЫХ АСТЕРОИДОВ НА ТЕРСКОЛЬСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ В СЕНТЯБРЕ 2020 ГОДА

Т.Ю. Галушина¹, П.А. Левкина², А.В. Шеин³

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия ²Институт астрономии РАН, Россия ³Терскольский филиал Института астрономии РАН, Россия E-mail: tanastra@nxt.ru

Ключевые слова: астероиды, позиционные наблюдения

Аннотация. В докладе представлены результаты анализа позиционных наблюдений избранных астероидов, полученных авторами в сентябре 2020 г. на уникальной научной установке Цейсс-2000 Центра коллективного пользования «Терскольская обсерватория» Института астрономии Российской академии наук. Получены результаты наблюдений как хорошо известных астероидов, сближающихся с Землей, так и астероидов, открытых в 2020 г. (в том числе в августе 2020 г.), орбиты которых не были надёжно определены на момент наблюдений. Астрометрическая обработка полученных кадров проводилась с помощью программных пакетов Astrometrica и IzmCCD. Кроме запланированных для наблюдений АСЗ при обработке на снимках были обнаружены некоторые объекты Главного пояса.

RESULTS OF OBSERVATIONS OF SELECTED ASTEROIDS AT THE TERSKOL OBSERVATORY IN SEPTEMBER 2020

T. Galushina¹, P. Levkina², A. Shein³

¹National Research Tomsk State University, Russian Federation ²Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation ³Terskol branch of Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation E-mail: tanastra@nxt.ru

Keywords: asteroids, optical observations

Abstract: The report presents the results of the analysis of positional observations of selected asteroids obtained by the authors in September 2020 at the Zeiss-2000 unique scientific facility of the Centre for collective use «Terskol observatory» of the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences. The observations of both the well-known near-Earth asteroids and asteroids discovered in 2020 (including in August 2020), which orbits has been not reliably determined at the time of observations, were obtained. Astrometric processing of the obtained frames was carried out using the Astrometrica and IzmCCD software packages. In addition to the near-Earth asteroids planned for observations, some objects of the Main Belt were found on the images during processing.

14–17 сентября 2020 г. на комплексе телескопа Цейсс-2000 (D = 2 м, F = =16 м) Центра коллективного пользования (ЦКП) «Терскольская обсерватория» Института астрономии РАН были проведены позиционные наблюдения избранных астероидов. Получены измерения шести астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), за три ночи наблюдений – 14, 16, 17 сентября. 15 сентября наблюдения не проводились по причине ухудшения погодных условий. В табл. 1 приведены данные о числе и продолжительности полученных измерений. Интересующие нас объекты наблюдались на интервале примерно равном трём суткам, за исключением астероида 2020 PF7, наблюдения которого были получены в течение одной ночи.

Астероиды с плохо определёнными орбитами (открытые в 2020 г.) наблюдались на максимально больших дугах в рамках выделенного наблюдательного времени. Исключение составляет объект 2020 PF7, измерения которого были начаты в последнюю наблюдательную ночь.

| | | | • • • | | |
|----------|----------------------------|----------------------------|---------|-----------|----------------|
| Объект | Дуга, начало | Дуга, конец | Дуга, ч | Число | Видимая |
| | α , ^{h ms} | α , ^{h ms} | | измерений | звёздная вели- |
| | δ, ໍ΄΄″ | δ, ໍ΄″ | | | чина, R |
| 3753 | 06 01 44.189 | 06 13 41.899 | 71.920 | 54 | 17.6 |
| Cruithne | -06 51 44.71 | -07 34 36.12 | | | |
| 3200 | 07 08 29.674 | 07 16 09.809 | 70.052 | 42 | 17.9 |
| Phaethon | +28 41 26.07 | +28 22 50.45 | | | |
| 2020 | 03 21 31.890 | 03 48 15.837 | 72.539 | 48 | 19.5 |
| QK6 | +00 05 09.38 | -07 41 19.92 | | | |
| 2020 | 22 41 05.559 | 22 51 23.738 | 73.867 | 43 | 19.6 |
| PR3 | -03 16 46.24 | -02 56 33.46 | | | |
| 2020 | 23 57 23.546 | 23 56 57.294 | 74.068 | 63 | 19.2 |
| PC5 | +15 59 37.71 | +15 00 39.27 | | | |
| 2020 | 22 29 20.910 | 22 28 36.953 | 4.113 | 41 | 19.7 |
| PF7 | +48 10 43.65 | +48 15 54.98 | | | |
| | | | | | |

Таблица 1. Статистика полученных наблюдений избранных астероидов в сентябре 2020 г.

Измерения всех объектов получены в фотометрическом фильтре R. Подбор экспозиций (30 с, 60 с, 120 с, 180 с) осуществлялся в зависимости от звёздной величины объекта исследований, известной из каталога орбит,

его угловой скорости, отношения сигнал/шум на момент измерений, а также от текущих атмосферных условий.

В качестве источников эфемеридных данных использовались вебинтерфейс системы HORIZONS Лаборатории реактивного движения NASA (https://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons) и база данных Центра малых планет (https://minorplanetcenter.net/). Во время проведения наблюдений на пике Терскол для орбиты астероида 2020 РС5, впервые наблюдавшегося 14 августа 2020 г. на обсерватории Маунт-Леммон, было обнаружено существенное отклонение от эфемеридных значений, предоставляемых Центром малых планет (порядка 6 угловых минут по склонению). Объект был обнаружен по более точным на тот момент эфемеридам системы HORIZONS.

Для фотометрической редукции полученных снимков дополнительно были сняты калибровочные кадры – темновые поля (с экспозициями, соответствующими рабочим снимкам), плоские поля (по утреннему небу) и байасы (для удаления шумов считывания). Калибровка рабочих снимков осуществлялась с помощью программы MaximDL.

Обработка рабочих кадров проводилась с помощью программных пакетов Astrometrica и IzmCCD [1]. Кроме запланированных для наблюдений AC3 при обработке на снимках в автоматическом режиме были обнаружены некоторые объекты Главного пояса (в том числе 13128 Aleppo, 49385 1998 XA12, 261906 2006 JG30, 531245 2012 JG33, 2005 QU58, 2007 RG27 и 2009 FV66).

При первичной обработке полученного массива данных осуществлялась отбраковка кадров с низким отношением сигнал/шум. Программным пакетом Astrometrica была проведена астрометрическая обработка всех кадров, поступивших в работу после отбраковки (см. данные по количеству измерений в табл. 1). Для привязки полученных кадров к каталогу малых тел Солнечной системы использовался каталог орбит Центра малых планет (https://minorplanetcenter.net/iau/MPCORB.html).

На рис. 1 для примера представлена статистика наблюдений астероида 3753 Cruithne в одну из наблюдательных ночей. Показаны отличия результатов измерений, полученных с помощью пакетов Astrometrica и IzmCCD, а также разница (O–C) для измерений, обработанных в IzmCCD. В большинстве случаев отличия результатов Astrometrica и IzmCCD не превышают (O–C) или одного порядка с ней.

В результате проведенного наблюдательного сеанса в сентябре 2020 г. апробирована методика наблюдений астероидов на телескопе Цейсс-2000. Проведена обработка снимков пакетами Astrometrica и IZMCCD, выявлены достоинства и недостатки каждой программы для решения поставленных задач. В ближайшем будущем предполагается оценить влияние полученных наблюдений на орбиты объектов с помощью программного комплекса ИДА, разработанного в НИИ ПММ ТГУ, и провести наблюдения околосолнечных астероидов с плохо определенной орбитой на комплексе телескопа Цейсс-2000 ЦКП «Терскольская обсерватория» ИНАСАН.





Рис. 1. Оценка точности наблюдений астероида 3753 Cruithne, в ночь 14/15.09.2020.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0721-2020-0049).

Литература

1. Измайлов И.С., Ховричева М.Л., Ховричев М.Ю., Кияева О.В., Хруцкая Е.В., Романенко Л.Г., Грошева Е.А., Масленников К.Л., Калиниченко О.А. Астрометрические ПЗС-наблюдения визуально-двойных звёзд в Пулковской обсерватории, Письма в Астрономический журнал, 2010, Т. 36, № 5. С. 365-371.

References

1. Izmailov I.S., Khovricheva M.L., Khovrichev M.Y., Kiyaeva O.V., Khrutskaya E.V., Romanenko L.G., Grosheva E.A., Maslennikov K.L., Kalinichenko O.A. Astrometric CCD observations of visual double stars at the Pulkovo Observatory, Astronomy Letters, 2010, Vol. 36, Is. 5. P. 349–354.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ СЕМЕЙСТВА АСТЕРОИДОВ RAMPO

М.А. Васильева¹, Э.Д. Кузнецов¹, А.Е. Розаев², Е. Плавалова³

¹Уральский федеральный университет, Россия ²Ярославский государственный университет, Россия ³Математический институт Словацкой академии наук, Словакия E-mail: vasilyeva.maria@urfu.ru

Ключевые слова: семейство астероидов Rampo, орбитальная эволюция, эффект Ярковского, метрики Холшевникова.

Аннотация. Обнаружено три новых члена семейства астероидов Rampo: 2009 HD95, 2010 VO19, 2013 JF69. Получены оценки скорости дрейфа большой полуоси, обусловленные эффектом Ярковского, радиусы сфер Хилла и вторые космические скорости для всех астероидов семейства. Проведено моделирование динамической эволюции астероидов с учетом эффекта Ярковского. На основе результатов моделирования получены оценки возраста пар астероидов, входящих в семейство. Рассмотрены сценарии многократного дробления родительского тела и его каскадного разрушения. В сценарии многократного дробления родительского тела астероида (10321) Rampo можно отметить концентрацию оценок возраста пар к значениям 900, 750, 500, 250 тыс. лет.

INVESTIGATION OF THE DYNAMIC EVOLUTION OF RAMPO ASTEROIDS FAMILY

M. Vasileva¹, E. Kuznetsov¹, A. Rosaev², E. Plavalova³

¹Ural Federal University, Russian Federation ²Yaroslavl State University, Russian Federation ³Mathematical Institute of the Slovak Academy of Sciences, Slovakia E-mail: vasilyeva.maria@urfu.ru

Keywords: Rampo asteroids family, the orbital evolution, the Yarkovsky effect, Khol-shevnikov metrics.

Abstract. We have found three new members of the Rampo asteroid family: 2009 HD95, 2010 VO19, 2013 JF69. We estimated the Yarkovsky semimajor axis drift rate, the Hill sphere's radii, and the escape velocity for all asteroids of the family. Simulation of the dy-

namic evolution of asteroids with allowance for the Yarkovsky effect has been carried out. Based on the simulation results, estimates of the asteroid pairs' age included in the family are obtained. Scenarios of multiple fragmentation of the parent body and its cascade destruction are considered. In the scenario of the multiple fragmentation of the parent body of the asteroid (10321) Rampo, one can note the concentration of estimates of the pairs' age to values of 900, 750, 500, and 250 kyr.

Введение. В настоящее время известно о нескольких очень молодых семействах астероидов возрастом менее 2 млн лет, которые состоят из трех и более астероидов, движущихся по близким орбитам. Такие семейства астероидов могут формироваться в результате различных динамических процессов. Известны два возможных механизма образования более, чем одного фрагмента путем вращательного деления: вторичное деление и кратерообразующее столкновение. После формирования семейства орбиты его членов эволюционируют в пространстве собственных элементов из-за гравитационных и негравитационных возмущений, таких как эффект Ярковского. Очень молодые семейства с возрастом менее 1 млн лет, для которых орбиты не успели далеко отойти друг от друга, могут быть идентифицированы как группы в пространстве оскулирующих элементов орбиты.

Семейство астероидов Rampo было описано в работе Pravec и Vokrouhlický в 2009 году [1]. Они обнаружили три астероида с очень погелиоцентрическими орбитами: (10321) Rampo, хожими (294272)2007 UM101, 2006 UA169, и оценили возраст семейства от 500 тыс. до 1,1 млн лет. В дальнейшем Pravec и др. обнаружили ещё четыре члена семейства: (451686) 2013 BR67, 2014 HS9, 2015 HT91 и 2016 TE87. Интегрирование орбит назад по времени показало, что орбиты четырех астероидов сходятся с орбитой главного тела около 1,4 млн лет назад, тогда как для астероидов, (294272) 2007 UM101 и 2016 TE87, средний возраст составляет 660 и 852 тыс. лет соответственно. Другой метод, анализ сходимости вековых углов, дал формальную оценку возраста семейства в 780⁺¹³⁰₋₉₀ тыс. лет [2]. В работе [3] обнаружено ещё шесть новых членов семейства: 2009 SR371. 2013 RL101, 2013 VC30, 2015 TA367, 2015 TM372, 2017 UH21.

Семейство астероидов Rampo находится в окрестности резонанса 10:3 с Юпитером.

В настоящей работе будут получены оценки скорости дрейфа большой полуоси, обусловленные эффектом Ярковского, радиусы сфер Хилла и вторые космические скорости для всех астероидов семейства. Будет выполнено моделирование динамической эволюции астероидов с учетом эффекта Ярковского. На основе результатов моделирования будут сделаны оценки возраста членов семейства.

Методика поиска новых членов семейства Rampo

Поиск новых членов семейства Rampo проводился путем вычисления метрик Холшевникова ρ_2 и ρ_5 [4].

Метрика ρ_2 используется для определения расстояния между орбитами, заданными на некоторую эпоху, и имеет вид:

$$\rho_2^2 = (1 + e_1^2) p_1 + (1 + e_2^2) p_2 - 2\sqrt{p_1 p_2} (\cos I + e_1 e_2 \cos P).$$

Выражения для вычисления cos *I* и cos *P* определяются следующим образом:

$$\cos I = c_1 c_2 + s_1 s_2 \cos \Delta,$$

$$\cos P = s_1 s_2 \sin \omega_1 \sin \omega_2 + (\cos \omega_1 \cos \omega_2 + c_1 c_2 \sin \omega_1 \sin \omega_2) \cos \Delta + (c_2 \cos \omega_1 \sin \omega_2 - c_1 \sin \omega_1 \cos \omega_2) \sin \Delta,$$

где $c = \cos i$, $s = \sin i$, $\Delta = \Omega_1 - \Omega_2$.

Метрика ρ_5 применяется для оценки минимального расстояния между орбитами при всех возможных положениях линий апсид и линий узлов и имеет вид:

$$\rho_5^2 = (1 + e_1^2) p_1 + (1 + e_2^2) p_2 - 2\sqrt{p_1 p_2} [e_1 e_2 + \cos(i_1 - i_2)].$$

Метрики ρ_2 и ρ_5 рассчитывались на основе оскулирующих элементов орбит на эпоху MJD 58800,0 (00^h 00^m 00^s 13.11.2019) из базы данных Asteroids Dynamic Site – AstDyS (https://newton.spacedys.com/astdys/), которая содержала информацию о 959425 астероидах. Критерием отбора служило одновременное выполнение двух условий: $\rho_2 < 0,008$ а.е.^{1/2} и $\rho_5 < 0,002$ а.е.^{1/2}. В результате было обнаружено три новых члена семейства (10321) Rampo: 2009 HD95, 2010 VO19, 2013 JF69.

Методика оценки физических и динамических параметров астероидов

В динамике малых тел Солнечной системы значимую роль играют негравитационные эффекты. Для надежного исследования орбитальной эволюции астероидов с диаметрами D < 40 км необходимо учитывать влияние эффекта Ярковского. Оценка значений дрейфа большой полуоси, обусловленного эффектом Ярковского, выполнялась путем нормализации с использованием параметров астероида (101955) Веппи. Формула для расчета скорости дрейфа в а. е./млн лет имеет вид:

$$\dot{a} = \frac{da}{dt} = 12,09 \cdot 10^{-4} \frac{\cos\phi}{\sqrt{a}(1-e^2)D} \frac{1-A}{\rho},$$

где *a* – большая полуось, выраженная в а.е., *e* – эксцентриситет; *D* – диаметр астероида, выраженный в километрах, плотность ρ в г/см³; *A* – альбедо Бонда ($A = p_v / 3$, где p_v – геометрическое альбедо) и ϕ – угол наклона между осью вращения и нормалью к плоскости орбиты. Принимая

 $\cos \phi = 1$, получим максимальное значение модуля скорости дрейфа большой полуоси.

Поиск сведений о диаметрах, альбедо и таксономическом классе астероидов осуществлялся в базах NASA JPL (http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi) и ALCDEF (http://alcdef.org/). Плотность астероидов определялась по их таксономическому классу. Значение средней плотности для астероидов класса S: $\rho = 2,4$ г/см³. Значения альбедо и плотности для астероидов, сведений о которых в указанных базах данных нет, принимались равными соответствующим значениям главного астероида семейства (10321) Rampo, а диаметры определялись по формуле:

$$\lg D = 3,122 - 0,5 \lg p_v - 0,2H.$$

Для анализа данных моделирования будут необходимы оценки радиусов сфер Хилла R_{Hill} и вторых космических скоростей v_2 астероидов. Сферой Хилла называют замкнутую область вокруг небесного тела, в которой он способен удерживать свой спутник, несмотря на притяжение объекта, вокруг которого обращается сам. Формула для оценки радиуса Хилла имеет вид [5]:

$$R_{\text{Hill}} \sim a D \frac{1}{2} \left(\frac{4\pi}{9} \frac{G\rho}{\mu} \right)^{1/3},$$

где G – гравитационная постоянная; μ – гравитационный параметр Солнца. Вторая космическая скорость – наименьшая скорость, которую необходимо придать телу для преодоления гравитационного притяжения другого небесного тела и покидания замкнутой орбиты вокруг него. Скорость убегания с поверхности небесного тела определяется формулой [5]:

$$v_2 \sim D \frac{1}{2} \left(\frac{8\pi}{3} G \rho \right)^{1/2}.$$

Результаты исследования динамической эволюции астероидов семейства Rampo

Моделирование динамической эволюции астероидов семейства Rampo проводилось численным методом с помощью программы Orbit9 комплекса OrbFit на интервале 1 млн лет. Учитывались возмущения от больших планет и карликовой планеты Плутон, сжатие Солнца, релятивистские эффекты и влияние эффекта Ярковского. Для каждого астероида на основе номинальных элементов орбиты рассматривалось пять сценариев эволюции при различных значениях скорости дрейфа большой полуоси, соответствующих различной ориентации оси вращения астероида относительно плоскости его орбиты: $\dot{a} = 0$ при $\phi = 90^{\circ}$ или 270°; $\dot{a} = \pm |\dot{a}|_{max}$ при $\phi = 0^{\circ}$ или

180° соответственно; $\dot{a} = \pm \frac{1}{2} |\dot{a}|_{max}$ при $\phi = 60°$ или 240° соответственно. Далее с шагом в 1 год в диапазоне 1 млн лет рассчитывались значения метрик

 ρ_2 и ρ_5 , разности долгот восходящих узлов $\Delta\Omega$, разности аргументов перигелия $\Delta\omega$, относительные расстояния и скорости для двадцати пяти различных вариантов эволюции для всех (120 комбинаций) пар астероидов внутри семейства.

Момент образования пары соответствует условиям, когда расстояние между астероидами имеет тот же порядок, что и радиус сферы Хилла, и относительная скорость сравнима со второй космической скоростью. Среди значений относительного расстояния между астероидами отбирались те, которые удовлетворяют условию $\Delta r < 10R_{Hill}$ при относительной скорости $\Delta v < 20v_2$. Такие моменты сближений были обнаружены для всех пар «астероид (10321) Rampo – астероид семейства».

Момент, когда значения метрики ρ_2 минимальны, близок к моменту, когда разности долгот восходящих узлов $\Delta\Omega$ и аргументов перигелиев $\Delta\omega$ равны нулю. Поэтому оценка возраста пары астероидов по минимальному значению метрики ρ_2 также близка к оценке возраста, выполненной по анализу сходимости орбит этой пары.

Для двадцати пяти вариантов эволюции каждой пары астероидов внутри семейства были найдены минимальные значения метрики ρ_2 и соответствующие им моменты времени. Для последующего анализа были отобраны только те варианты, в которых значение метрики ρ_2 не превышало 0,004 а.е.^{1/2}. Оценка возраста пары проводилась по среднему взвешенному значению времени, где за вес бралась величина, обратная метрике ρ_2 . Поскольку нам не известно, какая из рассмотренных двадцати пяти конфигураций (положения осей вращения астероидов пары в пространстве) наиболее близка к действительной, в качестве диапазона возможного значения возраста пары были взяты минимальное и максимальное значения моментов сближения из всех двадцати пяти вариантов.

Если предполагать сценарий многократного дробления родительского тела астероида (10321) Rampo, то в семействе Rampo можно выделить четыре группы орбит. Астероиды, орбиты которых сближаются с орбитой астероида (10321) Rampo около 900 тыс. лет назад — (451686) 2013BR67, 2009 HD95, 2009 SR371, 2013 JF69, 2015 TM372 и 2017 UH21; около 750 тыс. лет назад — 2006 UA169, 2010 VO19, 2013 RL101, 2013 VC30, 2014 HS9, 2015 HT91 и 2016 TE87; около 500 тыс. лет назад — (294272) UM101; около 250 тыс. лет назад — 2015 TA367.

Сценарий каскадного разрушения родительского тела предполагает, что семейство астероидов могло образоваться в результате серии разрушений (последовательного дробления) сперва родительского тела на промежу-

точные, после чего промежуточных тел на другие промежуточные тела и на те астероиды, которые мы можем наблюдать сейчас. На рис. 1 показан один из возможных вариантов образования семейства астероидов Rampo в результате каскадного разрушения. Для построения такого сценария рассматривались все возможные сочетания пар внутри семейства, древо распада строилось от настоящего состояния в прошлое.



Рис. 1. Сценарий каскадного разрушения семейства астероидов Rampo

Заключение. В ходе выполнения работы были обнаружены три новых члена семейства астероидов Rampo: 2009 HD95, 2010 VO19, 2013 JF69. Получены оценки скорости дрейфа большой полуоси, обусловленные эффектом Ярковского, радиусы сфер Хилла и вторые космические скорости для всех астероидов семейства. Выполнено моделирование динамической эволюции астероидов с учетом эффекта Ярковского. На основе результатов моделирования предложены два типа сценариев формирования семейства Rampo: многократное дробление единого родительского тела астероида (10321) Rampo и каскадное деление. На уровне современных знаний о физических и динамических свойствах членов этого семейства без точных оценок скоростей дрейфа большой полуоси или негравитационного параметра A_2 не представляется возможным восстановить истинную картину формирования семейства.

Следующим необходимым шагом в изучении семейства астероидов Rampo будет получение информации о теплофизических свойствах поверхности, форме и параметрах осевого вращения астероидов, а также уточнение орбитальных параметров. Это поможет определить скорость дрейфа большой полуоси орбиты, обусловленного эффектом Ярковского, и выполнить моделирование реалистичных сценариев эволюции астероидов в пределах ошибок определения параметров. Работа поддержана Министерством науки и высшего образования России в рамках проектов государственного задания FEUZ-2020-0038 (М.А. Васильева — построение сценариев формирования семейства Rampo) и FEUZ-2020-0030 (Э.Д. Кузнецов – моделирование динамической эволюции и оценка возраста пар).

Литература

1. Pravec P., Vokrouhlický D. Significance analysis of asteroid pairs // Icarus. 2009. Vol. 204. P. 580–588.

2. *Pravec P., Fatka P., Vokrouhlický D. et al.* Asteroid clusters similar to asteroid pairs // Icarus. 2018. Vol. 304. P. 110–126.

3. *Kuznetsov E.D., Vasileva M.A.* On new members of asteroid clusters similar to asteroid pairs // Meteoritics and Planetary Science. 2019. Vol. 54. Is. S2. Article id. A229.

4. *Kholshevnikov K. V., Kokhirova G. I., Babadzhanov P. B., Khamroev U. H.* Metrics in the space of orbits and their application to searching for celestial objects of common origin // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2016. Vol. 462. P. 2275–2283.

5. *Pravec P., Fatka P., Vokrouhlický D. et al.* Asteroid pairs: a complex picture // Icarus. 2019. Vol. 333. P. 429–463.

References

1. Pravec P., Vokrouhlický D. Significance analysis of asteroid pairs // Icarus. 2009. Vol. 204. P. 580–588.

2. *Pravec P., Fatka P., Vokrouhlický D., et al.* Asteroid clusters similar to asteroid pairs // Icarus. 2018. Vol. 304. P. 110–126.

3. *Kuznetsov E.D., Vasileva M.A.* On new members of asteroid clusters similar to asteroid pairs // Meteoritics and Planetary Science. 2019. Vol. 54. Iss. S2. Article id. A229.

4. *Kholshevnikov K.V., Kokhirova G.I., Babadzhanov P.B., Khamroev U.H.* Metrics in the space of orbits and their application to searching for celestial objects of common origin // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2016. Vol. 462. P. 2275–2283.

5. *Pravec P., Fatka P., Vokrouhlický D. et al.* Asteroid pairs: a complex picture // Icarus. 2019. Vol. 333. P. 429–463.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИСЗ В ОРБИТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ РОЯ

Р.А. Гонтарев, Я.А. Михайлова, В.А. Авдюшев

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

Ключевые слова: ГЛОНАСС, численная модель, эффективность, орбитальное движение.

Аннотация. В работе рассматривается вопрос о возможности применения дифференциальных уравнений в элементах Роя для численного моделирования движения ис-

кусственных спутников Земли. На примере КА ГЛОНАСС показано, что моделирование в элементах Роя столь же высокоэффективно, как и в регулярных элементах Лагранжа. Таким образом, учитывая простоту и элегантность уравнений Роя, авторы настоящей работы рекомендуют их в качестве формализации орбитального движения при компьютерном расчете эфемерид навигационных спутников.

NUMERICAL MODELING OF AES DYNAMICS IN ROY'S ORBITAL ELEMENTS

R. Gontarev, Y. Mikhaylova, V. Avdyushev

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

Keywords: GLONASS, numerical model, efficiency, orbital motion.

Abstract. The paper considers the question of the possibility of using differential equations in Roy's elements for numerical simulation of the motion of artificial earth satellites. Using a spacecraft of GLONASS as an example, it is shown that simulation in Roy's elements is as highly efficient as in regular Lagrange's elements. Thus, taking into account the simplicity and elegance of Roy's equations, the authors of this work recommend them as a formalization of orbital motion in the computer calculation of the ephemeris of navigation satellites.

Орбитальное движение искусственных спутников Земли описывается весьма сложными дифференциальными уравнениями, которые не поддаются решению аналитическими способами, поэтому для моделирования спутниковых орбит прибегают к численным методам.

Классическая и традиционная формализация орбитального движения – это дифференциальные уравнения в прямоугольных координатах. Однако их численное интегрирование сопряжено с рядом трудностей, что приводит к низкой эффективности моделирования. Функции дифференциальных уравнений орбитального движения – периодические и быстроизменяющиеся. Поэтому для обеспечения высокой точности спутниковых эфемерид дифференциальные уравнения необходимо интегрировать с малым шагом, что требует больших объемов вычислений, которые сопровождаются быстрым накоплением ошибок округления. Эта трудность усугубляется наличием в уравнениях сингулярности при нулевом геоцентрическом расстоянии, что в случае высоко эллиптичных орбит становится причиной сильно неравномерного поведения функций дифференциальных уравнений. Кроме того, уравнения неустойчивы по Ляпунову и, как известно, неустойчивость усиливает всевозможные ошибки, неизбежно сопровождающие любой численный процесс.

Разрешение этих трудностей – формализация спутникового движения в орбитальных элементах, которые при слабых возмущениях, вообще гово-

ря, – медленно изменяющиеся величины. Кеплеровы элементы – неподходящий выбор для моделирования орбит многих функционирующих спутников, поскольку их дифференциальные уравнения сингулярны при нулевых значениях эксцентриситета и наклонения. Впрочем, регуляризация этих уравнений возможна путем введения комбинированных орбитальных элементов, каковыми, например, являются широко используемые на практике элементы Лагранжа. Однако их уравнения не лишены другого недостатка уравнений в элементах Кеплера: они очень сложные и, кроме того, при интегрировании на каждом шаге многократно требуют преобразование возмущающих сил из прямоугольной системы координат к орбитальной.

Наиболее удачным, на наш взгляд, выбором для численного моделирования спутниковых орбит являются элегантные и простые уравнения в элементах Роя [1], каковыми являются известные в орбитальной динамике величины. Это вектор момента количества движения и вектор Лапласа, а также истинная долгота. В работе мы хотели выяснить, какова эффективность уравнений в элементах Роя применительно к моделированию движения КА ГЛОНАСС в сравнении с эффективностью других уравнений.

Движение КА ГЛОНАСС рассматривалось в поле тяготения Земли под действием притяжения Луны и Солнца с учетом влияния светового давления от светила. Дифференциальные уравнения движения интегрировались численно классическим методом Рунге–Кутты (4-го порядка) (RK) и методом Эверхарта 15-го порядка (Ev) [2] в компьютерной арифметике с двойной точностью. Моделирование выполнялось на временном интервале 10 оборотов спутника.



Рис. 1. Характеристики точность-быстродействие для различных дифференциальных уравнений движения и численных методов интегрирования

Как видно из рис. 1, уравнения в регулярных элементах Лагранжа (Lagrange) и Роя (Roy) при использовании классического метода Рунге–Кутты демонстрируют колоссальную эффективность в сравнении с уравнениями в прямоугольных координатах (Cartesian): при одинаковом быстродействии они позволяют повысить методическую точность на 7 порядков. С другой стороны, высокую эффективность по точности можно также интерпретировать как высокую эффективность по быстродействию. Например, миллиметровый уровень точности для уравнений в регулярных элементах достигается быстрее в 20 раз, нежели для уравнений в прямоугольных координатах.

Метод Эверхарта существенно повышает эффективность численного моделирования для всех уравнений. Даже моделирование в прямоугольных координатах выполняется эффективнее, нежели для уравнений в регулярных элементах, интегрируемых методом Рунге–Кутты. При использовании метода высокого порядка уравнения в регулярных элементах уже не столь впечатляют своими возможностями. Тем не менее, их эффективность с практической точки зрения все же еще весьма высокая: они позволяют повысить точность на 3 порядка, тогда как быстродействие в 2 раза.

Как показывают результаты, уравнения в элементах Лагранжа и Роя одинаково хороши при численном моделировании движения КА ГЛО-НАСС. Однако, учитывая простоту уравнений Роя, мы находим их более привлекательными для формализации орбитального движения и видим в них достойную альтернативу уравнениям в элементах Лагранжа.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0721-2020-0049).

Литература

1. Рой А.Е. Движение по орбитам. М.: Мир. 1981. 544 с

2. *Everhart E.* Implicit Single Sequence Methods for Integrating Orbits // Celest. Mech. 1974. Vol. 10. P. 35–55

References

1. Roy A.E. Orbital Motion. 1981. 544 p.

2. *Everhart E.* Implicit Single Sequence Methods for Integrating Orbits // Celest. Mech. 1974. Vol. 10. P. 35–55.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВЫХ И НЕУСТОЙЧИВЫХ ВЕКОВЫХ РЕЗОНАНСОВ

Д.С. Красавин, А.Г. Александрова

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

Ключевые слова: динамика околоземных объектов, вековые резонансы, машинное обучение, нейронные сети.

Аннотация. В работе представлено описание методики, комбинирующей различные модели машинного обучения для решения задачи классификации временных рядов критических аргументов для выявления устойчивых и неустойчивых вековых резонансов. Приведен пример применения такого подхода в исследовании резонансной структуры околоземного орбитального пространства в диапазоне 41–120 тыс. км по большой полуоси и 0–90 градусов по наклонению.

ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS APPLICATION FOR DETECTION OF STABLE AND UNSTABLE SECULAR RESONANCES

D. Krasavin, A. Aleksandrova

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

Keywords: near-Earth object dynamics, secular resonances, machine learning, artificial neural networks.

Abstract. The paper presents a description of a technique that combines various machine learning models to solve the problem of classifying time series of critical arguments to identify stable and unstable secular resonances. As an example we demonstrate the application of this approach to the study of the resonant structure of near-Earth orbital space in the range of semi-major axis from 41 to 120 thousand km and from 0 to 90 degrees in inclination.

Интенсивное освоение околоземного космического пространства требует знания его резонансной, структуры. Это необходимо, прежде всего, при выборе орбит размещения новых космических систем и при поиске зон паркинга отработавших спутников. Обычно выводы о наличии резонанса и его характере по временным рядам, связанным с критическими аргументами, производятся человеком, и представляет собой очень длительный процесс по обработке большого числа информации. Например, в рассматриваемой в данной работе области околоземного пространства мы исследовали около 4500 объектов, и для каждого объекта изучили эволюцию 39 резонансных аргументов [1], т.е. 175 тыс. временных рядов. Ручная обработка такого массива данных требует колоссальных временных затрат. Более того, в ходе разметки человек может допускать ошибки, вызванные невнимательностью, усталостью и т.п. Автоматизация этого процесса не только освобождает ученых от рутинной работы, но и позволяет существенно увеличить масштаб эксперимента в смысле количества рассматриваемых объектов, понизить количество погрешностей в разметке, а главное значительно ускорить процесс обработки.

Основным методом получения результатов в таких задачах является численное и численно-аналитическое моделирование с использованием высокопроизводительных вычислительных средств, например, таких как кластер «Скиф Cyberia» Томского государственного университета. В нашем случае мы добавили в исследование еще и средства машинного анализа: кластеризацию HDBSCAN и искусственные нейронные сети (ИНС), которые позволяют обрабатывать большие объемы данных. Проводился анализ 100-летней динамической эволюции космических объектов, равномерно распределенных в околоземном пространстве от геостационарной зоны до 120 тыс. км по большой полуоси.

Целью данной работы являлась автоматизация процесса выявления вековых резонансов в космическом пространстве. Этот процесс сопровождается анализом больших массивов данных и в ручном режиме занимает значительное количество времени. Исследование динамической структуры орбитального пространства производится с использованием теории вековых резонансов [1]. Для некоторого набора модельных объектов из выбранной области орбитального пространства прогнозируется их движение, и вычисляются критические аргументы для резонансных соотношений (в нашем случае для 39 апсидально-нодальных резонансов [1]). По эволюции критических аргументов можно сделать выводы, является этот вековой резонанс устойчивым или нет, и, соответственно, о некоторых особенностях динамики объектов, подверженных влиянию резонанса.

Первый опыт применения машинного обучения в выявлении резонансов изложен в [2]. В данной работе мы имеем дело с усовершенствованным методом. Для автоматизации процесса использовался набор алгоритмов и технологий машинного обучения, которые представлены в табл. 1.

| Автокодировщик на базе ИНС [3] | Снижение размерности исходных данных | | |
|--------------------------------|--|--|--|
| HDBSCAN [4] | Кластеризация объектов на категории для обуче- | | |
| | ния классификатора | | |
| SVM [5] | Классификация резонансов на "устойчивые", | | |
| | "неустойчивые" и "отсутствие резонанса" | | |

| Таблица . | 1. | Используемые | алгоритмы |
|-----------|----|--------------|-----------|
| | | | |

В результате работы такого набора алгоритмов получается сопоставление: (объект, резонансное соотношение) –> метка, где метка – это число из интервала [0...1], характеризующее устойчивость резонанса. Нуль характерен для отсутствия резонанса, единица – для устойчивого резонанса, а промежуточные значения указывают на неустойчивость.

Как уже упоминалось выше, мы исследовали область околоземного орбитального пространства в диапазоне больших полуосей от 41 до 120 тыс. км и от 0 до 90 градусов по наклонению. Полученные результаты представлены в виде карты распространенности вековых резонансов на рис. 1.



Рис. 1. Карта распространенности вековых резонансов

По данной карте легко отследить области с максимальным наложением резонансов, а значит с наиболее интересной динамикой. Результаты тестирования показали, что применение методов машинного обучения для выявления резонансов в околоземном пространстве дает хороший результат и значительно ускоряет процесс исследований.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-10022).

Литература

1. 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.

2. Красавин Д.С., Александрова А.Г., Томилова И.В. Применение искусственных нейронных сетей в задачах анализа динамической структуры областей околоземного орбитального пространства // Изв. вузов. Физика, 2020. Т. 63. № 3 (747). С. 70–75.
3. *Kingma D.P., Welling M.* An Introduction to Variational Autoencoders [Электронный pecypc] // arXiv.org. 2019. URL: https://arxiv.org/abs/1906.02691

4. *McInnes L., Healy J., Astels S.* HDBSCAN: Hierarchical density based clustering In: Journal of Open Source Software, The Open Journal, vol. 2, n. 11. 2017.

5. Метод опорных векторов [Электронный ресурс]. URL: http://statistica.ru/branchesmaths/metod-opornykh-vektorov-supported-vector-machine-svm/

References

1. Bordovitsyna T.V., Tomilova I.V. Special features of the structure of secular resonances in the dynamics of near-earth space objects // Russian Physics Journal. 2016. Vol. N_{\odot} 3. C. 365–373.

2. *Krasavin, D.S., Aleksandrova, A.G., Tomilova, I.V.* Application of Artificial Neural Networks to an Analysis of the Dynamic Structure of the Near-Earth Orbital Space // Russian Physics Journal, 2020, Vol. 63(3). P. 426–431.

3. *Kingma D. P., Welling M.* An Introduction to Variational Autoencoders // arXiv.org. 2019. URL: https://arxiv.org/abs/1906.02691

4. *McInnes L., Healy J., Astels S.* HDBSCAN: Hierarchical density based clustering In: Journal of Open Source Software, The Open Journal. Vol. 2, n. 11. 2017.

5. Supported Vector Machine (SVM) URL: http://statistica.ru/branches-maths/metodopornykh-vektorov-supported-vector-machine-svm/

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗАННЫХ С РЕЗОНАНСАМИ ХАОТИЧЕСКИХ ЗОН С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА ЯРКОВСКОГО

Э.Д. Кузнецов, А.Е. Розаев, Е. Плавалова

Уральский федеральный университет, Россия Ярославский государственный университет, Россия Математический институт Словацкой академии наук, Словакия E-mail: eduard.kuznetsov@urfu.ru

Ключевые слова: резонансы средних движений, хаотические зоны, эффект Ярковского, пары астероидов, численное моделирование.

Аннотация. Резонансы среднего движения двух и трех тел могут оказывать существенное влияние на динамику очень молодых близких пар и семейств астероидов. Наиболее известным примером является влияние резонанса 9:16 с Марсом на некоторые члены семейства Датуры. Эволюция этого семейства может быть правильно реконструирована только при учете резонансных эффектов. Одним из результатов резонансного возмущения может быть временная компенсация дрейфа большой полуоси, обусловленного влиянием эффекта Ярковского. В работе предложен метод определения положения и размера, связанных с резонансом хаотических зон с помощью численного интегрирования уравнений движения в случае сильного влияния эффекта Ярковского. Определены положения и размеры хаотических зон вблизи некоторых молодых пар астероидов. Сделан вывод о том, что резонансные возмущения могут играть важную роль в динамической эволюции очень молодых семейств астероидов и близких пар. Этот факт необходимо учитывать при построении моделей происхождения и динамической эволюции семейств и пар астероидов.

INVESTIGATION OF CHAOTIC ZONES ASSOCIATED WITH RESONANCES TAKING INTO ACCOUNT THE YARKOVSKY EFFECT

E. Kuznetsov, A. Rosaev, E. Plavalova

Ural Federal University, Russian Federation Yaroslavl State University, Russian Federation Mathematical Institute of the Slovak Academy of Sciences, Slovak E-mail: eduard.kuznetsov@urfu.ru

Keywords: Mean motion resonances, chaotic zones, Yarkovsky effect, asteroid pairs, numerical simulation.

Abstract. The mean motion resonances of the average motion of two and three bodies can significantly impact the dynamics of very young close pairs and families of asteroids. One of the resonant disturbance results may be the suppression of the semi-major axis drift caused by the influence of the Yarkovsky effect. We propose a method for determining the position and size of chaotic zones associated with resonance by numerically integrating the equations of motion in the case of a strong influence of the Yarkovsky effect. The positions and sizes of chaotic zones near some young asteroid pairs have been determined. It is concluded that resonant perturbations can play an essential role in the dynamic evolution of very young families and pairs of asteroids. This fact must be considered when constructing models of the origin and dynamic evolution of families and pairs of asteroids.

Введение. Более 100 лет назад было показано, что некоторые астероиды группируются в семейства, члены которых имеют сходные орбиты. Большинство семейств является старыми образованиями, сформировавшимися в результате столкновений между астероидами сотни миллионов и миллиарды лет назад. В настоящее время семейства астероидов интенсивно изучаются.

Новым и захватывающим событием последнего десятилетия стало обнаружение нескольких молодых семейств астероидов с очень малыми возрастами. Эти семейства интересны тем, что различные столкновительные и динамические процессы на этом интервале времени незначительно изменили их свойства. Недавние исследования показали, что некоторые семейства астероидов также могут быть результатом спин-индуцированного деления критически вращающегося родительского тела (кластеры деления). Кроме того, случаи последующего распада могут иметь место и в старых семействах. В результате этих процессов могут формироваться группы и пары астероидов на близких орбитах.

Важно, что возраст молодого семейства может быть определен путем численного интегрирования орбит его членов назад во времени и демон-

страции того, что они сходятся друг к другу в какой-то конкретный момент в прошлом. Метод интегрирования в прошлое работает только для семейств с возрастом менее нескольких миллионов лет.

Известны примеры резонансных возмущений молодых семейств и пар. Прежде всего, это семейство Датуры в резонансе 9:16 с Марсом (9 – 16М) [1]. Правец и др. [2] обратили внимание, что хаотическая эволюция орбит пары (49791) 1999 XF31 и (436459) 2011 CL97 может быть объяснена резонансом среднего движения 8 – 15М. Дадди и др. [3] указали, что пара (7343) Ockeghem и (154634) 2003 XX38 находится в трехтельном резонансе 2 - 1J - 1M. Наличие пар астероидов, находящихся в резонансах средних движений показывает актуальность работы.

Основная цель исследования – представить метод поиска резонансов в окрестности орбит очень молодых пар астероидов с использованием численного интегрирования орбит в предположении сильного влияния суточного эффекта Ярковского. В результате будут найдены новые примеры пар астероидов, близких к резонансу, и будет выполнена их классификация по степени возмущений.

Методика исследования. Для изучения динамической эволюции пар астероидов использовался пакет Mercury, а также выполнялось численное моделирование с помощью метода Эверхарта.

Для изучения взаимодействия рассматриваемой пары с резонансом и определения положения центра резонанса (центра хаотической зоны) применяется интегрирование орбит астероидов в предположении сильного влияния суточного эффекта Ярковского (при значении параметра $A_2 = =\pm 1 \cdot 10^{-13}$ a.e./сут.²).

Негравитационная сила Ярковского играет важную роль в эволюции орбит астероидов, прежде всего их больших полуосей. Трудно непосредственно измерить дрейф большой полуоси, обусловленный влиянием эффекта Ярковского или любые другие негравитационные константы, но максимальное его значение можно оценить нормализацией по параметрам астероида (101955) Bennu [4].

При численном интегрировании использовался негравитационный параметр A_2 . В общем случае при фиксированном эксцентриситете A_2 пропорционально скорости дрейфа большой полуоси орбиты da/dt. Зависимость между da/dt и A_2 для реальных пар астероидов близка к линейной, но только в среднем.

Однако некоторые факторы, в частности резонансы среднего движения, могут нарушить линейную эволюцию большой полуоси орбиты астероида под действием силы Ярковского. Как было отмечено в работе Броза и Вокрулицкого [5], в резонансе происходят монотонные изменения эксцентриситета вместо дрейфа большой полуоси. В результате резонансы могут оказать значительное влияние на эволюцию некоторых пар астероидов на близких орбитах. Основные резонансы среднего движения с Юпитером образуют хаотические зоны, нарушающие линейные изменения полуоси из-за дрейфа Ярковского. Кроме того, резонансы среднего движения с Марсом и трехтельные резонансы также могут обеспечить аналогичный эффект.

В ходе численного моделирования была исследована орбитальная эволюция фиктивного астероида с очень большим негравитационным дрейфом, обусловленным эффектом Ярковского: da/dt = 0.026 а.е./млн лет, с начальными значениями большой полуоси a = 2.175 а.е. и эксцентриситета e = 0.5. Гравитационные возмущения учитывались только от Юпитера. При прохождении астероидом через области резонансов средних движений с Юпитером, наблюдаются хаотические изменения большой полуоси орбиты. Во время прохождения зоны резонанса скорость дрейфа большой полуоси становится близкой к нулю.

Значение большой полуоси орбиты, соответствующее центру хаотической зоны, можно получить путем вычисления среднего между максимальным и минимальным значениями на интервале или среднего значения для всех точек в интервале, где дрейфа большой полуоси. Оба метода дают примерно одинаковые результаты, которые приведены в табл. 1. Для сравнения было рассчитано среднее значение большой полуоси орбиты Юпитера на интервале интегрирования и номинальные положения резонансов. Затем этот метод был применен для поиска резонансов в окрестности пар астероидов на близких орбитах и для характеристики взаимодействия членов пары с резонансом.

| Резонанс | Резонансное значение $a_{\rm res}$, a.e. | Центр хаотической зоны a_c , a.e. |
|----------|---|-------------------------------------|
| 3 – 11J | 2.18726 | 2.1875 |
| 2-7J | 2.25616 | 2.2564 |
| 3 – 10J | 2.33075 | 2.3307 |

Таблица 1. Значения большой полуоси орбиты, соответствующие центрам хаотических зон, связанных с резонансами

Результаты. В результате выполненного исследования найдены пары астероидов, большие полуоси орбит которых близки к резонансу, и выполнена их классификация по степени возмущений.

Пара (44620) 1999 RS43 – (295745) 2008 UH98 движется вблизи резонанса 2 + 9J – 4S. Резонанс блокирует дрейф большой полуоси за счет эффекта Ярковского для главного члена пары (44620) 1999 RS43. В то же время для второго астероида пары влияние резонансных возмущений на эволюцию большой полуоси орбиты не выявлено.

Пара (80218) 1999 VO123 – (213471) 2002 ES90 движется в окрестности резонанса 1 + 6J – 6S с центром хаотической зоны при $a_c = 2.218575$ а.е. При определенных значениях коэффициента A_2 , описывающего влияние

эффекта Ярковского, возможен переход меньшего из астероидов пары (213471) 2002 ES90 через резонанс.

Пара (355258) 2007 LY4 – (404118) 2013 AF40 движется в окрестности резонанса 2 + 10J - 7S с центром хаотической зоны при $a_c = 2.217453$ а.е. При некоторых значениях коэффициента A_2 , любой из астероидов пары может перейти через область резонанса. Сложно оценить влияние этих переходов на динамическую эволюцию этой пары ввиду ее молодости (возраст менее 10000 лет).

Выводы. В работе показано, что прохождение через резонансные области может сопровождаться ослаблением или подавлением дрейфа большой полуоси орбиты, обусловленного эффектом Ярковского.

Сделан вывод о том, что резонансные возмущения могут играть важную роль в динамической эволюции очень молодых семейств астероидов и близких пар. Этот факт необходимо учитывать при построении моделей происхождения таких пар и при исследовании их динамической эволюции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема № FEUZ-2020-0030.

Литература

1. *Nesvorny D., Vokrouhlicky D., Bottke W.F.* The Breakup of a Main-Belt Asteroid 450 Thousand Years Ago // Science. 2006. Vol. 312. P. 1490.

2. Pravec P., Fatka P., Vokrouhlický D., Scheirich P. u dp. Asteroid pairs: a complex picture // Icarus. 2019. Vol. 333. P. 429–463.

3. *Duddy S.R., Lowry S.C., Wolters S.D. u dp.* Physical and dynamical characterisation of the unbound asteroid pair 7343-154634 // Astron. Astrophys. 2012. Vol. 539. Id. A36.

4. *Кузнецов Э.Д., Розаев А.Е., Плавалова Е. и др.* Поиск молодых пар астероидов на близких орбитах // Астрономический вестник. 2020. Т. 54. №3. С. 260–277.

5. *Broz M., Vokrouhlicky D.* Asteroid families in the first-order resonances with Jupiter // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2008. Vol. 390. P. 715–732.

References

1. *Nesvorny D., Vokrouhlicky D., Bottke W.F.* The Breakup of a Main-Belt Asteroid 450 Thousand Years Ago // Science. 2006. Vol. 312. P. 1490.

2. *Pravec P., Fatka P., Vokrouhlický D. et al.* Asteroid pairs: a complex picture // Icarus. 2019. Vol. 333. P. 429–463.

3. Duddy S.R., Lowry S.C., Wolters S.D., Christou A., Weissman P., Green S.F., *Rozitis B.* Physical and dynamical characterisation of the unbound asteroid pair 7343-154634 // Astron. Astrophys. 2012. Vol. 539. id. A36.

4. *Kuznetsov E.D., Rosaev A.E., Plavalova E. et al.* A Search for Young Asteroid Pairs with Close Orbits // Solar System Research. 2020. Vol. 54. No. 3. P. 236–252.

5. *Broz M., Vokrouhlicky D.* Asteroid families in the first-order resonances with Jupiter // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2008. Vol. 390. P. 715–732.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Н.А. Кучерявченко, А.Г. Александрова, Н.А. Попандопуло

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия E-mail: aleksann@sibmail.com

Ключевые слова: численное моделирование, космический мусор, динамика околоземных объектов, геостационарная зона, численное моделирование.

Аннотация. При проведении исследований динамики космического мусора мы часто сталкиваемся с разноформатностью данных в различных каталогах околоземных объектов. Каталоги, как правило, являются пополняемыми и соответственно периодически приходится переобрабатывать данные из них и приводить их к требуемому исследователем формату. Кроме того, исследования динамики околоземных объектов требуют довольно частого получения однотипных графиков различных показателей для этих объектов. Мы постарались создать приложение, которое упростит работу с различными каталогами и поможет с расчетами и визуализацией динамических характеристик космического мусора. В данной работе речь идет о созданном программном обеспечении, и приводятся примеры его применения в исследовании динамики космического мусора в геосинхронной зоне на примере каталога ESA «Classification of geosynchronous objects.

SOFTWARE FOR STUDYING SPACE DEBRIS DYNAMICS

N. Kucheryavchenko, A. Aleksandrova, N. Popandopulo

National Research Tomsk State University, Russian Federation E-mail: aleksann@sibmail.com

Keywords: space debris, light pressure, positional observations, geostationary orbit, numerical simulation.

Abstract. We often come across different formats of data in various catalogs of near-Earth objects when conducting research on the dynamics of space debris. As a rule, catalogs are replenished and periodically it is necessary to process the data from them and bring them to the format required by the researcher. In addition, investigation of the dynamics of near-Earth objects requires rather frequent obtaining of the same type of graphs of various indicators for these objects. We have tried to create an application that will simplify the work with various catalogs and help with the calculation and visualization of the dynamic characteristics of space debris. In this paper we consider created software and give examples of its application in the study of dynamics of space debris in the geosynchronous region on an example of the ESA catalog "Classification of geosynchronous objects".

Численное моделирование является мощным средством решения задач динамики околоземных объектов искусственного происхождения. В насто-

ящее время существует множество программ для исследования динамики и мониторинга таких объектов: JSatTrak, Gpredict, SatPC32 и Wisat32, Orbitron и др. [1–3], с различной степенью доступа к ним. В настоящей работе речь пойдет о программном обеспечении (ПО), разработанном в НИИ ПММ ТГУ (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020661122), предназначенном для исследования динамики космического мусора – SDVEApp 1.0 (application for experiments and visualization of space debris characteristics), создание которого и было целью данной работы.

Приложение SDVEApp 1.0 в совокупности с «Численной моделью движения ИСЗ» [4] позволяет решать различные задачи по исследованию динамики космического мусора, включая работу с каталогами NORAD, ESA «Classification of geosynchronous objects», а также создание собственного каталог из выбранных объектов и собственных наблюдений.

SDVEApp-1.0 дает возможность:

 привести данные из упомянутых выше каталогов в формат, необходимый пользователю;

– рассчитать и построить трассу объекта;

– получить двумерные и трехмерные графики распределения объектов, включая распределение по большой полуоси и долготе;

– определить пространственную плотность распределения объектов;

– рассчитать сближения между объектами с построением соответствующих диаграмм и таблиц.

Прогнозирование движения околоземных объектов осуществляется при помощи подключения «Численной модели движения ИСЗ», также разработанной в НИИ ПММ ТГУ [4].

Продемонстрируем некоторые возможности программы на примеры геосинхронной области околоземного космического пространства, данные об объектах для которой брали из каталога ESA. Каталог ESA «Classification of geosynchronous objects» [5] представляет собой набор эфемерид более 1500 космических объектов, которые либо располагаются в геостационарной зоне, либо их орбиты пересекаются с геостационарными орбитами (GEO).

В этот каталог входят все объекты, которые находятся в базе данных DISCOS Database, в пределах следующих орбитальных классов GEO (геостационарные орбиты), IGO (наклонные геосинхронные орбиты) и EGO (орбиты из расширенной по большой полуоси области GEO [5]). В данном каталоге объекты приведены на различные моменты времени, а координатная система, в которой выражаются орбитальные элементы, состоит из: большой полуоси (*a*), эксцентриситета (*e*), наклонения (*i*), долготы восходящего узла, аргумент перигея и долготы (λ).



Рис. 1. Распределение объектов геосинхронной зоны в околоземном пространстве

Используя приложение SDVEApp, мы привели объекты к одному моменту времени (на последнюю базовую дату из каталога и построили распределение объектов в пространстве в декартовой системе (рис. 1, a), а также по большой полуоси и долготе (рис. 1, б). Выданные программой графики можно видеть на рис. 1. В рамках исследования динамики объектов геосинхронной зоны нас интересовало, как изменится распределение объектов в пространстве с течением времени, если считать все объекты каталога неуправляемыми. Как показали исследования, уже через 10 лет происходит довольно значительное изменение распределения объектов. Наиболее показательно данное изменение смотрится в переменных a, λ (рис. 1, б). Если на начальный момент времени объекты относительно равномерно распределены по долготе с незначительными пиками концентрации в окрестности устойчивых точек либрации и большими полуосями близкими к большой полуоси 42164 км, то через 10 лет (рис. 1, δ), происходит своеобразное стягивание объектов к устойчивым точкам либрации по подобию спирали. Рассчитанная пространственная плотность распределения объектов (рис. 1, в) также демонстрирует повышенную плотность распределения в окрестности устойчивых точек либрации через 10 лет после начала прогноза, что соответствует ранее полученным результатам с помощью различных программ и приложений.

В заключении можно сделать вывод, что разработанное программное обеспечение SDVEApp может успешно применяться в научной работе, значительно упрощая процесс исследования динамики космического мусора.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0721-2020-0049)

Литература

1. https://www.pe0sat.vgnet.nl/satellite/sat-information/tracking/

2. https://stltracker.github.io/

3. https://www.dlr.de/sc/en/desktopdefault.aspx/tabid-12766/22301 read-51854/

4. 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.

5. Classification of Geosynchronous Objects. 2018. Is. 20 / by ESA's Space Debris Office [Electronic resource]. URL: http://www.astronomer.ru

References

1. https://www.pe0sat.vgnet.nl/satellite/sat-information/tracking/

- 2. https://stltracker.github.io/
- 3. https://www.dlr.de/sc/en/desktopdefault.aspx/tabid-12766/22301_read-51854/

4. Aleksandrova A.G., Bordovitsyna T.V., Chuvashov I.N. Numerical modeling in problems of near-Earth object dynamics // Russian Physics Journal. 2017. Vol. 60. № 1. P. 80–89.

5. Classification of Geosynchronous Objects. 2018. Issue 20 / by ESA's Space Debris Office [Electronic resource]. URL: http://www.astronomer.ru

К ВОПРОСУ О НЕЛИНЕЙНОСТИ ЗАДАЧИ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ АСТЕРОИДОВ С МАЛЫМИ ПЕРИГЕЛИЙНЫМИ РАССТОЯНИЯМИ

О.Н. Летнер, Т.Ю. Галушина, О.М. Сюсина, В.А. Авдюшев

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

Ключевые слова: астероиды с малыми перигелийными расстояниями, доверительная область, показатель нелинейности.

Аннотация. В работе представлены результаты определения нелинейности задачи оценивания начальных параметров астероидов, имеющих малые перигелийные расстояния. Исследование показало,что из 48 астероидов, известных на июль 2020 года, для пяти задача классифицируется, как сильно нелинейная. В таких случаях для построения доверительных областей необходимо использовать нелинейные методы. На примере пяти астероидов с различной степенью нелинейности задачи оценивания построены начальные вероятностные области тремя методами: классическим линейным и

двумя нелинейными (методами возмущенных наблюдений и возмущенных оценок). Результаты исследования позволили сделать вывод, что для астероидов со слабой и умеренной нелинейностью области визуально не отличаются, а для случаев с сильной нелинейностью различия областей, построенных тремя способами существенно заметны.

ABOUT THE NONLINEARITY OF THE PARAMETERS ESTIMATION PROBLEM FOR THE ASTEROIDS WITH SMALL PERIHELION DISTANCES

O. Letner, T. Galushina, O. Syusina, V. Avdyushev

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

Keywords: Asteroids with small perihelion distances, confidence region, nonlinearity indicators.

Abstract. The paper presents the results of determining the nonlinearity of the problem of estimating the initial parameters for asteroids with small perihelion distances. The research showed that of the 48 asteroids known for July 2020, for five the problem is classified as strong nonlinear. In such cases, nonlinear methods should be used to construct confidence regions. On the example of five asteroids with different nonlinearity degrees of the estimation problem, the initial confidence regions were constructed by three methods: the classical linear and two nonlinear (the methods of the perturbed observations and of the perturbed estimates). The results of the study led to the conclusion that for asteroids with weak and moderate nonlinearity, the regions visually do not differ. For cases with strong nonlinearity the differences between the regions constructed in three ways are noticeable.

Исследование динамики астероидов, имеющих малые перигелийные расстояния, является важной задачей на пути к решению проблемы астероидной опасности. В силу особенностей своих орбит астероиды способны подходить к Земле незамеченными со стороны Солнца, в то время как достоверный прогноз их движения может дать нам информацию о вероятной опасности для Земли, исходящей от этих объектов. Поэтому обычно рассматривают вероятностную орбитальную эволюцию астероидов. Эта задача включает в себя два основных этапа: построение начальной доверительной области и отображение ее во времени. Выбор способа построения доверительной области при решении задачи оценивания зависит от степени ее нелинейности. Проблема сильной нелинейности возникает, как правило, когда астероид имеет небольшое количество наблюдений, распределенных на короткой орбитальной дуге. Классифицировать задачи на слабо или сильно нелинейные можно с помощью показателей нелинейности [1–4].

Работа посвящена определению нелинейности задачи оценивания начальных параметров астероидов с малыми перигелийными расстояниями. По состоянию на июль 2020 года известно 48 таких объектов. Нелинейность задачи оценивалась на основе показателя χ , подробно описанного в работах [3, 4]. С помощью данного показателя задачу оценивая можно классифицировать следующим образом. При χ <0.01 задача считается слабо нелинейной, для $0.01 \le \chi < 0.1$ – умеренно нелинейной, а при $\chi \ge 0.1$ можно говорить о сильной нелинейности. Согласно нашему исследованию для 31 из 48 астероидов задача является слабо нелинейной, для 12 – умеренной, и для 5 – сильно нелинейной. В качестве примера в табл. 1 для некоторых астероидов приведены перигелийное расстояние q, данные о наблюдениях (число наблюдений N и интервал наблюдений Δt в сутках) и значения коэффициента нелинейности χ . Астероиды расположены в порядке убывания значения показателя нелинейности.

| с малыми перигелииными расстояниями | | | | | | | |
|-------------------------------------|-----------------|----|-------------------|--------|--|--|--|
| Астероид | <i>q</i> , a.e. | Ν | Δt , сут. | χ | | | |
| 2013 HK11 | 0.14 | 22 | 6 | 2.3401 | | | |
| 2015 HG | 0.10 | 27 | 7 | 0.6511 | | | |
| 2005 HC4 | 0.07 | 53 | 12 | 0.0371 | | | |
| 2019 VE3 | 0.12 | 20 | 4 | 0.0297 | | | |
| 2004 QX2 | 0.13 | 24 | 18 | 0.0024 | | | |

Таблица 1. Оценка нелинейности некоторых астероидов с малыми перигелийными расстояниями

В сильно нелинейных случаях для построения доверительных областей не применимы привычные линейные методы, и приходится прибегать к более трудоемким, нелинейным. В линейном методе доверительная область определяется классическим способом, основанным на вероятных ошибках орбитальных параметров, получаемых из наблюдений путем решения задачи наименьших квадратов (НК). Центром области являются НКоценки начальных параметров. На основе полной ковариационной матрицы ошибок случайным образом формируется множество значений вероятных начальных параметров, распределенных по нормальному закону относительно выбранного центра. Начальная эпоха t0, определяется, как среднеарифметическая моментов наблюдений. В качестве нелинейных способов построения доверительных областей используются метод возмущенных наблюдений и метод возмущенных оценок. Идея их заключается во внесении малых возмущений либо в наблюдения, либо в оценки (в зависимости от используемого метода) и последующем многократном решении задачи наименьших квадратов.

Для астероидов из табл. 1 были построены начальные доверительные области тремя описанными способами. Исследование показало, что для 2004 QX2 нелинейность определяется, как слабая, для 2005 HC4, 2019 VE3 – умеренная, а для астероидов 2013 HK11 и 2015 HG нелинейность

можно смело классифицировать как сильную. Области, построенные для объектов со слабой и умеренной нелинейностью, визуально не отличаются друг от друга, а для астероидов с сильной – явно просматривается отличие нелинейных областей от линейной. В сильно нелинейном случае построение доверительных областей линейным методом недопустимо, так как высока вероятность получения недостоверных результатов. Для астероида 2019 VE3 мы усилили нелинейность путем выноса начального момента t0 за пределы интервала наблюдения. Эксперимент привел к значительному увеличению коэффициента нелинейности и к заметному отличию трех областей.

Таким образом, при построении доверительной области для слабо нелинейных задач можно использовать линейные методы, в то время как для сильно и умеренно нелинейных случаев необходимо применять нелинейные способы построения начальных областей.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0721-2020-0049).

Литература

1 Beale E.M.L. Confidence regions in non-linear Estimation // J. R. Statist. Soc. 1960. Vol. 22. N 1. P. 41–88.

2 Bates D.M., Watts D.G. Relative curvature measures of nonlinearity // J. R. Statist. Soc. 1980. Vol. 42. N 1. P. 1–25.

3 *Сюсина О.М., Черницов А.М., Тамаров В.А.* Построение доверительных областей в задаче вероятностного исследования движения малых тел Солнечной системы // Астрон. вестн. 2012. Т. 46. № 3. С. 209–222

3. Draper N.R., Smith H. Applied Regression Analysis. John Wiley & Sons, Inc. 1998. 706 p.

References

1. Beale E.M.L. Confidence regions in non-linear Estimation // J. R. Statist. Soc. 1960. Vol. 22. N 1. P. 41–88.

2. Bates D.M., Watts D.G. Relative curvature measures of nonlinearity // J. R. Statist. Soc. 1980. Vol. 42. N 1. P. 1–25.

3. Syusina O.M., Chernitsov A.M., Tamarov V.A. Construction of confidence regions in problem on probabilistic study into motion of minor bodies of the solar system // Sol. Syst. Res. 2012. Vol. 46, I. 3. P. 195–207.

4. Draper N.R., Smith H. Applied Regression Analysis. John Wiley & Sons, Inc. 1998. 706 p.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРБИТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГРУППЫ ГЕОСИНХРОННЫХ СПУТНИКОВ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА ПИКЕ ТЕРСКОЛ

Н.А. Попандопуло, В.А. Авдюшев, Т.В. Бордовицына, Т.Ю. Галушина, П.А. Левкина, Н.С. Бахтигараев, А.В. Шеин

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия Институт астрономии РАН, Россия Терскольский филиал ИНАСАН, Россия E-mail: nikas.popandopulos@gmail.com, ayvazovskaya@inasan.ru

Ключевые слова: геосинхронные спутники, позиционные наблюдения, орбитальные параметры.

Аннотация. Представлены результаты определения орбитальных параметров группы геосинхронных спутников по наблюдениям, полученным на уникальной научной установке Цейсс-2000 в ЦКП «Терскольская обсерватория» Института астрономии РАН в сентябре 2020 г. Вместе с элементами орбиты вычисляется параметр $\gamma = A/m$ (отношение площади миделевого сечения спутника к его массе), определяющий величину влияния светового давления на динамику объекта. Для трёх объектов с номерами 90008, 90031 и 97149 орбиты определяются достаточно надёжно, среднеквадратическая ошибка не превосходит 0,5 сек дуги и параметр γ близок к значению 0,01. Для объекта с номером 90214 среднеквадратическая ошибка близка к 4 сек дуги и параметр $\gamma = 0,097$. Динамика этого объекта требует дополнительного изучения.

DETERMINATION OF THE ORBITAL PARAMETERS FOR A GROUP OF GEOSYNCHRONOUS SATELLITES BASED ON OBSERVATIONS AT TERSKOL PEAK

N. Popandopulo, V. Avdyushev, T. Bordovitsyna, T. Galushina, P. Levkina, N. Bakhtigaraev, A. Shein

National Research Tomsk State University, Russian Federation Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation Terskol branch of INASAN, Russian Federation E-mail: nikas.popandopulos@gmail

Keywords: geosynchronous satellites, the positional observations, the orbital parameters.

Abstract. The report presents the results of determining the orbital parameters for a group of geosynchronous satellites based on observations obtained at the unique scientific facility Zeiss-2000 at the Terskol observatory of the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences. Together with the elements of the orbit, a parameter $\gamma = A/m$ (the ratio of the mid-section of the satellite to its mass), which is responsible for the magnitude of the influence of light pressure on the object's dynamics, was determined. For three objects numbered 90008, 90031, and 97149, the orbits are determined fairly reliably, the mean square error does

not exceed 0.5 seconds of arc, and the parameter γ is close to 0.01. For an object with the number 90214, the RMS error is close to 4 seconds of arc and parameter $\gamma = 0.097$. The dynamics of this object require further study.

На основании позиционных наблюдений, полученных в сентябре 2020 г. на уникальной научной установке Цейсс-2000 в ЦКП «Терскольская обсерватория» Института астрономии РАН, определены орбитальные параметры группы геосинхронных спутников. Данные о числе наблюдений и охваченной ими дуге орбиты приведены в табл. 1.

Вычисление пространственных положений объектов и определение их орбит производилось с помощью усовершенствованного программного математического обеспечения, использующего высокоточный программный комплекс «Численная модель движения систем ИСЗ» [1]. Численная модель основана на дифференциальных уравнениях (ДУ) движения, учитывающих как основные возмущающие факторы, так и тонкие эффекты. ДУ интегрируются численно коллокационным методом высокого порядка с переменным шагом в арифметике с двойной точностью. В процессе улучшения орбиты по данным измерений определялись начальные координаты и скорости объектов в рамках задачи наименьших квадратов, которая решается итерационно с помощью метода Гаусса–Ньютона [2]. В программном комплексе есть возможность вычисления коэффициента парусности, который определяется в результате поочередного улучшения совместно с параметрами орбиты

$$\gamma = A/m,$$

где *А* – площадь миделевого сечения спутника; *m* – масса спутника.

Данные об особенностях процесса улучшения орбит приведены в табл. 1. Здесь номера объектов даны согласно динамической базе данных космических объектов Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, σ — среднеквадратическая ошибка представления наблюдений, T — период обращения спутника.

| Номер объекта | Число наблюдений | Интервал наблюдений, сут | Дуга наблю- дений ° | σ, " | <i>А/m</i> , м ² /кг | Период обращения, ч |
|------------------|---------------------|--------------------------------|------------------------|-------|------------------------------------|---------------------------|
| 90008 | 219 | 0,0246 | 93,965 | 0,362 | 0,00978 | 23,935 |
| 90031 | 344 | 0,0345 | 114,717 | 0,480 | 0,00833 | 23,921 |
| 90214 | 302 | 0,0320 | 109,396 | 3,800 | 0,09720 | 23,929 |
| 97149 | 224 | 0,0233 | 50,990 | 0,403 | 0,01340 | 23,969 |

Таблица 1. Данные о процессе улучшения орбит

По улучшенным координатам и скоростям были найдены следующие ниже элементы орбит объектов.

| Объект № 90008 | | Объект № 90214 | | | |
|---|--|---|--|--|--|
| D : 20,64285 $\Omega = 308,67357^{\circ}$ $\omega = 237,80980^{\circ}$ $M = 183,2830^{\circ}$ | Эпоха : 23.09.2020 00:0 a = 42157,17189 км e = 0,014881 i = 4,34484° | $D0:20,04169$ $\Omega = 75,32925^{\circ}$ $\omega = 236,42489^{\circ}$ $M = 90,19563^{\circ}$ | | | |
| Объект № 90031 | | <i>Объект</i> № 97149 | | | |
| $\Omega:56,49999$ $\Omega = 319,63260^{\circ}$ $\omega = 351,49320^{\circ}$ $M = 87,31151^{\circ}$ | Эпоха : 23.09.2020 00:0 a = 42204,57492 км e = 0,016776 i = 4.32533° | $D0:58,16669$ $\Omega = 309,70210^{\circ}$ $\omega = 357,91229^{\circ}$ $M = 92,64826^{\circ}$ | | | |
| | 90008 0:20,64285 $\Omega = 308,67357^{\circ}$ $\omega = 237,80980^{\circ}$ $M = 183,2830^{\circ}$ 90031 0:56,49999 $\Omega = 319,63260^{\circ}$ $\omega = 351,49320^{\circ}$ $M = 87,31151^{\circ}$ | 90008Объект № $0:20,64285$ $\Omega = 308,67357°$ $\omega = 237,80980°$ $M = 183,2830°$ Эпоха : 23.09.2020 00:0 $a = 42157,17189$ км $e = 0,014881$ $i = 4,34484°$ 90031 Объект № $0:56,49999$ $\Omega = 319,63260°$ $\omega = 351,49320°$ $M = 87,31151°$ Эпоха : 23.09.2020 00:0 $a = 42204,57492$ км $e = 0,016776$ $i = 4,32533°$ | | | |

Как показывают данные, приведенные в табл. 1, элементы орбит трех из перечисленных выше объектов с номерами 90008, 90031 и 97149 определяются достаточно надёжно. Распределение невязок этих объектов очень близко по своей структуре. Для примера на рис. 1 показано распределение невязок для объекта 90008.



Рис. 1. Распределение невязок объекта № 90008 в зависимости от номера наблюдения

В отличие от орбит трех указанных объектов, орбита объекта с номером 90214 определяется с погрешностью на порядок большей. Кроме того, коэффициент парусности $\gamma = A/m$, полученный по наблюдениям, также на порядок больше, чем у других объектов (см. табл. 1). Объект, повидимому, имеет сложную геометрию или трехосное вращение, и поэтому простая модель светового давления, заложенная в динамической модели ИСЗ, оказывается достаточно грубой для моделирования движения этого объекта. Этот вопрос требует дополнительного исследования.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0721-2020-0049).

Литература

1. Александрова А.Г., Бордовицына Т.В., Чувашов И.Н. Численное моделирование в задачах динамики околоземных объектов // Изв. вузов. «Физика». 2017. Т. 60. № 1. С. 69–76.

2. *Авдюшев В.А.* Численное моделирование орбит небесных тел. Томск: Издат. Дом Томского государственного университета. 2015. 336 с.

References

1. Aleksandrova A.G., Bordovitsyna T.V., Chuvashov I.N. Numerical modeling in problems of near-Earth object dynamics. Russ Phys J. 2017. Vol. 60. No. 1. P. 69–76.

2. *Avdyushev V.A.* Numerical modeling of the orbits of celestial bodies. Tomsk: Tomsk State University Publishing House. 2015. 336 p.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДИНАМИКИ ОКОЛОЛУННЫХ ОБЪЕКТОВ

Н.А. Попандопуло, Т.В. Бордовицына, А.Г. Александрова, В.А. Авдюшев, И.В. Томилова

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

Ключевые слова: динамика окололунных объектов, время жизни спутника, механизм Лидова–Козаи.

Аннотация. Знание динамических особенностей окололунного пространства необходимо для его оптимального освоения. В данной работе было проведено моделирование движения 5180 искусственных спутников Луны (ИСЛ), равномерно распределенных в окололунном пространстве. Исследование выполнялось с помощью программы «Численная модель движения ИСЛ», разработанной авторами. Показано, что в ряде областей окололунного пространства время жизни ИСЛ на орбитах в зависимости от величины большой полуоси и наклонения весьма мало, и выяснены причины этого явления.

NUMERICAL MODELING OF THE DYNAMICS OF NEAR-LUNAR OBJECTS

N. Popandopulo, T. Bordovitsyna, A. Aleksandrova, V. Avdyushev, I. Tomilova

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

Keywords: dynamics of near-lunar objects, lunar satellite lifetime, Lidov-Kozai mechanism.

Abstract. Knowledge of the dynamic features of the near-lunar space is necessary for its optimal development. In this work, the motion of 5180 artificial Moon satellites (AMS), evenly distributed in the near-lunar space, was simulated. The study was performed using the program "Numerical model of the motion of AMS" developed by the authors. It is shown that in a number of regions of near-lunar space, the lifetime of objects in orbits depending on the magnitude of the semi-major axis and inclination is very small, and the reasons of this phenomenon are clarified.

В последнее время возрос интерес к исследованию окололунного пространства. Основное внимание сосредоточено на низких окололунных орбитах. При этом многие авторы, в частности [1], констатируют существование зависимости времени жизни спутника от высоты и наклонения орбиты. В данной работе мы пытаемся выяснить причины этого явления. Мы рассматриваем орбиты в диапазоне больших полуосей от 1,1 до 15 радиусов Луны с наклонениями от 0 до 180 градусов, а также для сопоставления наших результатов с результатами других авторов объекты с высотой полета 100 км. Моделирование выполняется на 10-летнем интервале времени с учетом возмущений от селенопотенциала до гармоник 50 порядка и степени, а также гравитационных влияний Солнца и Земли, рассматриваемых как материальные точки. Помимо определения времени жизни ИСЛ, мы приводим здесь результаты анализа особенностей динамики объектов, которые объясняют причины указанного выше явления.

Данные, приведенные на рис. 1, дают представление о главных особенностях динамики окололунных объектов. На рис. 1 (a, δ) показаны зависимости роста эксцентриситета и времени жизни ИСЛ от величин большой полуоси и наклонения по всему диапазону значений, а на рис. 1 (b, c) это картина детализирована для низколетящих объектов. Как мы видим рост эксцентриситета, сопровождаемый сокращением временем существования спутников на орбите, имеет место, как на низких, так и на высоких орбитах. Исследования показали, что причины, вызывающие это явление, различны на различных высотах, а для высоких объектов существенно коррелируют с величинами наклонений.



Рис. 1. Оценки роста эксцентриситета (*a*) и времени жизни спутника на орбите в зависимости от начальных значений наклонения и большой полуоси объектов на всем рассматриваемом диапазоне (б) для низколетящих спутников (*в*, *г*)

На низких орбитах рост эксцентриситета связан со сложной структурой гравитационного поля Луны. Показательно, что если учитывать лишь сжатие Луны, без особенностей поля, то ярко выраженный рост эксцентриситета отсутствует, и все объекты имеют время жизни более 10 лет. Причем для низких орбит достаточно роста эксцентриситета до 0,055 для падения ИСЛ поэтому у объектов на соседних по наклонению орбитах может быть очень разное время жизни. Например, при наклонении 4 градуса время жизни спутника на орбите составляет более 10 лет, а при 5 градусах – всего 38,5 суток. Данные результаты хорошо согласуются с результатами других авторами [1].

Чтобы объяснить причину роста эксцентриситета на средних и больших высотах, мы рассмотрели влияние механизма Лидова–Козаи [2–4] на орбитальную эволюцию ИСЛ. Проявлением этого механизма являются резонанс и эффекта Лидова–Козаи. Численно-аналитическая методика выявле-234 ния влияния вековых резонансов на орбитальную динамику объектов подробно описана в нашей работе [5]. Эффект Лидова–Козаи оценивался по наличию перекачки энергии между эксцентриситетом и наклонением при сохранении интеграла $c_1 = \sqrt{1 - e^2} \cos i$, а наличие острого резонанса Лидова–Козаи определялось по близости к нулю значения интеграла Лидова– Козаи при отрицательном значении интеграла Лидова $c_2 = (\frac{2}{5} - \sin^2 \omega \sin^2 i)e^2$.

Контуры областей влияния механизма (синий контур) и эффекта Лидова–Козаи (красный контур), полученные по нашим оценкам, приведены на рис. 1, *а*. Анализ результатов (рис. 1, *а*), говорит о том, что главным источником роста эксцентриситета на средних и высоких орбитах является влияние механизма Лидова–Козаи на динамику ИСЛ.

Рост эксцентриситетов на высоких околоэкваториальных орбитах объясняется прямым влиянием Земли.

Исследования показали, что значительная часть окололунных объектов имеет короткое время жизни на орбите, что объясняется ростом эксцентриситетов их орбит. Анализируя полученные результаты, можно сказать, что на низких орбитах это явление связано с прямым действием сложного гравитационного поля Луны, а на средних и высоких орбитах объясняется влиянием механизма Лидова–Козаи.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-10022).

Литература

1. *Gupta S., Sharma R.*: Effect of Altitude, Right Ascension of Ascending Node and Inclination on Lifetime of Circular Lunar Orbits, International Journal of Astronomy and Astrophysics, Vol. 1. No. 3. P. 155–163, 2011. DOI: 10.4236/ijaa.2011.13020

2. *Kozai, Y.* Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity // Astron. J. 1962. Vol. 67. P. 591 598.

3. *Lidov M. L.* The evolution of orbits of artificial satellites of planets under the action of gravitational perturbations of external bodies// Planetary and Space Science, 1962. Vol. 9. Is. 10. P. 719–759.

4. *Shevchenko I*.: The Lidov-Kozai effect - Applications in exoplanet research and dynamical astronomy, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43522-0

5. Александрова А.Г., Бордовицына Т.В., Попандопуло Н.А., Томилова И.В. Новый подход к вычислению вековых частот в динамике околоземных объектов на орбитах с большими эксцентриситетами // Изв. вузов. Физика, 2020. Т. 63. № 1 (745). С. 57–62. https://doi.org/10.1007/s11182-020-02003-9

References

1. *Gupta S., Sharma R.*: Effect of Altitude, Right Ascension of Ascending Node and Inclination on Lifetime of Circular Lunar Orbits, International Journal of Astronomy and Astrophysics, Vol. 1 No. 3. P. 155–163, 2011. DOI: 10.4236/ijaa.2011.13020

2. *Kozai, Y.* Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity // Astron. J. 1962. Vol. 67. P. 591–598.

3. *Lidov M.L.* The evolution of orbits of artificial satellites of planets under the action of gravitational perturbations of external bodies // Planetary and Space Science, 1962 Vol. 9, Is. 10. P. 719–759.

4. *Shevchenko I*.: The Lidov-Kozai effect - Applications in exoplanet research and dynamical astronomy, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43522-0

5. Aleksandrova, A.G., Bordovitsyna, T.V., Popandopulo, N.A. et al.: A New Approach to Calculation of Secular Frequencies in the Dynamics of Near-Earth Objects in Orbits with Large Eccentricities, Russ Phys J. Vol. 63, No 1. P. 64–70, 2020. https:// doi.org/ 10.1007/ s11182-020-02003-9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРБИТ ИЗБРАННЫХ ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА С БОЛЬШОЙ ПАРУСНОСТЬЮ

И.Н. Чувашов

Институт астрономии Российской академии наук, Россия E-mail: chuvashovin@gmail.com

Ключевые слова: космический мусор, световое давление.

Аннотация. В настоящее время в околоземном пространстве известны объекты космического мусора, имеющие отношения площади миделевого сечения к массе (коэффициент парусности) больше 10 м²/кг. Световое давление оказывает значительное влияние на движение этих объектов, и прогнозирование на длительные интервалы времени практически невозможно. Объекты с большим коэффициентом парусности представляют опасность для функционирующих космических аппаратов. В работе рассмотрено несколько способов моделирования ускорений от светового давления с использованием позиционных наблюдений таких объектов. В первом способе совместно с координатами и скоростями определяется коэффициент парусности. В последующих двух подходах задаются отличные друг от друга спутникоцентрические системы координат и определяются три компонента вектора ускорения вдоль осей этих систем координат. Показано, что последние два способа лучше минимизируют среднеквадратическую ошибку измерений и хорошо представляют наблюдения, а первый подход не всегда позволяет найти решение обратной задачи. Позиционные наблюдения и измерения блеска объектов космического мусора получены на комплексе телескопа Zeiss-2000 Терскольского филиала ИНАСАН.

NUMERIC MODELING OF ORBIT SELECTED OBJECTS OF SPACE DEBRIS WITH HIGH AREA-TO-MASS RATIO

I. Chuvashov

Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation E-mail: chuvashovin@gmail.com

Keywords: space debris, light pressure.

Abstract. Currently, in the near-Earth space is known space debris objects with midsection area to mass ratio (area-to-mass ratio) is higher than $10 \text{ m}^2/\text{kg}$. The light pressure has a significant influence on the motion of these objects, and prognosis for long time intervals practically impossible. Objects with a high area-to-mass ratio produce a risk to operational spacecrafts. In the paper discussed several ways to accelerations of light pressure simulation with the use of positional observations of such objects. In the first method we determined the area-to-mass ratio together with coordinates and velocities. The following two approaches are set object-center coordinate systems different from each other and define three components of the acceleration vector along the axes of these coordinate systems. It is shown that last two methods are better to minimize the mean square error of measurements, but the first approach is not always suitable to find a solution to the inverse problem.

На текущий момент в околоземном космическом пространстве насчитывается почти 41 тысяча объектов искусственного происхождения (https://www.space-track.org). Из них 90 процентов – объекты космического мусора, образовавшиеся в результате столкновений между собой или разрушения родительского тела. Наземными службами осуществляется постоянный мониторинг всей наблюдаемой совокупности объектов, поскольку они могут представлять угрозу для действующих космических аппаратов. Объекты космического мусора образуются в результате столкновения или разрушения аппаратов в космосе, и физические характеристики (масса, размеры) и форма вращения этих объектов не известны. Следовательно, прогнозирование движения таких объектов является непростой задачей: фрагменты космического мусора сложной формы могут испытывать трудно моделируемые изменения элементов орбиты под действием негравитационных эффектов, в первую очередь – светового давления.

Большая часть объектов околоземного пространства имеет небольшое отношение миделевого сечения к массе объекта (коэффициента парусности). Однако существуют объекты, которые имеют коэффициенты парусности, равные $10 \text{ м}^2/\text{к}$ г и более, что примерно в 1000-10000 раз превышает среднее значение. Прежде всего, это фрагменты обшивки, антенн или других легких элементов родительского тела. В статье [1] указывается предельное значение коэффициента парусности, равное $110 \text{ м}^2/\text{к}$ г.

Под действием светового давления движение таких объектов становится хаотическим, параметры орбит изменяются, в частности, возрастают амплитуды колебаний эксцентриситета, и орбита из изначально круговой превращается в вытянутую, высокоэллиптическую. Вместе с ростом колебаний орбитальных параметров растет и частота этих колебаний [2]. Для объектов с отношением коэффициента парусности больше 16 м²/кг эксцентриситет принимает такие значения, при которых объект входит в плотные слои атмосферы. Такое поведение орбитальных параметров приводит к тому, что орбиты этих объектов начинают пересекать зоны круговых орбит действующих спутников, что в свою очередь приводит к опасности столкновения и разрушения функционирующих аппаратов.

Учет светового давления, представленный в работе [3–4], для высокоточного моделирования может быть применен только к объектам, у которых площадь миделевого сечения не изменяется со временем, или это изменение описывается простым математическим законом. Оба условия не выполняются для объектов космического мусора, которые имеют не только неизвестные геометрические размеры, но и неизвестную форму вращения, меняющуюся со временем.

Все вышеупомянутое приводит к выводу, что световое давление нужно иначе учитывать для объектов космического мусора. Наблюдения объектов несут информацию о характере вращения объекта и соизмеримости геометрических размеров этого объекта. Чтобы извлечь эту информацию, необходимо выбрать систему координат, в которой можно смоделировать влияние радиационных сил. Введение системы координат, например, жестко связанной с вращением объекта, невозможно, так как вращение не стабилизировано ни по одной из осей, и сами оси вращения могут испытывать сильные прецессионные колебания. К тому же в такой системе координат сложно учитывать радиационное давление из-за явного отсутствия направления на Солнце. Одним из решений этой проблемы является задание системы координат, связанной с Землей, объектом и Солнцем:

Систему координат не обязательно задавать так, чтобы она была связана с Землей, объектом и Солнцем. Например, единичные векторы трех компонент ускорения (тангенциальной, нормальной и бинормальной) будут формировать другую спутникоцентрическую систему координат. В такой системе координат в определяемые параметры a_{τ,a_n,a_b} попадёт не только сила светового давления, но и другие слабые эффекты, действующие на объект.

Используя позиционные наблюдения объектов космического мусора №90073 и №91156, мы определили параметры орбиты этих объектов. Первый объект №90073 имеет небольшое коэффициент парусности равным примерно 0.02 м²/кг и длительный интервал наблюдаемости более 9 лет, включающий более 100 сеансов наблюдений и 2500 наблюдений. Объект №91156 наоборот интересен тем, что у него коэффициент парусности на длительном интервале времени (больше 15 дней) невозможно определить, так как итерационный процесс определения параметров орбиты объекта вместе с коэффициентом парусности расходится. Кроме того, у объекта №91156 за наблюдаемый интервал времени (3 года), вследствие влияния на движение светового давления, изменились орбитальные параметры.

Используя различные подходы в определении параметров модели светового давления, удалось снизить среднеквадратическую ошибку в определении орбиты объектов №90073 и №91156 в несколько раз. Следовательно, учет светового давления для объектов космического мусора возможен на больших интервалах времени. Существуют способы, которые

позволяют промоделировать этот эффект и извлечь эту информацию из наблюдений.

Таким образом, проведенное исследование показало, что орбиты объектов №90073 и №91156 хорошо определяются на длительном интервале времени. Учёт влияния светового давления для этих объектов позволяет почти в 20 раз снизить среднеквадратическую ошибку определения их орбит. Выявлено, что введение спутникоцентрической системы координат позволяет промоделировать эффекты, связанные со световым давлением.

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. Is. 4. P. 385–404.

2. *Кузнецов* Э.Д. О влиянии светового давления на орбитальную эволюцию геосинхронных объектов // Астрономический вестник. 2011. Т. 45, №5. С. 444–457.

3. IERS Standarts. - IERS Technical Note. Paris: Central Bureau of IERS, 1992.

4. Авдюшев В.А. Численное моделирование орбит. Томск: Изд-во НТЛ, 2010. 282 с.

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. Is. 4. P. 385–404.

2. *Kuznetsov E.D., Zakharova P.E., Glamazda D.V., Shagabutdinov A.I., Kudryavtsev S.O.* Light pressure effect on the orbital evolution of objects moving in the neighborhood of low-order resonances // Solar System Research, 2012. Vol. 46. Is. 6. P. 442–449.

3. IERS Standarts. - IERS Technical Note. Paris: Central Bureau of IERS, 1992. 150 p.

4. Avdyushev V.A. Numerical simulation of orbits. Tomsk: STL, 2010. 282 p.

Секция 5

Математическое и физическое моделирование технических и природных систем

Со-Председатели:

К.ф.-м.н., А.В. Азин К.ф.-м.н., А.П. Хрусталев

Прочность материалов Конструкционные материалы Теория упругости Колебания упругих тел Прикладная гидродинамика и гидравлика Математические методы механики Тепломассоперенос

Session 5

Mathematical and physical modeling of technical and natural systems

Co-Chairs:

Ph.D., Anton Azin Ph.D., Anton Khrustalev

Mathematical Applications in the Physical Sciences Mathematical Methods in Physics Theoretical and Applied Mechanics Mechanical Engineering Environmental Science and Engineering Structural Materials Engineering Thermodynamics, Heat and Mass Transfer

КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СТРУКТУРЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ СИБИРСКОГО КРАТОНА

А.Ж. Ахметов^{1,2}, И.Ю. Смолин^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия ²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия E-mail: ayan.akhmetov93@gmail.com

Ключевые слова: компьютерное моделирование, литосфера, верхняя мантия, напряженное состояние, геологический профиль.

Аннотация. В данной работе выполнено компьютерное исследование распределения напряженного состояния в глубинной структуре земной коры и верхней мантии на территории Якутско-Вилюйской изверженной провинции, которая входит в территорию Сибирского кратона. В рамках данной проблемы создана двумерная компьютерная модель глубинной структуры с использованием геологического профиля «Кратон-1980». Для описания особенностей физико-механических свойств слоёв земной коры и верхней мантии использована модель «Cratonic jelly sandwich». В ходе исследования напряженного состояния было выявлено, что распределение горизонтальных напряжений зависит от модели распределения физико-механических свойств земной коры. Локализация неупругой деформации происходит в районе верхней мантии. Характер распределения сдвиговых напряжений характеризуется кривизной слоёв земной коры и контрастностью физико-механических свойств. Работа имеет прикладное значение в горной промышленности для оценки распределения горизонтальных напряжений, необходимых во время ведения подземных работ.

COMPUTER ANALYSIS OF STRESS STATE OF STRUCTURE OF EARTH'S CRUST AND UPPER MANTLE OF SIBERIAN CRATON

A. Akhmetov^{1,2}, I. Smolin^{1,2}

¹National Research Tomsk State University, Russian Federation ²Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Russian Federation E-mail: ayan.akhmetov93@gmail.com

Keywords: computer modeling, lithosphere, upper mantle, stress state, geological profile.

Abstract. In this work, a computer investigation of the stress state distribution in the structures of earth's crust and upper mantle was realized in the Yakutsk-Vilyui large igneous province (LIP), which includes in the Siberian Craton. For problem research, the two-dimensional computer model of the deep structure was created using the geological profile "Craton-1980". The "Cratonic jelly sandwich" model was used to describe the features of physical and mechanical properties. In this research, it was found that the accumulation of inelastic strain occurs in the upper mantle. The characteristic of the shear stress distribution is determined by the curvature of the layers of the earth's crust. The distribution of horizontal stresses depends on the distribution model of the strength properties of the earth's crust. This

work has the applied importance in the mining industry to assess the distribution of horizontal stresses, which is required during underground works.

В настоящее время ввиду бурного развития компьютерных мощностей стало возможным исследование природных процессов с помощью компьютерного моделирования. В основе понимания природных геотектонических явлений, таких как субдукция, растяжения, коллизия и сдвиги, лежит фундаментальное представление о движениях литосферных плит, которые возникают в результате глубинных процессов мантийного слоя Земли [1, 2].

Поэтому исследование природных геотектонических процессов играет важнейшую роль в оценке и анализе эволюции Земли, необходимых для накопления фундаментальных научных знаний. На территории Сибирского кратона были проанализированы глубинные структурные слои земной коры и верхней мантии на предмет нахождения, содержания и освоения залежей полезных ископаемых. Представленные исследования были проведены с помощью геологических изысканий при помощи метода глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) за период 70–80-х гг. XX века.

Цель данной работы является анализ напряженного состояния земной коры и верхней мантии геологических участков Сибирского кратона. Задачами данной проблемы являются проанализировать физико-механические свойства слоёв литосферы на основе геофизических данных геологического профиля «Кратон-1980», оценить геодинамические особенности геологических объектов для получения дополнительных сведений, необходимые во время ведения подземных работ.

В качестве объекта исследования в данной работе была выбрана Якутско-Вилюйская среднепалеозойская крупная изверженная провинция, находящаяся на территории Сибирского кратона, представляющая собой крупную впадину, площадью около 300 тыс. км², выполненная отложениями мезо- и неопроторозоя, палеозооя и мезозоя. В рамках выполненной работы были использованы данные по структурно-геологическим моделям слоёв земной коры и верхней мантии глубиной порядка до 60 км. По территории Якутско-Вилюйской изверженной провинции проходит ряд профилей, один из которых - «Кратон-1980» [3]. Данный профиль имеет протяженность порядка 3 900 км и пересекает с запада на восток Восточную Сибирь, 495 км из них пролегает по территории исследуемой области. Структурные особенности геологического профиля проявляются в том, что на территории провинции наблюдается прогиб кристаллического фундамента на глубину порядка 10-12 км, также граница Мохо, обычно ориентированная на глубине 40 км на территории Сибирского кратона, в районе прогиба поднимается на уровень глубины 30–35 км. На основе полученных данных была создана двумерная компьютерная модель, где выделяется серия слоёв с неоднородными физико-механическими свойствами. Для описания пластических свойств горного массива в целом была использована модель «Cratonic jelly sandwich», представляющая собой изменение предела прочности геосреды с учетом угла внутреннего трения и изменения давления в зависимости от глубины, а также учитывающая разупрочнение геосреды в слоях земной коры с высокой температурой [4]. В рамках исследования напряженно-деформированного состояния глубинной структуры земной коры было проведено компьютерное моделирование с помощью конечно-разностного метода Уилкинса [5].



Рис. 1. Распределение горизонтальных напряжений на территории Якутско-Вилюйской КИП вдоль профиля «Кратон-1980»

На рис. 1 представлено распределение горизонтальных напряжений, которое соответствует распределению прочностных свойств слоёв литосферы. Данное распределение также влияет на концентрацию сдвиговых напряжений, расположенных вдоль границ слоёв земной коры и верхней мантии. Максимальные отрицательные значения напряжений сосредоточены в районе верхней мантии, где также сосредоточена высокая локализация пластической деформации. В районе границы Мохо наблюдается распределение положительных горизонтальных напряжений ввиду наличия резкого изменения физических свойств между земной корой и верхней мантии. Оценка напряженного состояния земной коры и верхней мантии представляет собой дополнительную информацию, используемую при ведении горных работ в ходе добычи полезных ископаемых. Это обусловливает прикладную значимость результатов численного моделирования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-90034.

Литература

1. Akhmetov A.Zh., Smolin I.Yu., Peryshkin Al.Yu. Numerical analysis of the state of stress and strain in the Yenisei Ridge based on the regional tectonic state in the Asian continent // Frattura ed Integrita Strutturale. 2019. Vol. 49. P. 190–200. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.49.20

2. *Cherepanova Yu., Artemieva I.M., Thybo H., Chemia Z.* Crustal structure of the Siberian craton and the West Siberian basin: An appraisal of existing seismic data // Tectonophysics. 2013. Vol. 609. P. 154–183. DOI: 10.1016/j.tecto.2013.05.004

3. Проект КРАТОН-1980 – 1978. Профиль п. Березево – п. Усть-Мая // Атлас «Опорные геолого-геофизические профили России». Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 год. Электронное издание. СПб/: ВСЕГЕИ, 2013. С. 21–22.

4. *Burov E.B.* Rheology and strength of lithosphere // Marine and Petroleum Geology. 2011. 28. P. 1402–1443.

5. *Wilkins M. L.* Computer Simulation of Dynamic Phenomena. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 246 p.

References

1. Akhmetov A.Zh., Smolin I.Yu., Peryshkin Al.Yu. Numerical analysis of the state of stress and strain in the Yenisei Ridge based on the regional tectonic state in the Asian continent // Frattura ed Integrita Strutturale. 2019. Vol. 49. P. 190–200. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.49.20

2. *Cherepanova Yu., Artemieva I.M., Thybo H., Chemia Z.* Crustal structure of the Siberian craton and the West Siberian basin: An appraisal of existing seismic data // Tectonophysics. 2013. Vol. 609. P. 154–183. DOI: 10.1016/j.tecto.2013.05.004

3. Project CRATON-1980 – 1978. Profile v. Berezevo – v. Ust-Maya // Atlas "Supporting geological and geophysical profiles of Russia." Deep seismic sections along the DSS profiles worked out from 1972 to 1995. Electonic edition. SPb: VSEGEI, 2013. P. 21–22. (in Rus.)

4. *Burov E.B.* Rheology and strength of lithosphere // Marine and Petroleum Geology. 2011. 28. P. 1402–1443.

5. *Wilkins M. L.* Computer Simulation of Dynamic Phenomena. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 246 p.

ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ЛЕДОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СУДОВ В ЛЕДОВОМ БАССЕЙНЕ

А.А. Добродеев^{1,2}

¹ Крыловский государственный научный центр, Россия ² Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Россия E-mail: cnii_krylova@mail.ru

Ключевые слова: погрешность, ледовый бассейн, результаты модельных испытаний, ледовое сопротивление.

Аннотация. Проведение модельного эксперимента в ледовом бассейне является наиболее точным методом получения информации об уровне ледовой нагрузки на морские инженерные сооружения и ледового сопротивления судов, так как позволяет подробно изучить физико-механические свойства льда, в котором выполняется эксперимент, а также сопоставить результаты измерений с физической картиной взаимодействия объекта со льдом. При этом рассуждения о точности результатов измерений с 246

использованием метода физического моделирования крайне сложно вести без оценки их погрешности. В литературе не описаны способы расчета погрешности результатов модельных испытаний в ледовом бассейне, что обусловлено рядом особенностей данного эксперимента. В работе рассмотрены основные факторы, влияющие на результаты модельных испытаний судов в ледовом бассейне, а также предпринята попытка оценки их погрешности. Исследования проводились на основе данных, полученных в ходе экспериментов с буксировочной моделью ледокольного судна, служащей эталоном при выполнении ежегодных калибровочных испытаний. Выполнена оценка погрешности измерений основных физико-механических свойств льда, используемых в расчетах ледопроходимости судна, проанализированы результаты многократных измерений ледового сопротивления.

UNCERTAINTY ASSESSMENT OF VESSEL'S ICE RESISTANCE MEASUREMENTS IN THE ICE TANK

A. Dobrodeev^{1,2}

¹Krylov State Research Centre, Russian Federation ²State Marine Technical University, Russian Federation E-mail: cnii krylova@mail.ru

Keywords: uncertainty, ice tank, model test results, ice resistance.

Abstract. The model tests in an ice tank are the most accurate method for obtaining information about the ice load on marine engineering structures and ice resistance of ships. Ice tests allow to study the physical-mechanical properties of model ice and to compare the loads measurement with the physical picture of ice-structure interaction. At the same time, it's extremely difficult to talk about the accuracy of physical modeling measurements without assessing the uncertainty. The methods for calculating the uncertainty of ice tests are not described in the literature due to a number of experiment's features. The main factors affecting the tests results are considered and an attempt to assess their uncertainty is made. The studies were carried out based on towing ice tests of an icebreaking vessel. This model is used for benchmark tests. The estimation of the measurement's uncertainty of the basic physicalmechanical properties of model ice, used in the calculations of the ship's ice performance, is carried out. The results of multiple measurements of the ice resistance from benchmark tests are also analyzed.

На сегодняшний день отсутствует международное единство по вопросу неопределённости измерений ледового сопротивления судов по результатам проведения модельных испытаний в ледовом опытовом бассейне. В рамках существующих рекомендаций Международного Комитета Опытовых Бассейнов (МКОБ) дано лишь определение общей погрешности измерений ледового сопротивления, которая представляет собой геометрическую сумму погрешностей используемого измерительного оборудования и случайной погрешности [1].

Расчет всех составляющих погрешности и внесение поправок в каждое из измерений по результатам проведения модельных испытаний в ледовом

бассейне не дает представления о неопределённости полученного результата, т.к. результат измерения после внесения в него поправки на известные систематические эффекты остаётся только оценкой значения измеряемой величины. Это обусловлено наличием случайных эффектов, не изученных в настоящее время, а также неточностью поправки результата на систематические эффекты. Причин возникновения таких эффектов несколько, но основными является:

 неточность знания влияния особенностей моделированного льда на результат измерений и неточное измерение величин, характеризующих его физико-механические свойства;

– субъективная систематическая погрешность, вносимая специалистом лаборатории при проведении измерений по существующим методикам определения физико-механических свойств льда (изготовление консольных балок при определении прочности льда на изгиб, нагружение льда при измерении прогиба, извлечение образцов льда для определения толщины моделированного льда и пр.);

 неточные знания физических констант при обработке результатов модельных испытаний (пересчет ледового сопротивления применительно к требуемым значениям толщины ледяного покрова и прочности льда на изгиб);

– изменчивость в повторных наблюдениях при, казалось бы, неизменных условиях измерений.

В мировой практике существует небольшое количество работ, посвященных изучению неопределенности экспериментов в ледовых условиях. Одной из таких работ являются исследования, проведенные канадским специалистом Dr. Ahmed Derradji-Aouat [2]. В своих исследованиях Derradji рассматривает результаты буксировочных испытаний модели ледокола Terry Fox. Среди российских специалистов вопросы оценки погрешности результатов модельных испытаний были рассмотрены в работах Е.Ю. Егоровой и М.П. Лобачева [3].

В настоящее время специалистами ледового бассейна ФГУП «Крыловский государственный научный центр» ведется работа по изучению вопросов оценки уровня неопределённости результатов модельных испытаний ледового бассейна. Одним из ее направлений является ежегодное проведение калибровочных испытаний модели ледокольного судна в заданных ледовых условиях при неизменных параметрах создания ледяного покрова. В ходе экспериментов выполняется измерение физико-механических свойств ледяного покрова, а также проводятся буксировочные испытания голого корпуса модели. Необходимость такого рода испытаний обусловлена расширением возможностей моделирования различных ледовых условий [4] и взаимодействия современных инженерных и гидротехнических сооружений со льдом. Практика проведения модельных испытаний в ледовом бассейне показывает, что основные физико-механические свойства моделированного льда не могут быть одинаковыми как в одном намороженном на всю площадь бассейна ледяном поле, так и нескольких полях, созданных по единой методике в разное время. Это обусловлено особенностями создания ледяного покрова и формирования его прочностных свойств.

Одним из основных параметров льда, который исследуется при испытании моделей судов, является прочность на изгиб. В работе подробно изучены результаты измерений прочности льда на изгиб для моделированного ледяного покрова толщиной 47 мм, намороженного в разное время, но в одинаковых условиях. Полученные данные показывают, что относительная погрешность измерений прочности льда на изгиб составляет 6,2%. Принимая во внимание тот факт, что данная характеристика ледяного покрова является основополагающей в определении ледового сопротивления судов, уровень погрешности является вполне допустимым.

Анализ результатов и особенностей проведения эксперимента показывает, что путей снижения погрешности в случае измерения прочности льда на изгиб нет. Относительная погрешность измерения линейных параметров балок составляет примерно от 1,5 до 2,5% и она обусловлена не инструментальной погрешностью, а погрешностью процедуры подготовки консольных балок и их ломки. В работе также представлены измерения толщины льда, выполненные в местах разрушения консольных балок, на основании которых сделан вывод об относительной погрешности этих измерений, которая в данном случае составляет 1,4%.



Рис. 1. Эталонная модель для проведения калибровочных испытаний в ледовом бассейне (*a* – общий вид модели; *б* – подводная часть модели)

Для проведения калибровочных испытаний в ледовом бассейне подобрана буксировочная модель ледокольного судна, взятая за эталон (рис. 1). В обычной практике модельных испытаний судов в ледовом бассейне расчет погрешности результатов эксперимента, используемых при построении зависимости ледового сопротивления от скорости движения, по стандартной методике показывает, что она получается большой. Это может быть обусловлено либо малым количеством задаваемых скоростей движения модели ввиду ограниченной протяженности моделированного ледового поля, либо возможным отличием зависимости скорости и ледового сопротивления от прямолинейной скорости, которая чаще всего применяется при анализе результатов экспериментальных исследований.

Основываясь на проведенных исследованиях, можно заключить, что используемая при анализе результатов статистика должна быть согласована с характером выборки. Резервом повышения точности измерений служит специальный тщательный анализ первичных данных, включая исследование физических причин, обусловливающих особенности выборки. В первую очередь, подлежит глубокому изучению допущение о равномерности ледового сопротивления в процессе движения модели. Эта проверка может включать в себя более глубокое изучение изменений во времени ледового сопротивления при движении модели. Непосредственной целью указанных действий должно явиться обоснование способа обработки первичных данных, включая установление оптимальной выборочной статистики. Не менее важным является также контроль физико-механических свойств льда на всем протяжении движения модели, а не только в выбранных нескольких точках площади бассейна. Стоит учитывать, что учет этого аспекта в снижении погрешности результатов испытаний в ледовом бассейне требует развития методов быстрого определения свойств льда, в частности, бесконтактных.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-20162-П).

Литература

1. Experimental uncertainty analysis for ship resistance in ice tank testing. International Towing Tank Conference (ITTC) – Recommended Procedures and Guidelines, 7.5 - 02.04 - 02.5, 2005, 16 p.

2. Derradji-Aouat A., 2004b. «Experimental uncertainty analysis for ship model testing in the ice tank», Proceedings of the 25th Symposium on Naval Hydrodynamics, Office of Naval Research, St. John's, Newfoundland and Labrador, Canada, August, 8–13, 2004.

3. Егорова Е.Ю., Лобачев М.П. Оценка погрешности результатов буксировочных испытаний эталонной модели МКОБ (HALMATIC) в глубоководном опытовом бассейне»: сб. ст. к 100-летию со дня рождения И.В. Гирса / Проблемы практического прогнозирования сопротивления воды движению судов, 2002. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. С. 60–85.

4. *Dobrodeev A.A., Sazonov K.E.* «Ice resistance calculation method for a ship sailing via brash ice channel», Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 2019. June 9–13, Delft, The Netherlands.

References

1. Experimental uncertainty analysis for ship resistance in ice tank testing. International Towing Tank Conference (ITTC) – Recommended Procedures and Guidelines, 7.5 - 02.04 - 02.5, 2005, 16 p.

2. *Derradji-Aouat A*. 2004b. «Experimental uncertainty analysis for ship model testing in the ice tank», Proceedings of the 25th Symposium on Naval Hydrodynamics, Office of Naval Research, St. John's, Newfoundland and Labrador, Canada, August, 8–13, 2004.

3. *Egorova E.Yu.* Lobachev MP, 2002. «Uncertainty evaluation of the towing benchmark tests of ITTC ships model (HALMATIC) in a deep-water tank», Proceedings dedicated to the 100th anniversary of I.V. Girsa. Problems of practical prediction of ships water resistance, St.Petersburg, Krylov State Research Centre. P. 60–85.

4. *Dobrodeev A.A., Sazonov K.E.* Ice resistance calculation method for a ship sailing via brash ice channel, Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 2019. June 9–13, Delft, The Netherlands.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ С УЧЕТОМ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

А.В. Землянов

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия E-mail: zem.aleks99@ispms.tsc.ru

Ключевые слова: остаточные напряжения, металлокерамические композиты, численное моделирование, разрушение, локализация пластической деформации.

Аннотация. Объектом исследования данной работы являются металломатричные композиты (ММК) и их термомеханическое поведение. Изотропная упругопластическая модель была использована для моделирования реакции алюминиевой матрицы на механическое воздействие, а упруго-хрупкая модель была использована для керамических частиц. Для исследования процессов зарождения и распространения трещин в керамических частицах был выбран критерий разрушения типа Губера с учетом локального напряженного состояния: объемное растяжение или объемное сжатие. Рассмотрены композиционные материалы с единичным включением, как реальные, так и идеальные (круглые). Композицию алюминия с карбидом бора охлаждали от точки плавления до комнатной температуры. Двумерные динамические краевые задачи решались численно методом конечных элементов с использованием пакета программ Abaqus/Explicit. Двумерные конечные элементы CPS4R и CPE4R были выбраны для формулировок плоского напряжения и плоской деформации соответственно. Процедуры VUMAT были разработаны для определения основных уравнений материалов.

NUMERICAL MODELING OF DEFORMATION AND FRACTURE OF METAL-CERAMIC COMPOSITES GIVEN RESIDUAL STRESSES

A. Zemlianov

National Research Tomsk State University, Russian Federation Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Russian Federation E-mail: zem.aleks99@ispms.tsc.ru

Keywords: residual stresses, metal-matrix composites, numerical simulation, fracture, plastic strain localization.

Abstract. The object of the study of this work is metal-matrix composite (MMC) and their thermomechanical behavior. An isotropic elastoplastic model was used to simulate the response of an aluminum matrix to mechanical impact, and an elastic-brittle model was used for ceramic particles. To investigate the processes of initiation and propagation of cracks in ceramic particles, the criterion of fracture of the Huber type was chosen, given the local stress state: volumetric tension or volumetric compression. A composite material with a single inclusion, both real and ideal (round), are considered. The aluminum-boron carbide composite was cooled from the melting point to room temperature. Two-dimensional dynamic boundary value problems were solved numerically by the finite element method using the Abaqus/Explicit software package. Two-dimensional finite elements CPS4R and CPE4R were chosen for plane stress and plane strain formulations, respectively. VUMAT routines have been developed to determine the constitutive equations of materials.

Металлокерамические композиционные материалы находят широкое применение в самых разнообразных отраслях промышленности, в том числе в авиакосмической, машиностроительной [1, 2]. В качестве матрицы используются легкие сплавы металлов, а в качестве упрочняющих частиц карбиды, оксиды. Композиционные покрытия на основе алюминиевой матрицы обладают высокой удельной прочностью и позволяют повысить надежность и износостойкость материала. Существуют разные способы изготовления композиционных материалов: лазерное плавление [3], твердофазные способы при спекании в условиях горячего прессования [4], метод холодного газодинамического напыления [5]. В числе нерешенных проблем – оценка остаточных напряжений, возникающих в результате нанесения покрытия. Известно, что композиты характеризуются существенной структурной неоднородностью, которая обусловлена неоднородной геометрией упрочняющих частиц, а также разницей механических и термических свойств между матрицей и частицами (модуль Юнга и коэффициент теплового расширения). При нанесении композиционного покрытия методом лазерного наплавления, как матрица, так и частицы нагреваются до температуры плавления алюминия, а затем охлаждаются до комнатной температуры. В результате неравномерного сжатия материалов при охлаждении возникают термические остаточные напряжения.


Рис. 1. Экспериментальная (*a*) и модельные структуры композиционного покрытия (*б*, *в*)

Работа посвящена численному исследованию термомеханического поведения композиционного материала из алюминиевого сплава 6061, армированного частицами карбида бора В₄С. Модельная микроструктура композита в явном виде учитывает сложную форму частиц (рис. 1). Двумерные динамические краевые задачи решаются численно в постановках плоского напряженного и плоского деформированного состояний с использованием метода конечных элементов пакета программного обеспечения Abaqus/Explicit. Упруго-хрупкий отклик керамического материала описывается с помощью модифицированного критерия разрушения типа Губера. Упруго-пластические свойства матрицы описываются кривой пластического течения с деформационным упрочнением.

Проведены три типа термомеханических расчетов композита: 1) охлаждение из расплава до комнатной температуры; 2) сжатие из начального ненапряженного и недеформированного состояния; 3) охлаждение из расплава до комнатной температуры с последующим сжатием.

Выявлены области образования локальных сжимающих и растягивающих напряжений в металлической матрице и керамических частицах. При охлаждении композиционной структуры возникают объемные растягивающие напряжения. Установлено, что локализация пластической деформации и концентрация остаточных напряжений в матрице и частице зависят от вида внешней нагрузки. При внешнем растяжении происходит зарождение и распространение трещин в керамической частице в направлении, перпендикулярном приложению нагрузки.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00273).

Литература/ References

1. *Zhirong Liao [et al.]*. State-of-the-art of surface integrity in machining of metal matrix composites, 2019, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 143. P. 63–91. Doi: 10.1016/j.ijmachtools.2019.05.006

2. Pushpendra Kumar Jain, Prashant Baredar, S.C.Soni. Development Of Silicon Carbide Particle Reinforced Aluminium 6101 Metal Matrix Composite Using Two-Step Stir Casting, 2019, Materials Today: Proceedings, 18, p. 3521–3525. Doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.281

3. *Gopinath Muvvala, Debapriya Patra Karmakar, Ashish Kumar* Nath. Monitoring and assessment of tungsten carbide wettability in laser cladded metal matrix composite coating using an IR pyrometer, 2017 / Journal of Alloys and Compounds, 714, p. 514–521. Doi: 10.1016/j.jallcom.2017.04.254

4. *Pramanik A., Basak A.K.* Fracture and fatigue life of Al-based MMCs machined at different conditions, 2018, Engineering Fracture Mechanics, 191, p. 33–45. Doi: 10.1016/j.engfracmech.2018.01.013

5. *Tom Peat [et al.]*. The erosion performance of cold spray deposited metal matrix composite coatings with subsequent friction stir processing, 2017, Applied Surface Science, 396, p. 1635–1648. Doi: 10.1016/j.apsusc.2016.10.156.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАСКРЫТИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗМЕНЯЕМОЙ КОНФИГУРАЦИИ

В.Н. Зимин, А.В. Крылов, Г.Н. Кувыркин, А.О. Шахвердов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия E-mail: zimin@bmstu.ru

Ключевые слова: конструкции, привод, эффект памяти формы.

Аннотация. Крупногабаритные космические конструкции изменяемой конфигурации представляют собой многозвенные системы, состоящие из большого числа взаимосвязанных между собой отдельных элементов. Конструкции доставляются на космические орбиты в сложенном плотноупакованном транспортном состоянии и дальнейшее приведение их в рабочее положение связано с реализацией процесса раскрытия под действием силовых приводов. Размеры космических конструкций изменяемой конфигурации в транспортном и рабочем состояниях могут отличаться в десятки раз. Трансформация космических конструкций происходит за счет использования различных силовых приводов. В процессе раскрытия таких систем возникают динамические нагрузки ударного характера на их элементы. В качестве активных элементов силовых приводов предлагается использовать материалы с эффектом памяти формы. В ходе количественных и качественных исследований проволок с эффектом памяти формы типа никелида титана выявлены некоторые характеристики, важные для их применения в качестве силовых приводов для обеспечения безударного управляемого раскрытия трансформируемых космических конструкций изменяемой конфигурации. Предложена методика расчёта силового привода, которая базируется на математической модели его функционирования с учётом полученных экспериментальных данных.

MATHEMATICAL MODELING OF DEPLOYMENT DYNAMICS OF LARGE TRANSFORMABLE SPACE STRUCTURES

V. Zimin, A. Krylov, G. Kuvyrkin, A. Shakhverdov

Bauman Moscow State Technical University, Russian Federation E-mail: zimin@bmstu.ru

Keywords: space structures, deployment, actuator, shape memory effect, model.

Abstract. Large-sized space structures of transformable configuration are multilink systems consisting of a large number of interconnected elements. The structures are delivered into space orbits in a folded, tightly packed transport state and after that the deployment under the action of force actuators takes place to bring them into working position. Dimensions of the transformable space structures in transport and operating states can differ tens of times. The transformation of space structures occurs due to the use of various force actuators. In the process of opening such systems, dynamic shock loads occur on their elements. As active elements of force actuators, it is proposed to use materials with the shape memory effect. From quantitative and qualitative studies of wires with shape memory effect made of titanium nickelide, some characteristics important for their application as the force actuators to ensure controlled deployment of the transformable space structures are obtained. The procedure of the force actuator calculation is proposed, which is based on the mathematical model of its operation and take into account the obtained experimental data.

Введение. Интенсивное развитие космической техники ставит задачи создания принципиально новых технических систем. К таким системам относятся трансформируемые конструкции, т.е. системы, схема которых допускает автоматическое изменение конфигурации. Конструкции доставляются на околоземную орбиту в плотноупакованном транспортном состоянии, при достижении необходимых параметров рабочей орбиты осуществляется раскрытие системы или её трансформация [1, 2]. Неизбежное усложнение конструктивных схем трансформируемых систем изменяемой конфигурации вследствие повышения их эксплуатационных функциональных возможностей приводит к необходимости разработки все более сложных математических моделей. Вопросы математического моделирования и динамики таких систем – предмет широкого исследования учёных, инженеров и разработчиков уникальных трансформируемых крупногабаритных космических конструкций. Особое значение при проектировании и создании таких крупногабаритных космических систем приобретает разработка математической модели конструкции, адекватно описывающей её механические свойства. Чтобы воссоздать условия космического пространства в наземных экспериментах требуются дорогостоящие стенды обезвешивания и уникальные по размерам вакуумные камеры. Проведение полномасштабных физических экспериментов оказывается чрезвычайно дорогостоящим делом. Поэтому математический эксперимент, использующий разрабатываемые механические модели крупногабаритных космических систем изменяемой конфигурации с идентифицированными параметрами, представляется реальной возможностью проверки и обоснования функциональной пригодности проектируемой системы. Изменение конфигурации космических конструкций происходит под воздействием силовых приводов, в качестве которых могут быть применены различного рода пружины или электродвигатели. В процессе трансформации конфигурации конструкций возникают динамические нагрузки на элементы систем, которые носят ударный характер. Для исключения ударных динамических нагрузок предлагается использовать силовые приводы из материала с эффектом памяти формы (ЭПФ) [3–5].

Математическая модель конструкции изменяемой конфигурации. Наиболее простой, но в то же время достаточно хорошо учитывающей особенности трансформируемых конструкций расчётной схемой является система абсолютно твёрдых тел, связанных между собой шарнирными узлами. Массы и моменты инерции твёрдых тел принимаются равными массами и моментами инерции реальных элементов конструкции.

Уравнения движения следует представить в наиболее общем виде

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right)^T - \left(\frac{\partial T}{\partial q_k} \right)^T + \left(\frac{\partial \Phi_i}{\partial q_k} \right)^T \lambda_i = Q_k, \quad k = \overline{1, K}$$

совместно с уравнениями связей, записанными в форме алгебраических соотношений

$$\Phi_i(q_k,t) = 0, \quad i = 1, N,$$

где K – число обобщенных координат; N – число связей; T – суммарная кинетическая энергия; Φ_i – уравнения связей; Q_k – обобщенные приложенные силы; λ_i – множитель Лагранжа (силы реакции в связях); $\dot{q}_k = dq_k / dt$, t – время; q_k – обобщенные координаты. Дифференцирование уравнений системы (1) сводится к системе дифференциальных уравнений второго порядка, численное интегрирование которых позволяет проводить расчет раскрытия космических конструкций изменяемой конфигурации.

В качестве силовых приводов, способных обеспечить безударное раскрытие трансформируемых конструкций, могут быть использованы приводы с ЭПФ. Для успешного применения силовых приводов с ЭПФ для раскрытия крупногабаритной космической конструкции изменяемой конфигурации необходимо определить форму активного элемента, вид его напряжённо-деформированного состояния, а также функциональные возможности силовых элементов, которые будут использоваться в приводах. В предлагаемом силовом приводе применён активный элемент, изготовленный из материала никелида титана, обладающего ЭПФ. Характерными особенностями привода являются его миниатюрность и малый вес. Эти особенности обусловлены простотой механизма действия привода, а также тем, что активный (исполнительный) элемент привода изготовлен из одного материала. Проволока из материала никелида титана обладает способностью к деформированию при низких температурах и к сохранению этих деформаций до тех пор, пока она не нагрета. Общая деформация проволоки складывается из упругой, температурной и фазовой деформаций. Фазовая деформация может достигать весьма большой величины (более 10%). Если продеформированную проволоку из материала никелида титана нагреть, то ранее достигнутая фазовая деформация будет сниматься (материал «вспоминает» свою форму).

Шарнирные узлы космической конструкции изменяемой конфигурации должны обеспечивать большие угловые смещения смежных звеньев во время её раскрытия при относительно небольших изменениях длин активных проволочных элементов приводов с ЭПФ. Определяющие соотношения материалов с ЭПФ, представляющие зависимости деформаций от напряжений, температуры и доли фазового состава, являются существенно нелинейными. Это вызывает большие математические трудности при расчёте силовых характеристик (зависимостей «сила–перемещение») приводов из материалов с ЭПФ.



Рис. 1. Результаты экспериментальных исследований активного элемента первоначальной длины 460 мм: *а* – изменение продольного усилия; *б* – изменение относительного удлинения; *1* – температура; *2* – усилие; *3* – удлинение

Для определения деформационно-силовых характеристик активных элементов силового привода были проведены экспериментальные исследования. В процессе исследований активные проволочные элементы из материала никелида титана подвергались различным видам температурной обработки. Затем они растягивались до относительного удлинения порядка 8...10%. При пропускании электрического тока активные проволочные элементы нагревались до температуры начала обратных мартенситных превращений материала никелида титана. Проволочные активные элементы начинали восстанавливать свою первоначальную длину, при этом в них развивалось продольное усилие порядка 900...1200 Н. Время срабатывания активного проволочного элемента определялось временем его прогрева до температуры окончания мартенситных превращений (рис. 1).

В процессе испытаний изменения относительного удлинения и продольного усилия, создаваемого активным элементом силового привода, происходили плавно. Эксперименты подтвердили, что время срабатывания привода существенно уменьшается при увеличении напряжения источника питания. При этом рабочий ход активного элемента оставался практически постоянным, несмотря на различие времени срабатывания привода.

Модель функционирования привода. В процессе наземных испытаний можно принять, что изменение тепловой энергии активных элементов привода равно количеству теплоты, поступившему за счет электрической энергии минус тепловые потери от естественной конвекции

$$cm\frac{dT}{dt} = RI_1^2 - \alpha S(T - T_c), \qquad (1)$$

где c – удельная теплоемкость; m – масса активного элемента; T – температура активного элемента; t – время; R – сопротивление материала активного элемента; I_1 – сила тока в активном элементе при испытаниях; α – коэффициент теплообмена; S – площадь поверхности теплообмена; T_c – температура окружающей среды.

При нахождении на орбите можно принять, что изменение тепловой энергии активного элемента привода равно количеству теплоты, поступившему за счет электрической энергии минус тепловые потери от излучения на орбите

$$cm\frac{dT}{dt} = RI_2^2 - \varepsilon\sigma_0 T^4 S, \qquad (2)$$

где I_2 – сила тока в активном элементе на орбите; ε – относительный коэффициент лучеиспускания (степень черноты); σ_0 – постоянная Стефана– Больцмана. Найдем равновесные температуры из (1) и (2) при условии $\frac{dT}{dt} = 0$

$$\overline{T}_1 = \frac{RI_1^2}{\alpha S} + T_c, \qquad \overline{T}_2 = \sqrt[4]{\frac{RI_2^2}{\varepsilon \sigma_0 S}}.$$
(3)

Напряжение источника питания определяется по формуле

$$U = RI$$

Тогда соотношение (3) можно представить в виде

$$\overline{T}_1 = \frac{U_1^2}{\alpha SR} + T_c, \qquad \overline{T}_2 = \sqrt[4]{\frac{U_2^2}{\varepsilon \sigma_0 SR}}, \qquad (4)$$

где U₁, U₂ – напряжения источников питания на земле и в космосе.

Примем, что равновесные температуры на земле и в космосе одинаковы $\overline{T_1} = \overline{T_2}$, тогда из (4) получим

$$\frac{U_1^2}{\alpha SR} + T_c = 4 \sqrt{\frac{U_2^2}{\varepsilon_0 \sigma_0 SR}}$$
 (5)

Преобразуем (5) к виду

$$U_2 = \sqrt{\varepsilon \sigma_0 SR} \left(\frac{U_1^2}{\alpha SR} + T_c \right)^2.$$
 (6)

Заключение. Предварительные испытания активных элементов приводов из материала никелида титана подтвердили принципиальную возможность создания привода для раскрытия космических конструкций. Силовые приводы из материалов с ЭПФ, для управления деформациями которых используется изменение температуры, пригодны для весьма медленных движений космических конструкций изменяемой конфигурации. Они могут обеспечить «управляемое» плавное раскрытие таких систем, исключающее динамические нагрузки ударного характера на конструктивные элементы при срабатывании замковых устройств, фиксирующих раскрытое рабочее состояние трансформируемых космических конструкций. Процесс нагрева активного проволочного элемента при наземных испытаниях можно описать с помощью уравнения теплового баланса на основе закона сохранения энергии. Изменение электрического сопротивления активного элемента существенно меняет динамику процесса его нагрева. Поэтому при расчёте учитывались изменения сопротивления и теплоемкости активных проволочных элементов. Результаты расчетов изменения температуры активных проволочных элементов хорошо коррелируются с результатами экспериментальных исследований.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования России (проект 0705-2020-0047).

Литература

1. Механика больших космических конструкций / Н.В. Баничук, И.И. Карпов, Д.М. Климов и др. М.: Факториал, 1997. 302 с.

2. Zikun Z., Zimin V.N., Krylov A.V., Churilin S.A. Investigation of dynamics of transformable space structure movement / AIP Conference Proceedings 2103, 020020 (2019); https://doi.org/10.1063/1.5099884.

3. Likhachev V.A., Razov A. I., Cherniavsky A.G., Kravchenko Y., & Trusov S.N. (1994, March). Truss mounting in space by shape memory alloys. In Proceedings of the First International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, California, USA (p. 245–248).

4. *Schiedeck F., Hemsel T., Wallaschek J.* The use of shape memory alloy wires in actuators // Solid state Phenomena, 2006. Vol. 113. P. 195–198.

5. Методика проектирования силовых приводов из материала с эффектом памяти формы для ракетно-космической техники / В.А. Барвинок, В.И. Богданович, А.А. Грошев и др. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6. С. 272–277.

References

1. Banichuk N.V. et al. 1997 Mechanics of Large Space Structures (Moscow: FAKTORIAL)

2. Zikun Z., Zimin V.N., Krylov A.V., Churilin S.A. Investigation of dynamics of transformable space structure movement / AIP Conference Proceedings 2103, 020020 (2019); ttps:// doi.org/10.1063/1.5099884.

3. Likhachev V.A., Razov A.I., Cherniavsky A.G., Kravchenko Y. & Trusov S.N. (1994, March). Truss mounting in space by shape memory alloys. In Proceedings of the First International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, California, USA (p. 245–248).

4. *Schiedeck F., Hemsel T., Wallaschek J.* The use of shape memory alloy wires in actuators // Solid state Phenomena, 2006. Vol. 113. P. 195–198.

5. *Barvinok V.A. et al.* 2013 Method of designing force actuators made of shape memory material for rocket and space technology Proceedings of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Vol 15 6. P 272–277.

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАПУСКА БПЛА С ПОМОЩЬЮ НАЗЕМНЫХ ПУСКОВЫХ УСТАНОВОК

К.К. Исмаилов^{1,2}, А.А. Старков¹, К.В. Костюшин¹

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия ²TOO «KazTechInnovations», г. Алматы, Казахстан E-mail: mendikjan@ftf.tsu.ru

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат (БПЛА, БЛА), пусковая установка, пневматическая катапульта, моделирование.

Аннотация. Работа посвящена математическому моделированию процессов запуска беспилотных летательных аппаратов с механических и пневматических пусковых установок. Решаются уравнения Ньютона с учетом инерции рабочего тела и движущихся компонентов катапульты, сил трения, аэродинамического сопротивления каретки, и сил со стороны беспилотного летательного аппарата: подъемной силы, силы сопротивления и силы тяги работающей силовой установки в момент запуска. Исследовались пусковые установки с приводами в виде эластичного резинового жгута, пружин, пневмоцилиндров и определялись наиболее эффективные схемы пусковых установок в зависимости от взлетных характеристик БПЛА. По результатам исследований спроектированы пусковые установки для запуска ТГУ-БПЛА взлетной массой 7 кг и БПЛА «Nimbus» взлетной массой 18 кг. Результаты расчетов показывают достаточную точность для выбора схемы пусковой установки при проектировании.

NUMERICAL STUDIES OF UAV LAUNCH USING GROUND LAUNCHERS

K. Ismailov^{1,2}, A. Starkov¹, K. Kostyushin¹

¹ National Research Tomsk State University, Russian Federation ² "KazTechInnovations" LLP, Almaty, Republic of Kazakhstan E-mail: mendikjan@ftf.tsu.ru

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV), UAV launcher, pneumatic launcher, simulation.

Abstract. The paper presents results of the mathematical simulation of unmanned aerial vehicles launch from mechanical and pneumatic launchers. Newton's equations are being solved and it takes into account the inertia of the actuators and moving components of the launcher, the friction forces, aerodynamic drag of the carriage, and forces from the unmanned aerial vehicle: lift, drag and propulsion. Launchers considered are driven by elastic rubber ropes, springs, pneumatic cylinders and the most effective launcher schemes are being determined depending on the take-off characteristics of the UAV. Based on the research results, launchers were designed to launch a TSU-UAV with a take-off weight of 7 kg and a "Nimbus" UAV with a take-off weight of 18 kg. The calculation results show sufficient accuracy for the choice of the launcher configuration during a launcher design.

Современные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) самолетного типа, несмотря на широкое использование легких композиционных материалов в конструкции, имеют сравнительно высокие значения взлетной массы и ограниченны в габаритах. Для достижения наиболее оптимальных аэродинамических и эксплуатационных показателей при проектировании БПЛА конструкторам, решая уравнения существования самолета, нередко приходится увеличивать нагрузку на крыло. Для безопасного взлета такого БПЛА необходимо ему сообщать минимальную скорость, превышающую скорость сваливания. Для этого используются наземные пусковые установки, приводами в которых служат упругие эластичные резиновые жгуты, пружины, инерционные накопители энергии или пневмоцилиндры. Наибо-

лее оптимальная схема пускового устройства зависит от взлетных характеристик БПЛА. Поэтому вопросы проектирования пусковых установок, дополняющих беспилотный авиационный комплекс, являются актуальными.

Цель данной работы – моделирование процессов запуска БПЛА с помощью пусковой установки для дальнейшего выбора ее наиболее оптимальной схемы с точек зрения стоимости, технологичности, эксплуатации и эффективности запуска.

В работе рассматриваются пусковые установки, приводящиеся в действие за счет упругой энергии эластичного резинового жгута, пружины или энергии сжатого газа. Концептуальная компоновка представляет собой каретку с БПЛА, движущейся по направляющим. Каретка механически связана с приводом пусковой установки с помощью троса и системы блоков. Для моделирования решаются уравнения движения каретки, учитываются силы инерции подвижных частей пусковой установки, силы реакций, силы сопротивления движению и силы со стороны БПЛА. Силы упругости для пружин рассчитываются на основе закона Гука; для резиновых жгутов учитываются их гистерезисные свойства, и расчет силы упругости производится по аппроксимационной кривой снятия напряжения из экспериментальных данных [3]. Для пневматических пусковых установок учитывается ограничение скорости поступления газов (дросселирование) из рессиверов в пневмоцилиндры [4]. Данные уравнения решаются численно методом Рунге-Кутты второго порядка [1]. Начальные условия задаются исходя из физических характеристик пусковой установки. Для получения наиболее оптимальных характеристик запуска производилась параметризация задачи, в которой варьировались характеристики конструкции и привода пусковой установки: длина разгонных направляющих, жесткость и длина жгута, пружины или объем и давление газа в рессиверах, площадь поршня в пневмоцилиндрах. Контролировались перегрузки и сообщаемая скорость разгона БПЛА. Решение задачи производилось итерационным способом до получения требуемых характеристик пусковой установки. В качестве начального приближения берутся характеристики конструкции и привода пусковой установки, рассчитанные на основе закона сохранения энергии.

Исследования динамики взлета с помощью пусковой установки проводились для БПЛА ТГУ и БПЛА «Nimbus». БПЛА ТГУ спроектирован в Томском государственном университете, имеет взлетную массу 7 кг и минимальную скорость полета 14 м/с [2]. БПЛА «Nimbus» имеет взлетную массу 18 кг и минимальную скорость полета 16 м/с, спроектированный в ТОО «KazTechInnovations», г. Алматы, Казахстан. По результатам исследований и оптимального поиска были спроектированы пусковые установки: для ТГУ-БПЛА – с приводом в виде эластичного резинового жгута (ПУ ТГУ-БПЛА), для БПЛА «Nimbus» – с пневматическим приводом (ПУ БПЛА «Nimbus»).



Рис. 1. Расчетные и экспериментальные данные контрольных запусков

Для проверки результатов расчетов были проведены контрольные измерения сообщаемой скорости. Результаты расчетов и экспериментальные данные приведены на рис. 1. При проведении экспериментальных пусков производилось метание контрольной массы. В роли контрольной массы в ПУ ТГУ-БПЛА использовался короб 0.35×0.2×0.35 м, и в ПУ БПЛА «Nimbus» – короб 0.3×0.15×0.6. Измерения скорости проводились методом фото- и видеофиксации. Наблюдаются заниженные значения измеренных данных в сравнении с рассчетными. Для ПУ ТГУ-БПЛА занижение (17%) связано с неточностью снятия измерений характеристик жгута, производившихся вне лабораторных условий. Для ПУ БПЛА «Nimbus» занижение (9%) связано с соразмерностью длительности пуска (0.5 с – для контрольной массы 4 кг, и 0.9 с – для контрольной массы) и продолжительности открытия клапана (0.3-0.5 с). Несмотря на удовлетворительную точность, методика позволяет выполнить моделирование процессов запуска БПЛА с пусковой установки, и получить оценку характеристик конструкции и привода пусковой установки для ее проектирования.

Научное исследование (№ 8.2.31.2019) выполнено при поддержке Программы повышения конкурентоспособности ТГУ.

Литература

1. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы: учеб. пособие. М.: Наука. 1987. 600 с.

2. Исмаилов К.К., Кагенов А.М., Костюшин К.В., Орлов С.А. Разработка цифровой модели БПЛА самолетного типа // 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». 23–27 ноября 2020 года. Москва. Тезисы. М.: Перо, 2020. С. 59–60.

3. Семенов В.К., Белкин А.Е. Математическая модель вязкоупругого поведения резины при циклическом нагружении / Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014, №2 (647). С. 46–51.

4. *Черный Г.Г.* Газовая динамика: учеб. для университетов и втузов. М.: Наука. 1988. 424 с. ISBN 5-02-013814-2.

References

1. *Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobel kov G.M.* Chislennye metody [Numerical methods], Moskow, Nauka Publ., 1987. 600 p.

2. *Ismailov K.K, Kagenov A.M., Kostyushin K.V., Orlov S.A.* Development of plane type UAV digital model // 19th International Conference "Aviation and Cosmonautics" (Avia Space-2020), 23–27 November, 2020. Moskow. Abstracts. – Publishing house "Pero", 2020. P. 59–60.

3. Semenov V.K., Belkin A.E. Matematicheskaya model' vyazkouprugogo povedeniya rezin pri tsiklicheskom nagruzhenii [Mathematical model of the viscoelastic behavior of rubber under cyclic loading] / Izvestiya Vysshykh Uchebnykh Zavedenii. Mashinostroenie [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2014, no. 2 (647). P. 46–51.

4. *Chernyi G.G.* Gasovaya dinamika [Gas Dynamics], Moskow, Moskow, Nauka Publ., 1988. 424 p. ISBN 5-02-013814-2.

МЕДЛЕННЫЕ ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В СРЕДЕ С РАЗЛОМАМИ

А.А. Казакбаева¹, И.Ю. Смолин^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия ²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия E-mail: aigerim_@bk.ru

Ключевые слова: деформационные возмущения, численное моделирование, разлом, медленные движения.

Аннотация. Медленные деформационные возмущения возбуждаются главным образом естественными процессами в земной коре и литосфере и проявляются в изменениях сейсмической активности и геофизических полей. Прямые измерения медленных деформационных возмущений затруднительны из-за их очень низкой скорости и частоты. Выделяются два основных типа медленных деформационных волн: межразломные и внутриразломные. Основное различие в характере распространения этих зон заключается в том, что в случае передачи деформационного возбуждения от разлома к разлому, значение скорости межразломной волны заключено в интервале от 20 до 30 км/год и более. Если же возбуждение процессов протекает в пределах одной разломной зоны (внутриразломная волна), то скорость меняется от 10 до 4 км/год и менее. Целью исследования было численное изучение возникновения и развития медленных волн в нелинейных упругопластических средах, содержащих разломы. 264

SLOW DEFORMATION PERTURBATIONS IN A MEDIUM WITH FAULTS

A. Kazakbaeva¹, I. Smolin^{1,2}

¹National Research Tomsk State University, Russian Federation ²Institute of Strength Physics and Materials Science of SB RAS), Russian Federation E-mail: aigerim @bk.ru

Keywords: deformation perturbations, numerical modeling, fault, slow motion.

Abstract: Slow deformation perturbations are generated mainly by natural processes in the Earth's crust and lithosphere and are manifested in changes in seismic activity and geophysical fields. Direct measurements of slow deformation perturbations are difficult due to their very low velocity and frequency. There are two types of slow deformation waves: interfault and intra-fault. The main difference in the nature of the propagation of these zones is that in the case of transfer of deformation excitation from fault to fault, the value of speed of the inter-fault wave is in the range from 20 km/year to 30 km/year. If the excitation of processes occurs within a single fault zone, i.e. intra-fault wave, the speed varies from 10 km/year to 4 km/year. The aim of our research was to study numerically the origin and development of slow waves in nonlinear elastic-plastic media with faults.

Исследование пространственно-временной миграции современных геодинамических процессов является, с одной стороны, одной из наиболее интересных проблем геодинамики, с другой, одной из наиболее дискуссионных проблем. Основные явления, изучаемые в современной геодинамике – это деформационные и сейсмические процессы, а также взаимосвязанные с ними вариации геофизических и флюидо-геохимических полей. Часто сейсмичность относят к современной геодинамике. Это так, поскольку сейсмичность это «быстрая» составляющая геодинамического процесса. Современные движения (деформации), естественно, относятся к «медленной» части спектра геодинамических явлений. Поэтому в последние годы среди специалистов утвердилась тенденция медленные движения именовать современной геодинамикой (или деформационными процессами), а все связанное с землетрясениями определять как сейсмические процессы [1].

Деформационные волны Земли – одно из наиболее ярких предположений в теоретической геофизике последней трети XX века. Успехи теоретических исследований вызвали большой интерес к поиску возможностей экспериментального обнаружения эффектов распространения волн этого типа, и, прежде всего, к интенсивному исследованию миграции землетрясений. Именно с попыток объяснить причину направленной миграции землетрясений, обнаруженной Ч. Рихтером в 1958 г. в Северо-Анатолийском разломе в Турции, и тем самым разрешить одну из возникших проблем сейсмологии началось активное формирование концепции деформационных волн Земли. Миграция землетрясений связана с распространением тектонических напряжений, вызывающих дополнительную нагрузку и, как следствие, последовательное возникновение сильных землетрясений в сегментах разломов с высокой концентрацией упругих напряжений [2].

Формирование концепции деформационных (тектонических) волн Земли в значительной степени развивалось на основе двух сделанных к тому времени открытий: миграции очагов сильных землетрясений вдоль глубинных разломов и глобальной тектоники плит. Представления о литосферных плитах, разделенных мощными разломами и подстилаемых вязкой астеносферой, привели к построению трех типов теоретических моделей деформационных волн: 1) слоевых моделей (литосфера – астеносфера); 2) слоевых моделей с добавлением эффекта изгиба жесткой литосферной плиты; 3) моделей разломов с вязкой прослойкой между бортами (вязкоупругие). Эти модели были предназначены для описания медленных волн напряжений, соответствующих миграции сильных землетрясений вдоль трансформных разломов и желобов (впадин). Второй этап развития теории деформационных волн Земли начался после опубликования В.Н. Николаевским статьи [3], в которой было, по сути, постулировано уравнение синус-Гордона для моделирования в блоковой геологической среде медленных уединенных волн. Признаки этих волн наблюдались в виде миграции аномалий геофизических полей вблизи разломов. Наблюдаемое поведение пространственно-временной миграции современных деформаций в разломных зонах и динамики сейсмической активности имеет качественное сходство с общими представлениями о возбудимых активных средах, допускает предположение об автоволновом характере деформационного процесса в разломно-блоковой геосреде и может служить физической мотивацией применения «автоволновых» аналогий при математическом моделировании направленной миграции деформаций и землетрясений [2].

В работах П.В. Макарова с соавт. было предложено два варианта моделей для описания медленных деформационных волн в упругопластических средах в рамках механики деформируемого твердого тела [4]. В первом случае механическая континуальная модель дополняется клеточными автоматами, а во втором случае задается специфический вариант упрочнения и релаксации напряжений в теории пластического течения.

Цель данной работы заключалась в изучении методами численного моделирования особенностей формирования медленных деформационных возмущений в упругопластической среде с разломами.

Для описания процессов генерации и распространения медленных деформационных возмущений в работе применялась численная модель, объединяющая в себе континуальную модель упругопластической среды с критерием текучести Друкера–Прагера с алгоритмом клеточных автоматов для регулирования условий распространения неупругих деформаций.

Исследовалось поведение участка среды с разломом в условиях одноосного сжатия при реализации алгоритма клеточных автоматов в окрестности фон Неймана для передачи медленного возмущения. Были построены

модельные карты сред с двумя разломами. В первой модельной карте протяженные разломы уходят к границам среды (рис. 1, a). Вторая модельная карта содержит короткие разломы в центре расчетной области (рис. 1, δ).



Рис. 1. Структурные карты модельной среды с разломами и условиями нагружения (*a*), (б) и распространение деформационных фронтов в них (*в*), (*г*)

В результате проведенных исследований, получено, что фронты деформационных возмущений приближаются друг к другу примерно с одинаковыми скоростями, их форма немного меняется с течением времени, и при встрече они аннигилируют, уменьшая область, не охваченную неупругой деформацией (рис. 1, *в*). Из рис. 1, *г* видно, что в вершинах разломов генерируются два фронта медленной деформационной волны, которые распространяются в межразломной зоне навстречу противолежащему разлому. Основное продвижение фронта идет по двум взаимно перпендикулярным направлениям, причем вертикальное продвижение всегда больше горизонтального.

Таким образом, показано, что форма распространяющихся фронтов медленных возмущений в среде с очагами деформаций имеет разную форму в зависимости от наклона и длины разломов.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ № 19-17-00122.

Литература

1. *Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика опасных разломов // Физика земли. 2016. № 5. С. 87–101.

2. Быков В.Г. Предсказание и наблюдение деформационных волн земли // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 721–754.

3. *Николаевский В.Н.* Математическое моделирование уединенных деформационных и сейсмических волн // Доклады АН. 1995. Т. 341. №3. С. 403–405.

4. *Макаров П.В., Перышкин А.Ю*. Моделирование «медленных движений» – автоволн неупругой деформации в пластичных и хрупких материалах и средах // Физическая мезомеханика. 2016. Т. 19. № 2. С. 32–46.

References

1. *Kuzmin Yu.O.* Modern geodynamics of dangerous faults // Physics of the earth. 2016. No 5. P. 87–101.

2. *Bykov V.G.* Prediction and observation of earth's deformation waves // Geodynamics and tectonophysics. 2018. Vol. 9. No 3. P. 721–754.

3. *Nikolaevsky V.N.* Mathematical modeling of solitary deformation and seismic waves // Reports of AS. 1995. Vol. 341. No 3. P. 403–405.

4. *Makarov P.V., Peryshkin A.Yu.* Modeling of «slow movements» or inelastic deformation autowaves in ductile and brittle materials and media // Physical mesomechanics. 2016. Vol. 19. No 2. P. 32–46.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКРУТКИ ГАЗА ПРИДОННОЙ ОБЛАСТИ ВОСХОДЯЩЕГО ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА

А.О. Казачинский, И.Ю. Крутова

Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ (СФТИ НИЯУ МИФИ), Россия E-mail: a.kazachinskij@gmail.com

Ключевые слова: газовая динамика, система уравнений газовой динамики, торнадо.

Аннотация. В работе исследуется природное явление – восходящий закрученный поток газа, примером может служить торнадо и тропически циклон, а именно, придонная его часть, где наблюдаются наибольшие разрушения. Для этого рассмотрена одна характеристическая задача Коши с начальными условиями на горизонтальной плоскости z = 0 для системы уравнений газовой динамики (СУГД). При этом значение вертикальной составляющей вектора скорости газа $\omega = 0$, т.е. газ через плоскость z = 0 не течет. В случае общих пространственных изэнтропических течений непроницаемая плоскость z = 0 является контактной характеристикой кратности 2. Для того чтобы рассматриваемая задача с начальными данными при z = 0 имела единственное решение, необходимо на другой поверхности задать два дополнительных условия. Взят случай, когда на некотором цилиндре ненулевого радиуса радиальная составляющая вектора скорости газа u = -Const, а окружная v = 0.

Решение задачи строится в виде отрезка ряда по степеням z. Коэффициенты ряда зависят от остальных независимых переменных t,r,φ . Для численного решения применяется модифицированный метод характеристик, в котором сетка задается до начала счета.

MODELING OF THE BOTTOM PART OF ASCENDING TWISTING GAS FLOWS

A. Kazachinsky, I. Krutova

Snezhinsk Physics and Technology Institute MEPhI (SPTI MEPHI) E-mail: a.kazachinskij@gmail.com

Keywords: gas dynamics, system of equations for gas dynamics, tornado.

Abstract. There are a number of mostly destructive natural phenomena such as tornadoes, tornadoes, tropical cyclones. The bottom part of ascending twisting gas flows is constructed analytically and numerically. For a system of equations of gas dynamics one characteristic Cauchy problem with initial conditions on the horizontal plane z=0 is considered. In the case the value of the vertical component of the gas velocity vector w=0, that is gas does not flow through the plane z=0. In the case of general spatial isentropic currents, the impermeable plane z=0 is the contact characteristic of multiplicity 2. In order for a given task with initial data on z=0 to have a single solution, you must specify 2 additional conditions on the other sur-face. The case is taken when on a non-zero radius cylinder the radial component of the gas velocity vector u=-Const, and the circumferential component v=0.

1. Введение. Разрушительная сила таких явлений как атмосферные вихри (торнадо, смерчи, огненные торнадо, тропические циклоны) проявляется на протяжении всей истории человечества, предупреждение о возникновении и борьба с подобными явлениями являются актуальными по сей день. Заблаговременное распознавание и разработка методов борьбы с данными явлениями возможны при детальном рассмотрении газодинамических параметров, а именно: изучение течений политропного газа как сплошной среды в восходящих закрученных потоках.

Поставлены следующие цели: математическое моделирование течений газа в условиях действия сил тяжести и Кориолиса в окрестности непроницаемой горизонтальной плоскости численными и аналитическими методами. Численное построение трехмерных стационарных спиральных течений, описывающих движение воздуха в придонных частях торнадо и тропических циклонов.

Были решены следующие задачи: математическое численное моделирование нестационарных трехмерных течений сжимаемого вязкого теплопроводного газа в восходящем закрученном потоке. Постановка начальнокраевых задач для полной системы уравнений Навье–Стокса, задающих нестационарные трехмерные течения вязкого сжимаемого теплопроводного газа в восходящих закрученных потоках. Разработка программ. Сопоставление расчётных данных газодинамических характеристик с данными натурных наблюдений.

Для решения поставленных задач применяются надежные и современные методы аналитического и численного моделирования движения сжимаемого газа со свойствами теплопроводности и вязкости. Используется адекватная математическая модель – полная система уравнений Навье– Стокса. Приближенное решение задачи строится аналитически и численно с использованием начального отрезка ряда, задающего это аналитическое решение. Поставленные начально-краевые задачи численно решаются в расчетной области по явной конечно-разностной схеме.

2. Задача о течении газа в окрестности непроницаемой горизонтальной плоскости

В цилиндрической системе координат СУГД в условиях действия силы Кориолиса для изэнтропических течений политропного газа имеет следующий вид:

$$\begin{cases} c_{t} + uc_{r} + \frac{v}{r}c_{\varphi} + wc_{z} + \frac{(\gamma - 1)}{2}c(u_{r} + \frac{u}{r} + \frac{v_{\varphi}}{r} + w_{z}) = 0\\ u_{t} + uu_{r} + \frac{v}{r}u_{\varphi} - \frac{v^{2}}{r} + wu_{z} + \frac{2}{(\gamma - 1)}cc_{r} = av - bw\cos\varphi\\ v_{t} + uv_{r} + \frac{uv}{r} + \frac{v}{r}v_{\varphi} + wv_{z} + \frac{2}{(\gamma - 1)}\frac{c}{r}c_{\varphi} = -au + bw\sin\varphi\\ w_{t} + uw_{r} + \frac{v}{r}w_{\varphi} + ww_{z} + \frac{2}{(\gamma - 1)}cc_{z} = bu\cos\varphi - bv\sin\varphi - g \end{cases}$$
(1)

Для СУГД (1) рассмотрена одна конкретная характеристическая задача Коши с начальными данными на горизонтальной плоскости z = 0. Для системы (1) на плоскости ставятся следующие начальные данные:

$$\begin{cases} c(\mathbf{t},\mathbf{r},\varphi,\mathbf{z})\big|_{z=0} = c_0(\mathbf{t},\mathbf{r},\varphi) \\ u(\mathbf{t},\mathbf{r},\varphi,\mathbf{z})\big|_{z=0} = u_0(\mathbf{t},\mathbf{r},\varphi) \\ v(\mathbf{t},\mathbf{r},\varphi,\mathbf{z})\big|_{z=0} = v_0(\mathbf{t},\mathbf{r},\varphi) \\ w(\mathbf{t},\mathbf{r},\varphi,\mathbf{z})\big|_{z=0} = 0 \end{cases}$$
(2)

Последнее из начальных условий (2) обеспечивает непротекание газа через плоскость z=0. В этом случае поверхность z=0 является контактной поверхностью, и поскольку рассматриваются изэнтропическике течения газа, то контактная поверхность для СУГД является характеристикой кратности два.

Задача (1, 2) есть характеристическая задача Коши стандартного вида и имеет единственное аналитическое решение при выполнении необходимых условий разрешимости характеристическая задача Коши и задании двух дополнительных условий: 270

$$u(t, r, \varphi, z)\Big|_{r=r_{in}} = u_{in} = const < 0; v(t, r, \varphi, z)\Big|_{r=r_{in}} = 0$$
 (3)

при соответствующих условиях согласования

$$u_{0}(\mathbf{t},\mathbf{r},\varphi)\big|_{r=r_{in}} = u_{in}; v_{0}(\mathbf{t},\mathbf{r},\varphi)\big|_{r=r_{in}} = 0$$
(4)

Приведенные условия (3) передают заданный на поверхности цилиндра $r = r_{in}$ постоянный приток газа во внутреннюю область, ограниченную этим цилиндром. При этом на поверхности цилиндра притока $r = r_{in}$ газ закрутку не имеет. Решение задачи (1–4) описывает течение газа в окрестности непроницаемой плоскости z = 0, когда через поверхность вертикального цилиндра заданного ненулевого радиуса $r = r_{in}$ осуществляется заданный приток газа. При этом необходимо ввести сток газа при $r = r_0, 0 < r_0 < r_0 < r_{in}$. [1]

Решение поставленной характеристической задачи Коши представимо в виде бесконечного сходящегося ряда по степеням z:

$$U(t,r,\varphi,z) = \sum_{k=0}^{\infty} U_k(t,r,\varphi) \frac{z^k}{k!}; U_k(t,r,\varphi) = \frac{\partial^k U(t,r,\varphi,z)}{\partial z^k} \bigg|_{z=0}$$
(5)

где вектор U имеет в качестве координат искомые функции c, u, v, w. [1, 3, 5]

3. Аналитическое и численное решение

Рассмотрим для задачи (1–4) вопрос выполнимости необходимых условий разрешимости этой характеристическая задача Коши. Эти условия возникают в процессе построения решения рассматриваемой характеристической задачи Коши в виде сходящегося бесконечного ряда (5). Если в системе (1) положить z = 0 и учесть начальные условия (2), то получаются следующие соотношения:

$$\begin{cases} c_{0t} + u_0 c_{0r} + \frac{v_0}{r} c_{0\varphi} + \frac{(\gamma - 1)}{2} c_0 (u_{0r} + \frac{u_0}{r} + \frac{v_{0\varphi}}{r} + w_1) = 0\\ u_{0t} + u_0 u_{0r} + \frac{v_0}{r} u_{0\varphi} - \frac{v_0^2}{r} + \frac{2}{(\gamma - 1)} c_0 c_{0r} = av_0\\ v_{0t} + u_0 v_{0r} + \frac{u_0 v_0}{r} + \frac{v_0}{r} v_{0\varphi} + \frac{2}{(\gamma - 1)} \frac{c_0}{r} c_{0\varphi} = -au_0\\ \frac{2}{(\gamma - 1)} c_0 c_1 = bu_0 \cos \varphi - bv_0 \sin \varphi - g \end{cases}$$

Из первого и четвертого уравнения определяются коэффициенты w1 и c1 ряда (5):

$$w_{1} = -\frac{2}{(\gamma - 1)} (c_{0t} + u_{0}c_{0r} + \frac{v_{0}}{r}c_{0\varphi}) - u_{0r} - \frac{u_{0}}{r} - \frac{v_{0\varphi}}{r}$$

$$c_{1} = \frac{(\gamma - 1)}{2} (bu_{0}\cos\varphi - bv_{0}\sin\varphi - g)$$
(6)

Второе и третье уравнения полученные после подстановки в систему (1) значения z = 0 являются такими соотношениями:

$$\begin{cases} u_{0t} + u_0 u_{0r} + \frac{v_0}{r} u_{0\varphi} - \frac{v_0^2}{r} + \frac{2}{(\gamma - 1)} c_0 c_{0r} = a v_0 \\ v_{0t} + u_0 v_{0r} + \frac{u_0 v_0}{r} + \frac{v_0}{r} v_{0\varphi} + \frac{2}{(\gamma - 1)} \frac{c_0}{r} c_{0\varphi} = -a u_0 \end{cases}$$
(7)

Уравнения (7) являются необходимыми условиями разрешимости рассматриваемой характеристической задачи Коши, так как эти два соотношения накладывают на первые три условия из (2) соответствующие ограничения для с, u, v. Решения полученных в последующем систем являются начальными слагаемыми ряда (5). [2, 3].

Для численного решения применяется метод характеристик. Система решается на прямоугольной сетке, поэтому используется стандартное для разностных схем обозначение U_i^n вектора значений искомых функций U(t,r) = (c,u,v) в точке $(t = t_n, r = r_i)$, где $t_n = n\tau$; $r_i = r_0 + ih$. Шаг сетки по пространственной переменной постоянный $\Delta r = h$, а шаг по времени $\Delta t = \tau$ задается таким образом, что все три характеристики, выходящие из точки (t_{n+1}, r_i) , пересекают прямую $t = t_n$ в пределах отрезка $[r_{i-1}, r_{i+1}]$. На рис. 1 приведены две ячейки прямоугольной сетки.

4. Результаты.

Значения газодинамических параметров придонной части торнадо класса F3 приведены в таблице, ранее подобные результаты были получены в [1].

| Параметр | Размерное значение | Безразмерное значение |
|----------------------------|----------------------------|-----------------------|
| c_{00} | 333 м/с | 1 |
| r ₀₀ | 16000 м | 1 |
| $t_{00} = r_{00} / c_{00}$ | 48 | 1 |
| Ω | $0,0000727 \text{ c}^{-1}$ | 0.003492 |
| sinψ | 0.7071 | 0.7071 |
| r _{in} | 16000 м | 1 |
| r_0 | 160.0 м | 0.01 |
| $c(r_{in})$ | 333 м/с | 1 |
| $c(r_0)$ | 333.6 м/с | 0.9928 |
| $u(r_{in})$ | -0.333 м/с | -0.001 |
| $u(r_0)$ | -34.5 м/с | -0.10368 |
| $v(r_{in})$ | 0 м/с | 0 |
| $v(r_0)$ | 82.21 м/с | 0.246 |
| h | 16.0 м | 0.001 |
| τ | 0.024024 c | 0.0005 |

5. Заключение

В работе рассмотрено придонное течение восходящего закрученного потока. Поставлена газодинамическая задача, описаны аналитический и численный методы получения решения. Представлены результаты счета. Благодарим профессора С.П. Баутина за полезные обсуждения.

Литература/References

1. *Bautin S.P., Krutova I.Y., Obuchov A.G., Bautin K.V.* Destructive atmospheric vortices: theorems, calculations, experiments: monograph. Novosibirsk: Science, 2013. 216 p.

2. *Kazachinsky A.O., Krutova I.Y.* The construction of flows in the bottom part of ascending swirling flows as a solution to one characteristic Cauchy problem. Preprint. Snezhinsk: publishing house SPTI MEPHI, 2016. 60 p.

3. *Kazachinsky A.O.* Simulation of the benthic part of ascending twisted flows as a solution of one characteristic Cauchy problem. Messenger of National Research Nuclear University MEPhI, 2017, 6(6), 503–509.

ОПТИМИЗАЦИЯ СКОРОСТИ РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН В МЕСТАХ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Д.А. Костромин¹, О.Ю. Лукашов²

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия ¹ООО ШахтЭксперт-Системы», Россия E-mail: olukashov@gmail.com

Ключевые слова: угольная шахта, математическая модель, воздушные ударные волны, промышленная безопасность, взрывобезопасная зона.

Аннотация. Действующее законодательство определяет угольные шахты как опасные производственные объекты. Особую опасность для здоровья и жизни людей представляют взрывы метана и угольной пыли. При таких авариях требуется оперативность и точность прогноза параметров распространения ударной волны в горных выработках, и знание расстояний от эпицентра взрыва до границ опасной зоны. Это необходимо для обеспечения безопасности людей при ведении горноспасательных работ. В настоящей работе представлены исследования по оптимизации численных расчетов прохождения воздушной ударной волны через повороты и места изменении геометрии горных выработок методом Годунова первого порядка точности. Описаны условия проведенного численного эксперимента. Определены критерии, при которых возможна замена узловых пространственных разностных ячеек на одномерные.

TECHNOLOGY OF BUILDING LOCAL-ADAPTIVE CARTESIAN GRIDS

D. Kostromin¹, **O.** Lukashov²

¹National research Tomsk state university, Russian Federation ²LLC Mining Expert Systems, Russian Federation E-mail: olukashov@gmail.com

Keywords: coal mine, mathematical model, air shock waves, industrial safety, explosion-proof area.

Abstract. The current legislation of the Russian Federation defines coal mines as hazardous production facilities. Methane and coal dust explosions pose a particular danger to human health and life. In such accidents, the speed and accuracy of the forecast of the parameters of the propagation of the air shock wave (ASW) in mine workings, and knowledge of the distances from the epicenter of the explosion to the boundaries of the hazardous zone are required. This is necessary to ensure the safety of people during mine rescue operations. This paper presents studies on the optimization of numerical calculations of the passage of an air shock wave through turns and places of changes in the geometry of mine workings by the Godunov method of the first order of accuracy. Conditions and obtained results of conducted numerical experiment are given. Угольные шахты – опасные производственные объекты [1]. Среди всех видов аварий наиболее разрушительные и трагические последствия несут взрывы газа и угольной пыли [2]. При составлении плана ликвидации аварий (ПЛА), а также ведении горноспасательных работ с возможностью повторных взрывов, необходимо знать границы безопасных зон, где могут вестись спасательные и изоляционные работы без угрозы жизни и здоровью людей. Определение этих границ производится в соответствии с отраслевой методикой [3].

Особенностью Методики является использование единственной пространственной разностной ячейки в каждом узле [4]. Это позволяет существенно ускорять вычисления при проведении практических расчетов, не теряя количественных характеристик. Во время аварии – время, оперативность и точность принимаемых решений является важным фактором, от которых напрямую зависят судьбы людей.

Целью настоящей работы является определение углов поворота и соотношений сечений между смежными ветвями, при которых в узлах возможна замена пространственной ячейки на одномерную и исключение учета угла поворота между выработками.

Для реализации поставленной цели, был проведен численный эксперимент. Расчётная область подготавливалась с помощью разработанной технологии построения локально детализированных разностных сеток для расчета зон поражения при взрывах газа и пыли в угольных шахтах [5]. Технология позволяет строить локально адаптивную декартовую сетку для моделируемой области с помощью древовидных структур данных: двоичные, квадро- и октодеревья.

Модельный участок состоял из двух ветвей – 1 и 2. Длина ветви 1 – 200 м, ветви 2 – 14000 м. Взрыв производился в ветви 1. В каждом расчете поочередно изменялись:

- угол поворота – от 0 до 45° с шагом 5°;

- сечения смежных выработок – использовались значения 4, 9, 16, 25 м²;

– давление в зоне взрыва (ДЗВ) – использовались значения 0,15; 0,2; 0,3; 0,5; 0,8 МПа.

В численном эксперименте рассматривались все возможные комбинации перечисленных параметров, общее количество расчетов составило 800. Исследования проводились следующим образом.

Для каждого соотношения сечений ветвей, угла поворота и давления в зоне взрыва:

- выполнялись расчеты распространения ВУВ по модельному участку;

– строился график максимального давления по маршруту распространения ВУВ.

Для каждого угла поворота:

– анализировались изменения границы опасной для человека зоны с избыточным давлением более 0,006 МПа; оценивалось изменение максимального давления по маршруту распространения ВУВ по отношению к максимальному давлению без поворота;

 – результаты расчетов обобщались, определялись комбинации сечений и углов поворота, при которых замена пространственной ячейки на одномерную в узле возможна.

Для исключения влияния волновых эффектов границы расчетной области были помечены как выход в атмосферу. Схема эксперимента показана на рис. 1.



Рис. 1. Схема численного эксперимента. S₁, S₂ – поперечные сечения ветвей *l* и *2*; α – угол поворота между ветвями

Результаты численного эксперимента представлены в табл. 1. Анализ показал, что поворот горных выработок приводит к появлению местного сопротивления и сокращению зоны поражения по фактору избыточного давления. При этом стоит отметить, что сравнение абсолютных значений взрывобезопасных расстояний для различных сочетаний сечений особого смысла не имеет, так как во всех примерах бралась одна и та же протяженность зоны взрыва, что в сочетании с различными сечениями дает разные объемы взорвавшегося метана и, соответственно, энергии взрыва.

| | S ₁ , | S ₂ , | Р _{вз} , атм | Угол поворота, ° | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|------------------|------------------|--------------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | M ² | M ² | | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
| Длина зоны пораже- ния, м | 25 9 | | 3 | 7340 | 7336 | 7324 | 7308 | 7284 | 7256 | 7220 | 7184 | 7144 | 7104 |
| Умень- шение зоны, м | | 9 | | 0 | -4 | -16 | -32 | -56 | -84 | -120 | -156 | -196 | -236 |
| Доля сокра- щения | | | | 0,0% | 0,1% | 0,2% | 0,4% | 0,8% | 1,2% | 1,7% | 2,2% | 2,7% | 3,3% |
| Длина зоны пора- жения, м | 25 16 | | | 7436 | 7436 | 7432 | 7428 | 7420 | 7412 | 7404 | 7392 | 7380 | 7360 |
| Умень- шение зоны, м | | 16 | 3 | 0 | 0 | -4 | -8 | -16 | -24 | -32 | -44 | -56 | -76 |
| Доля сокра- щения | | | | 0,0% | 0,0% | 0,1% | 0,1% | 0,2% | 0,3% | 0,4% | 0,6% | 0,8% | 1,0% |
| Длина зоны пора- жения, м | 25 2 | | 3 | 6280 | 6280 | 6280 | 6280 | 6280 | 6276 | 6276 | 6272 | 6272 | 6268 |
| Умень- шение зоны, м | | 25 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -4 | -4 | -8 | -8 | -12 |
| Доля сокра- щения | | | | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,1% | 0,1% | 0,1% | 0,1% | 0,2% |
| Длина зоны пора- жения, м | 9 25 | | 25 3 | 9988 | 9988 | 9988 | 9988 | 9988 | 9984 | 9984 | 9984 | 9980 | 9976 |
| Умень- шение зоны, м | | 25 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -4 | -4 | -4 | -8 | -12 |
| Доля сокра- щения | | | | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,1% | 0,1% |
| Длина зоны пора- жения, м | 16 | 25 | 3 | 12648 | 12648 | 12648 | 12648 | 12648 | 12648 | 12648 | 12648 | 12648 | 12644 |
| Умень- шение зоны, м | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -4 |
| Доля сокра- щения | | | | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% |

Обобщая результаты, можно говорить о том, что при расчете взрывобезопасных расстояний при взрывах метана в угольных шахтах, повороты горных выработок до 15° в диапазоне сечений от 4 до 25 м² могут быть проигнорированы и заменены прямолинейными участками, а соответствующие трехмерные разностные ячейки – одномерными. Незначительное увеличение размеров (до 16 м) зоны поражения избыточным давлением является допустимым, особенно учитывая, что замена поворота прямым участком лишь незначительно увеличит, но не сократит ее. Это можно рассматривать как введение большого запаса с точки зрения взрывобезопасных расстояний.

Литература

1. Об утверждении Правил безопасности в угольных шахтах: постановление Госгортехнадзора России от 05.06.2003 № 50.

2. Воробьева О.В., Костеренко В.Н., Тимченко А.Н. Анализ причин взрывов с целью повышения эффективности системы управления безопасностью труда угледобывающих предприятий. М.: Горная книга, 2018. 16 с.

3. Распоряжение от 27 апреля 2004 года N Р-7 о введении в действие Методики газодинамического расчета параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли: 27 апреля 2004. 16 с.

4. Лукашов О. Ю. Исследование волновых эффектов, возникающих при распространении ударных волн по разветвлённой сети горных выработок: дис. ... канд. физмат. наук: Томск. 2003. 141 с.

5. Лукашов О. Ю., Костромин Д. А. Технология построения локально детализированных разностных сеток для расчета зон поражения при взрывах газа и пыли в угольных шахтах // Вестник НГУ. Серия. Информационные технологии. 2020 Т. 18, № 1 С. 36–50. DOI 10.25205/1818-7900-2020-18-1-36-50.

References

1. On approval of the Safety Rules in Coal Mines: Resolution of the Gosgortekhnadzor of Russia dated 05.06.2003 No. 50.

2. *Vorobieva O.V., Kosterenko V.N., Timchenko A.N.* Analysis of the causes of explosions in order to improve the efficiency of the labor safety management system of coal mining enterprises. M.: Gornaya kniga, 2018. P. 16.

3. Order of April 27, 2004 N R-7 on the implementation of the Methodology for gasdynamic calculation of the parameters of air shock waves in gas and dust explosions: April 27, 2004. P. 16.

4. *Lukashov O.Yu.* Investigation of wave effects arising from the propagation of shock waves in a ramified network of mine workings: diss. candidate of physico-mathematical sciences: Tomsk, 2003. P. 141 (in Rus.)

5. *Lukashov O. Yu., Kostromin D.A.* Technology of constructing locally detailed difference grids for calculating the affected zones in gas and dust explosions in coal mines // Vestnik NSU. Series: Information Technologies. 2020 Vol. 18. No. 1. P. 36–50. (in Rus.). DOI 10.25205 / 1818-7900-2020-18-1-36-50.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИК-ТЕРМОГРАФИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ В ПЛАМЕНИ И ВЛИЯНИЕ НА НЕЕ МАЛЫХ ИНФРАЗВУКОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Е.Л. Лобода², М.В. Агафонцев^{1,2}, А.С. Климентьев¹, Д.П. Касымов^{1,2}, Ю.А. Лобода^{1,2}, П.С. Мартынов^{1,2}, В.В. Рейно²

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия ² Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Россия E-mail: loboda@mail.tsu.ru

Ключевые слова: ИК-термография, горение, турбулентность, углеводороды, структура пламени.

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследований диффузионного горения бензина и дизельного топлива с применением методов ИК-термографии. Получены экспериментальные результаты воздействия пульсаций давления малой амплитуды с разными частотами на спектры изменения температуры в пламени и другие характеристики. Показано, что воздействие пульсаций давления с определенными частотами приводит к изменению высоты пламени, скорости выгорания топлива и появлению характерных частотных максимумов в спектрах изменения температуры в пламени.

INVESTIGATION OF THE TURBULENT STRUCTURE IN A FLAME AND THE EFFECT OF SMALL INFRASONIC EXPOSURE ON IT USING IR THERMOGRAPHY METHODS

E. Loboda^{1,2}, M. Agafontsev^{1,2}, A. Klimentiev¹, D. Kasymov^{1,2}, Yu. Loboda^{1,2}, P. Martynov^{1,2}, V. Reyno¹

¹ National Research Tomsk State University, Russian Federation ²Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Russian Federation E-mail: loboda@mail.tsu.ru

Keywords: IR-thermography, combustion, turbulence, hydrocarbons, flame structure.

Abstract. The paper presents the results of studies of gasoline and diesel fuel diffusion combustion using IR thermography methods. Experimental results of the effect of small amplitude pressure pulsations with various frequencies on the spectra of temperature changes in the flame and other characteristics are obtained. It is shown that the effect of pressure pulsations with certain frequencies leads to a change in the flame height, fuel burning-up rate and the appearance of characteristic frequency maximum in the spectra of temperature changes in the flame.

Горение топлива представляет собой совокупность физико-химических процессов, вызывающих образование газообразных горючих компонент и

интенсивное тепловыделение. Наиболее распространенным режимом горения является диффузионное горение, которое происходит в условиях турбулентности. Диффузионное турбулентное горение – это нестационарный процесс турбулентного смешения продуктов паров горючего с атмосферным окислителем и воспламенение горючей смеси вследствие повышения температуры. В зависимости от характера турбулентности и ее масштабов возможны различные механизмы горения [1]. Структура пламени исследуется разнообразными методами. Например, газовый состав и его изменение в разных участках пламени определяется путем зондового отбора газовых проб из разных зон пламени с их дальнейшим анализом [2]. Помещение пробоотборных зондов и термопар в пламя приводят к возмущениям течения и теплового баланса в пламени. Применение методов инфракрасной термографии, благодаря современным техническим возможностям и высокой скорости регистрации, является перспективным направлением исследования структуры турбулентного пламени. Необходимо отметить, что применение методов ИК-термографии для исследования процессов горения сопряжено с рядом фундаментальных и методических трудностей, таких, как анализ спектров излучения и оптических характеристик пламени, выбор спектрального интервала исследований и др., так как пламя является высокотемпературной, случайно-неоднородной селективно излучающей средой.

Перспективным методом, позволяющим управлять режимом горения, является воздействие внешних пульсаций давления на факел пламени. Работа направлена на изучение влияние пульсаций давления на факел пламени при горении жидкого углеводородного топлива.

Методика исследования. В качестве горючего материала использовался бензин. Масса топлива составляла 10 г. В качестве регистрирующего оборудования применялась инфракрасная камера JADE J530SB с узкополосным фильтром с полосой пропускания 2.5-2.7 мкм длин волн. Генератором инфразвука служил низкочастотный динамик 25-ГД-26 с мягким подвесом, на который подавался синусоидальный сигнал, сформированный генератором сигналов специальной формы Г6-28, предварительно усиленный при помощи усилителя LV-103. Дополнительно температура в пламени контролировалась термопарой типа К для нахождения эффективного коэффициента излучения пламени. Топливо диффузионно сжигалось в емкости диаметром 0.15 м, а регистрирующая аппаратура располагалась на удалении 1.5 м. Расстояние от источника колебаний до пламени составляло 0.3 м. Полученные в результате съемки термограммы обрабатывались с использованием программного обеспечения «Altair». Спектры изменения температуры в пламени были получены с использованием программы «TempSpectrum-v.1».



Рис. 1. Спектры изменения температуры в пламени бензина при воздействии инфразвука с определенной частотой: *a* – 2 Гц; *б* – 4.1 Гц

Следует отметить, что при появлении инфразвукового воздействия высота факела пламени менялась, и появлялись изменения в спектре температуры (рис. 1). Наблюдаются изменения амплитуды на характерных частотах, которые хорошо видны при отсутствии возмущений. При этом в результате воздействия инфразвука изменяется спектр пульсации температуры в пламени. Также было замечено, что воздействие инфразвуком с частотой более 2 Гц вызывает появление локальных амплитудных максимумов в спектре изменения температуры с частотой воздействия. Для анализа изменения массы бензина при его горении было проведено дополнительное исследование убыли массы топлива со временем при внешнем воздействии с различными частотами. Для измерений использовались весы A&D GF-3000, позволяющие регистрировать изменение массы с точностью 0.01 g и периодичностью 5 отсчетов в секунду.

Заключение. Представленные выше экспериментальные результаты исследований диффузионного горения бензина и дизельного топлива показывают, что внешние воздействия пульсациями давления малой амплитудой с частотами 2–10 приводят к увеличению высоты пламени до 50 mm. Кроме того, воздействия на пламя пульсаций давления приводит к изменению скорости выгорания топлива и появлению характерных частотных максимумов в спектре изменения температуры в пламени. Эти последствия вызваны тем, что внешние воздействия пульсациями давления изменяют турбулентную структуру течения в пламени, что проявляется в изменении спектра пульсации температуры в пламени, что приводит к изменению перемешивания горючих газообразных компонент с окислителем из внешней атмосферы.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (№ 20-71-10068).

Литература/References

1. Warnatz J. Combustion J. Warnatz U. Maas, R.W. Dibble. Berlin: Springer, 1999. 300 p.

2. Hansen N., Cool T.A., Westmoreland P.R., Kohse-H"oinghaus K. Recent contributions of flame-sampling molecular-beam mass spectrometry to a fundamental understanding of combustion chemistry // Prog. Energy Combust. Sci. 2009. Vol. 35. N 2. P. 168–191.

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ФУЛЛЕРИТОВ В КАЧЕСТВЕ ПОРШНЕЙ ВНУТРИ СNT. НА ПРИМЕРЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ ФУЛЛЕРЕНА С₃₂₀ ВНУТРИ СNT(35,0)

Д.В. Мамонтов, А.М. Бубенчиков, М.А. Бубенчиков

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

Ключевые слова: молекулярная динамика, математическое моделирование, углеродная нанотрубка, фуллерен, молекулярная структура.

Аннотация. Одним из самых перспективных применений и углеродных нанотрубок (CNT) и фуллеренов является их использование в медицине в качестве молекулярных контейнеров для действующих веществ лечебных препаратов. Это может позволить осуществлять адресную доставку лекарств. Это применимо, например, для лечения рака. Дело в том, что действующее вещество пагубно воздействует на организм в целом. Адресная доставка лекарств позволяет решить эту проблему. Кроме этого, непосредственное воздействие на раковые клетки делает эту процедуру более эффективной. Проведено исследование возможности применения фуллеритов в качестве поршней внутри CNT на примере молекулярной динамики фуллерена С₃₂₀ внутри CNT(35,0). В расчетах использованы современные потенциалы взаимодействия и высокоточные численные методы. В результате вычислений удалось добиться выброса лекарственных веществ из углеродной нанотрубки в необходимый момент.

THE POSSIBILITY OF USING FULLERITES AS PISTONS INSIDE THE CNT. ON THE EXAMPLE OF THE MOLECULAR DYNAMICS OF THE C320 FULLERENE INSIDE CNT (35,0)

D. Mamontov, A. Bubenchikov, M. Bubenchikov

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

Keywords: molecular dynamics, mathematical modeling, carbon nanotube, fullerene, molecular structure. **Abstract.** One of the most promising applications of both carbon nanotubes (CNT) and fullerenes is their use in medicine as molecular containers for active substances of medicinal preparations. This can enable targeted drug delivery. This is applicable, for example, for the treatment of cancer. The fact is that the active substance has a detrimental effect on the body as a whole. Targeted drug delivery solves this problem. In addition, direct action on cancer cells makes this procedure more effective. The study of the possibility of using fullerites as pistons inside the CNT was carried out using the example of the molecular dynamics of C_{320} fullerene inside the CNT (35,0). The calculations used modern interaction potentials and high-precision numerical methods. As a result of the calculations, it was possible to achieve the release of drugs from the carbon nanotube at the right time.

Возможность применения фуллеритов в качестве поршней внутри CNT исследована на примере молекулярной динамики фуллерена C₃₂₀ внутри CNT(35,0). Эти молекулы схематично изображены на рис. 1.





Одним из самых перспективных применений углеродных нанотрубок является их использование в медицине в качестве молекулярных контейнеров для действующих веществ лечебных препаратов. Это может позволить осуществлять адресную доставку лекарств. Например, это актуально для раковых опухолей, это не только увеличивает эффективность лечения, но и снижает вредные побочные эффекты. Группа исследователей [1] предложила использовать фуллерены, обладающие магнитной восприимчивостью в качестве поршней, чтобы в необходимый момент (кода CNT находится возле раковой опухоли) посредством электромагнитных полей раскрутить фуллерен и заставить его колебаться вдоль оси нанотрубки и тем самым выбить действующее вещество. Был выбран именно фуллерен, потому что существует огромное разнообразие фуллеренов, синтезируемых для медицинских целей, таких как водорастворимые фуллерены или химически инертные [2] и есть возможность подобрать фуллерен необходимого размера и свойств под индивидуальную ситуацию, например для нанотрубки определенного размера. Кроме фуллеренов и лекарств в CNT добавляют множество химических соединений и модификаторов, таких как докс. Если молекулярный контейнер в виде открытой CNT находится в межклеточной жидкости, то он обязательно заполнится молекулами окружения. Чтобы исключить ненужный обмен нейтральными молекулами и ионами багаж для транспорта лекарственных веществ еще на стартовой позиции предлагается заполнить необходимыми функциональными группами. Среди этих групп находятся красители, которые изменяют свое физическое состояние в зависимости от показателя кислотности окружающей среды. В результате возможен их интенсивный выброс и вместе с красителями выход лекарственного препарата. Значительное количество молекулярных фракций в контейнере делают задачу об адресной доставке лекарств и содержательной, и интересной.

В рамках доклада мы решили проверить принципиальную возможность конвертации энергии вращения фуллерена в поступательную с помощью средств молекулярной динамики. Этот вопрос возникает из-за того, что в случае свободного движения, согласно принципу Эйлера, вращательные и поступательные группы движения независимы. Кроме того, фуллерены, как правило, имеют сферическую симметрию. Однако, при не свободном движении это не совсем так. В качестве силовых полей в расчетах использовался REBO для внутримолекулярных взаимодействий и силовое поле Леннарда–Джонса для межмолекулярных взаимодействий. Использовались стандартные параметры для углерода в потенциале LJ и стандартные параметры для углерода из статьи Бреннера [3] в потенциале REBO. Уравнения движения и кинематические соотношения Эйлера интегрировались с помощью Рунге-Кутты четвертого порядка точности с постоянным шагом по времени 10⁻⁷ нс. Более подробно методы вычислений рассмотрены в [4]. Исследования были проведены с разными начальными параметрами. В результате расчетов были получены варианты, при которых фуллерен вылетал из углеродной нанотрубки. Для этого ему необходимо придать существенную энергию, например, раскрутить электромагнитными полями до высоких скоростей. Это говорит о возможности перераспределения энергии между степенями свободы вращательных и поступательных движений. При этом важно не допустить существенного повышения температуры по естественным причинам.

В результате расчетов установлена возможность применения фуллеренов в качестве поршня в углеродной нанотрубке, но при раскрутке фуллерена до существенных скоростей будет нагрето содержимое CNT. Найти способ придать фуллерену достаточную амплитуду для того, чтобы вытолкнуть из трубки содержимое и при этом не нагреть содержимое до критических температур нам не удалось. Но, тем не менее, возможно мы найдем такие варианты в будущем. Кроме этого, идея адресной доставки, конечно же, не должна быть забыта, существуют и другие идеи по поводу распаковки молекулярного контейнера в необходимый момент.

Работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда № 19-71-10049.

Литература/References

1. Wolski P., Nieszporek K., Panczyk T. Multimodal, pH sensitive and magnetically assisted carrier of doxorubicin designed and analyzed by means of computer simulations. Langmuir, 34(7), 2543–2550, 2018. 2. *Khakina E.A., Kraevaya O.A., Popova M.L. et al.* Troshin Synthesis of different types of alkoxy fullerene derivatives from chlorofullerene C60Cl6[†]. Organic & biomolecular Chem. 4, 2017.

3. Brenner D.W., Shenderova O.A., Harrison J.A. Steven et al. A second-generation reactive empirical bond order (REBO) potential energy expression for hydrocarbons / Journal of Physics: cond. Matter 14(4), 2002.

4. Bubenchikov A.M., Bubenchikov M.A. Mamontov D.V. Lun-Fu A.V. Md-Simulation of Fullerene Rotations in Molecular Crystal Fullerite. Crystals 2019, 9, 496.

ОКИСЛЕНИЕ ПОРОШКОВ АЛЮМИНИЯ РАЗНОЙ ДИСПЕРСНОСТИ В ВОДЕ ПРИ НАГРЕВАНИИ

О.Н. Морозова, А.А. Антонникова, Е.Е. Жуков, С.С. Титов, А.А. Павленко

Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Россия E-mail: morozova_olga15@mail.ru

Ключевые слова: порошок алюминия, окисление, гидрореагирующие сплавы, дисперсность, суспензия.

Аннотация: В работе исследован процесс взаимодействия алюминиевых порошков различного дисперсного состава с водой. Для проведения экспериментальных исследований по окислению алюминия использовался нанопорошок алюминия марки Alex и крупные промышленные порошки марки ACД. Исследования проведены в реакторе высокого давления при нагревании и постоянном перемешивании. Работа выполнена с целью развития разработок в области водородной энергетики, так как одним из побочных продуктов реакции является водород. Представлены зависимости изменения температур и давления реакции от времени. В результате экспериментальных исследований было выявлено, что на полноту процесса окисления порошков алюминия, а значит и на выход водорода, влияет дисперсность частиц, а также содержание активного металла в порошках. Полученный в результате реакции водород может быть использован для питания автономных малогабаритных источников электрической энергии на основе водородных топливных элементов.

HEAT-ASSISTED OXIDATION OF ALUMINUM POWDERS WITH DIFFERENT DISPERSITY IN WATER

O. Morozova, A. Antonnikova, E. Zhukov, S. Titov, A. Pavlenko

Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation E-mail: morozova_olga15@mail.ru

Keywords: aluminum powder, oxidation, hydroreactive alloys, dispersity, suspension.

Abstract. In this work, the process of interaction of aluminum powders of various dispersed composition with water has been investigated. To carry out experimental studies of aluminum oxidation, we used Alex nanopowder of aluminum and large industrial powders of the ASD brand. Research was carried in a high-pressure reactor with heating and constant stirring. The work was carried out with the aim of developing developments in the field of hydrogen energy, since one of the by-products of the reaction is hydrogen. The dependences of temperature and pressure changes on time are presented. As a result of experimental studies, it was revealed that for the completeness of the oxidation process of aluminum powders, and therefore for the yield of hydrogen, influences dispersion of particles, as well as the content of active metal in the powders. The hydrogen obtained as a result of the reaction can be used to power autonomous small-sized energy sources based on hydrogen fuel cells.

В настоящее время алюминиевые порошки широко применяются в качестве энергетических добавок в топлива и пиротехнические составы, при получении композиционных материалов и интерметаллидов а также в водородной энегретике. Так как единственными побочными продуктами окисления алюминия водой является водород и гидроксид алюминия, возрастающий интерес исследователей к взаимодействию порошков алюминия с водой и водными растворами связан с перспективой использования этого процесса для питания портативных источников энергии на основе водородных топливных элементов. Почти все системы питания топливных элементов, разработанные на сегодняшний день, используют резервуары со сжиженным или сжатым водородом [1], что является небезопасным при хранении и транспортировке. Поэтому важной задачей является обеспечение своевременной и непрерывной подачи водорода к топливным элементам.

В работах [2, 3] рассматриваются прототипы портативных источников питания на основе водорода, которые в дальнейшем могли бы заменить традиционные батарейки и аккумуляторы. Основными трудностями при работе с водородом являются хранение и транспортировка, так как его молекулы обладают высокой проникающей способностью, а перемещать газообразный водород в баллонах под давлением небезопасно. Трудностей с хранением и транспортировкой можно избежать, если получать водород на месте потребления из доступного и безопасного сырья.

Ряд исследований, среди которых [4, 5], подтверждают перспективность использования в качестве способа получения водорода для питания автономных источников энергии разложения воды гидрореагирующими сплавами. Особый интерес представляют нанопорошки алюминия, так как они отличаются от свойств компактного металла и крупных промышленных порошков высокой реакционной способностью. В связи с этим, целью данной работы является экспериментальное исследование влияния дисперсности частиц алюминиевых порошков на реакционную активность в процессе их окисления.

В качестве объекта исследования выбраны крупные промышленные порошки, произведенные путем распыления расплава и нанопорошок алюминия марки Alex, полученный методом электрического взрыва проводника в атмосфере аргона. Окисление порошка алюминия водой проводили в 286 автоклаве TOP INDUSTRIE FR – 77013 Vaux Le Penil Cedex, который состоит из реактора с магнитной мешалкой и блока управления, позволяющего регистрировать процесс изменений значений давления и температуры при протекании реакции. Перед началом экспериментальных исследований было определено содержание активного алюминия в исходных порошках и продуктах реакции газоволюмометрическим методом по ГОСТ 5494-95 «Пудра алюминиевая».

Реакция окисления металлического алюминия является гетерогенной и экзотермической. Процесс протекает следующим образом:

$$Al + 3H_2O = Al(OH)_3 + 1.5H_2$$

По данным предварительных экспериментов при окислении 1 г алюминия получено 1.24 л водорода (0°С и 1 атм.) [5]. При стехиометрическом соотношении, для полного окисления 27 г (1 моль) Al требуется 54 г (3 моль) воды, т.е. минимальное расчетное соотношение нанопорошка и воды 1 : 2. Так как эта реакция экзотермическая, в результате реакции интенсивно повышается температура смеси и для окисления алюминия может потребоваться дополнительное количество воды во избежание спекания порошков из-за испарения воды в ходе реакции. Поэтому, для проведения экспериментов использовали избыточное количество воды, а именно: 100 г для окисления 1 г алюминия. Для инициирования окисления порошков водой (так как на частицах порошка всегда присутствует оксидная пленка) непрерывно перемешиваемую суспензию в реакторе подогревали до 60°С. Как только давление в реакторе начинало расти, перемешивание суспензии продолжалось без нагревания. Зависимости давления и температуры от времени показаны на рис. 1.



Рис. 1. Результаты экспериментальных исследований для порошков алюминия: *I* – Alex; *2* – ACД-10; *3* – ACД-6TO; *4* – ACД-4; *5*– ACД-1; *6* – ACД-0; *7* – ПА-3: *a* – зависимость температуры в реакторе от времени; *б* – зависимость давления в реакторе от времени

Как видно из рис. 1, *а*, после отключения подогрева саморазогрев суспензии не зарегистрирован ни у одного образца. Однако данный процесс сопровождался выделением водорода, о чем свидетельствует рост давления в реакторе (рис. 1, б) при окислении порошка в образцах 1, 2 и 3. При взаимодействии более крупных порошков алюминия с водой (образцы 4–7) давление изменилось незначительно.

Максимальная температура суспензии при взаимодействии алюминия с водой зависит от содержания в ней порошка алюминия. При окислении 1 г порошка в 100 мл воды саморазогрева частиц не зарегистрировано ни в одном образце. Это объясняется избыточным количеством воды, превышающим рассчитанное по стехиометрии соотношение. По зависимостям давления в реакторе от времени можно сказать, что процесс окисления каждого порошка сопровождается индукционным периодом. Несмотря на то, что максимальное давление было зарегистрировано при окислении нанопорошка алюминия марки Alex (рис. 1, δ , кривая *1*), первой прореагировала основная часть порошка АСД-10 (рис. 1, δ , кривая *2*), содержание активного металла в котором 96%, что превышает содержание активного металла в нанопорошке (80.3%).

Анализируя полученные данные, можно сделать следующие выводы.

1. Окисление порошка алюминия в воде характеризуется индукционным периодом, который увеличивается с увеличением размеров частиц порошка. Но, несмотря на то, что порошок алюминия Alex является нанодисперсным, микронный порошок алюминия АСД-10 имеет меньший индукционный период из-за различного содержания активного металла в образцах.

2. Установлено, что в результате взаимодействия алюминиевого порошка и воды наиболее полно окислись порошки Alex и ACД-6TO. Это свидетельствует о том, что при окислении данных порошков выделилось наибольшее количество водорода.

Работа выполнена при использовании приборной базы Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

Литература

1. *Kwon S., Kim M.J., Kang S., Kim T.* Development of a high-storage-density hydrogen generator using solid-state NaBH₄ as a hydrogen source for unmanned aerial vehicles // Applied Energy. 2019. T. 251. C. 113331.

2. Ладовский А.В., Коровин Н.В. Портативный источник тока на основе щелочных топливных элементов с непрямым окислением борогидрида натрия // Электрохимическая энергетика. 2010. Т. 10. №. 3. С. 153–156.

3. *Ma H., Cheng W., Fang F., Hsu C., Lin C.* Compact design of 10 kW proton exchange membrane fuel cell stack systems with microcontroller units. Energies. 2014. T. 7. N_{2} 4. C. 2498–2514.

4. Янилкин И.В., Школьников Е.И., Клямкин С.Н. и др. Комбинированная система питания топливных элементов на основе алюмоводного генератора и

288
металлогидридного накопителя водорода // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2010. № 1. С. 85–95.

5. Godart P., Fischman J., Seto K., Hart D. Hydrogen production from aluminum-water reactions subject to varied pressures and temperatures // International Journal of Hydrogen Energy. 2019. T. 44. №. 23. C. 11448–11458.

References

1. *Kwon S., Kim M.J., Kang S., Kim T.* Development of a high-storage-density hydrogen generator using solid-state NaBH4 as a hydrogen source for unmanned aerial vehicles. Applied Energy. 2019. Vol. 251. P. 113331.

2. *Ladovskij A.V., Korovin N.V.* A portable current source based on alkaline fuel cells with indirect oxidation of sodium borohydride. Elektrohimicheskaya energetika. 2010. Vol. 10. No. 3. Pp. 153–156. (Rus.)

3. *Ma H., Cheng W., Fang F., Hsu C., Lin C.* Compact design of 10 kW proton exchange membrane fuel cell stack systems with microcontroller units. Energies. 2014. Vol. 7. No. 4. P. 2498–2514.

4. *Yanilkin I.V., Shkol'nikov E.I., Klyamkin S.N. et al.* Combined fuel cell power system based on alumina generator and hydrogen metal hydride storage // Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika. 2010. No. 1. P. 85–95. (Rus.)

5. Godart P., Fischman J., Seto K., Hart D. Hydrogen production from aluminum-water reactions subject to varied pressures and temperatures. International Journal of Hydrogen Energy. 2019. Vol. 44. No. 23. P. 11448–11458.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ

М.М. Нурматов, А.В. Азин

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

Ключевые слова: пьезоэлектрический двигатель, пьезопакет, напряженнодеформированное состояние, прецизионный двигатель.

Аннотация. В работе представлены исследования влияния выбора материалов и геометрических параметров элементов конструкции на напряженно-деформированное состояние пьезоэлектрического двигателя при рабочих нагрузках. По результатам моделирования достигнуто уменьшение массы элементов конструкции пьезодвигателя на 47%. Результаты данной работы имеют важное практическое применение при разработке конструкции пьезоэлектрического двигателя.

RESEARCH ON STRESS-STRAIN STATE OF PIEZOELECTRIC ENGINE ELEMENTS

M. Nurmatov, A. Azin

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

Keywords: piezo drive, PZT-stack, stress-strain state, precision engine.

Abstract. The study of the influence of the choice of materials and geometric parameters of structural elements on the stress-strain state of a piezoelectric motor under operating loads is presented. Based on the simulation results, a decrease in the mass of the piezoelectric motor structure elements by 47% was achieved. The results of this work have important practical application in the development of the design of a piezoelectric motor.

С развитием космической промышленности усилилась потребность в использовании современных систем прецизионного позиционирования (СПП). При создании современных СПП неизбежно возрастают требования к габаритам, точности, рабочим частотам, усилиям и мощности их исполнительных элементов. Данная работа направлена на уменьшение массы пьезодвигателя системы позиционирования для настройки формы отражающей поверхности крупногабаритного трансформируемого рефлектора космического аппарата.

Пьезоэлектрический двигатель системы позиционирования состоит из корпуса, толкателя, крышки, винта, пьезопакета, упругого элемента и вставки. Для исследования разработана параметрическая модель конструкции пьезодвигателя при помощи пакета прикладных программ Ansys. Первоначальные геометрические размеры элементов конструкции пьезодвигателя взяты с реальной конструкции [1].

В ходе исследования проведены экспериментальные испытания образцов материалов, которые используются в конструкции пьезодвигателя (сталь, дюралюминий). Экспериментальные исследования проводились на сервогидравлической испытательной машине Instron 8801 в соответствии со стандартом ГОСТ 1497 [2]. По результатам испытаний определены механические свойства материалов, которые использовались для разработки параметрической модели пьезодвигателя.

В конструкции использовались следующие материалы: Алюминий Д16 (ρ =2770 кг/м³; E= 61 ГПа; μ =0,33); Сталь марки Х40 (ρ =7900 кг/м³; E= =127,4 ГПа; μ =0,32); Упругий элемент (ρ =1190 кг/м³; E= 5·10⁻³ ГПа; μ =0,45).

В параметрической модели рассматривалось влияние пьезопакета на элементы пьезодвигателя. В реальной конструкции пьезодвигателя крышка фиксируется на корпусе с помощью винтов. В корпус установлены склеен-

ные между собой упругий элемент с толкателем и пьезопакет со вставками. Данные элементы внутри корпуса прижаты к крышке с помощью прижимного винта. Для реализации в расчетной модели реальных условий закрепления элементов конструкции, следующие поверхности склеены между собой:

- правая вставка, толкатель и упругий элемент;

- упругий элемент, крышка, корпус, прижимной винт и левая вставка.

Таким образом, в расчетной модели реализовано перемещение толкателя от силового воздействия пьезопакета. Величина силового воздействия от пьезопакета определена в соответствии с паспортными данными изделия и равнялась 1000 Н [3]. В КЭМ сила приложена к боковым поверхностям вставок.

Так как задача осесимметричная, включая геометрию объекта, нагрузки и граничные условия, поэтому задача рассмотрена в двумерной постановке. На верхних гранях прижимного винта, вставок, толкателя, упругого элемента и крышки указано условие симметрии модели. Левая грань корпуса пьезодвигателя ограничена по оси Х.

Для уменьшения массы пьезодвигателя рассмотрены три варианта комбинации материалов (упругий элемент – материал резина во всех случаях): 1) все элементы модели выполнены из алюминиевого сплава; 2) все элементы модели, выполнены из стали; 3) смешанный (корпус и крышка, выполнены из алюминиевого сплава, все остальные элементы – сталь). В каждом варианте рассмотрено 10 модификаций элементов конструкции пьезодвигателя (корпуса, крышки и винта). Масса и размеры пьезопакета остались неизменны.



Рис. 1. Зависимость массы пьезодвигателя от модификации его конструкции: *1* – алюминиевый сплав Д16; *2* – сталь 40Х; *3* – смешанный сплав

Анализ напряженно-деформированного состояния элементов конструкции пьезодвигателя показал, что наиболее перспективным модификацией конструкции пьезодвигателя является смешанный вариант изготовления пьезодвигателя с массой элементов 9 г. Результаты моделирования приведены в виде графика на рис. 1.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0721-2020-0036).

Литература

1. *Azin A*. Development of Microlinear Piezo-Drives for Spacecraft Actuators/ Anton Azin, Sergey Rikkonen, Sergey Ponomarev, A. M. Khramtsov // Proceedings of the Scientific-Practical Conference «Research and Development-2016». – 2017. P. 247–254. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-62870-7_27.

2. ГОСТ 1497-84. Металлы методы испытаний на растяжение. – Взамен ГОСТ 1497–73; введ. 1986–01–01. М.: Изд-во стандартов, 2008. (Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу).

3. Актюаторы [Электронный ресурс]: Научно-исследовательский институт ЭЛПА. Продукция. Электрон. дан. АО «НИИ Элпа», 2003–2016. URL: https://www.elpapiezo.ru/actuators.html (дата обращения: 21.10.19).

4. *Наседкин А.В.* Моделирование пьезоэлектрических преобразователей в ANSYS: учебное пособие / А.В. Наседкин. Ростов н/Д.: Изд-во Юж. фед. ун-та, 2015. 176 с.

References

1. *Azin A.* Development of Microlinear Piezo-Drives for Spacecraft Actuators / A. Azin, Sergey Rikkonen, S. Ponomarev, A. Khramtsov // Proceedings of the Scientific-Practical Conference «Research and Development-2016». 2017. P. 247–254. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-62870-7 27.

2. GOST 1497-84. Metals tensile test methods. – Instead of GOST 1497–73; entered 1986-01-01. M.: Publishing house of standards, 2008. (System of standards for information, librarianship and publishing).

3. Actuators [Electronic resource]: Research Institute ELPA. Products. Electron. Dan. JSC «NII Elpa», 2003–2016. URL: https://www.elpapiezo.ru/actuators.html (access date: 21.10.19).

4. *Nasedkin A.V.* Modeling of piezoelectric transducers in ANSYS: tutorial / A.V. Nasedkin. Rostov n/D: Yuzh. fed. University, 2015. 176 p.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕТАЛЛ-ФУЛЛЕРЕНА НА ОСНОВЕ C60 C АНИОНОМ КСЕНОНА

В.А. Овчинников¹, М.А. Бубенчиков¹, А.В. Лун-Фу²

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия ²ООО «Газпром Трансгаз Томск», Россия E-mail: empiric@mail.ru

Ключевые слова: вращающийся фуллерен, заряженная частица, фуллерит.

Аннотация. Исследуется взаимодействие заряженной частицы и вращающейся молекулы фуллерена, находящейся в кристалле фуллерита. Математическая модель построена и реализована для частот вращений фуллерена до 100 ТГц и скоростей набегающей заряженной частицы порядка 1000 м/с. Исследование проводилось с помощью методов классической молекулярной физики. Характеристики движения молекулы фуллерена С₆₀ определялись с использованием законов классической механики, подхода Эйлера и численного метода Рунге–Кутты четвертого порядка точности. По результатам выполненных численных экспериментов анализировалось влияние движущейся заряженной частицы на смещение вращающегося металл-фуллерена от его первоначального положения.

INTERACTION OF C60-BASED METALLOFULLERENE WITH XENON ANION

V. Ovchinnikov¹, M. Bubenchikov¹, A. Lun-Fu²

¹National Research Tomsk State University, Russian Federation ²"Gazprom Transgaz Tomsk", Russian Federation E-mail: empiric@mail.ru

Keywords: rotating fullerene; charged particle; fullerite.

Abstract. The interaction of a charged particle and a rotating fullerene molecule in a fullerite crystal is studied. A mathematical model is constructed and implemented for fullerene rotation frequencies up to 100 THz and velocities of an incident charged particle of the order of 1000 m/s. The study was carried out using the methods of classical molecular physics. The characteristics of the motion of the C_{60} fullerene molecule were determined using the laws of classical mechanics, the Euler approach, and the fourth-order numerical Runge-Kutta method. Based on the results of the performed numerical experiments, the influence of a moving charged particle on the displacement of a rotating metal-fullerene from its initial position was analyzed.

К настоящему времени создано несколько тысяч фуллеренсодержащих материалов с разнообразными свойствами, такими как повышенная прочность, твердость, износостойкость, высокая пожаро-, хемоустойчивость, термическая стабильность и т.д. Для их получения применяется метод полимеризации под высоким давлением и температурой, а также способ, основанный на взаимодействии ускоренных ионов с пленками фуллерита. При имплантировании ионов происходит разрушение и сильная фрагментация молекул С₆₀ или выбивание атома углерода из каркаса молекулы С₆₀ [1]. В работе [2] отмечается, что молекулы фуллерена в кристалле фуллерита совершают вращательные движения со средними угловыми скоростями порядка 100 рад/нс. Данный факт можно использовать для снижения внешнего силового воздействия и перераспределения нагрузки на группу атомов, принадлежащих фуллерену. Особый интерес представляет исследование прецессионного движения узлов молекулярного кристалла, в рамках которого может возникать гироскопический эффект, важный с точки зрения изменения характеристик материала. Используя гироскопический эффект, можно стабилизировать молекулу фуллерена около своего положения равновесия и увеличить внутреннее противодействие внешним воздействиям на поверхность материала. Вращательное движение и гироскопический эффект могут позволить воспрепятствовать выбиванию отдельного атома или целого фрагмента из каркаса С60.

Целью работы является проведение сравнительного исследования влияния вращательного движения и заряда молекулы фуллерена на способность противодействовать внешнему воздействию набегающей частицы.

В данной работе мы моделируем взаимодействие заряженной набегающей частицы (аниона ксенона) и молекулы С₆₀, имеющей положительный или нейтральный заряды и находящейся в узле гранецентрированной кубической решетки. Центральный фуллерен рассматривается как жесткая каркасная структура, состоящая из шестидесяти атомов углерода. Динамическое состояние фуллерена определяется характером взаимодействия атомов углерода его составляющих со всеми окружающими элементами системы. Ближайшее окружение центрального фуллерена составляют 12 молекул С₆₀, которые в начальный момент времени находятся на расстоянии 1.002 нм от центра масс вращающейся молекулы С₆₀. Взаимодействие частицы с атомами углерода центрального фуллерена описывается на основе потенциала Леннарда–Джонса (12-6 отталкивание–притяжение) [3]. Для таких параметров задачи длина волны де Бройля набегающей частицы и молекулы фуллерена становится меньше диаметра атомного ядра углерода. Поэтому вполне оправданным является применение классической механики к описанию динамики рассматриваемых частиц. Нейтральные фуллерены окружения имеют сглаженный сферический потенциал взаимодействия с отдельными атомами [4], который также определяет взаимодействие с нейтральной частью набегающей заряженной частицы.

Для описания вращательного движения центральной молекулы фуллерена вокруг ее собственного центра масс используются динамические уравнения Эйлера [3]. Движение центра масс центрального фуллерена и заряженной частицы описывается уравнениями движения, в которых учитывается влияние силы Кулона и потенциалов взаимодействия [3, 4].

В начальный момент времени центральному фуллерену придается вращательное движение с угловой скоростью, которая варьируется в диапазоне от 0 до 1500 рад/нс. Набегающая частица движется скоростью 500– 1000 м/с в его направлении. Задача решается с помощью схемы Рунге– Кутты 4-го порядка точности [5], которая позволяет определять пространственные траектории набегающей частицы и каждого атома центрального фуллерена.

На рис. 1 показана зависимость координаты x_c центра масс, которая определяет траекторию движения фуллерена поскольку координаты y_c , z_c изменяются незначительно. Как видно из рис. 1, после удара заряженной частицы молекула C_{60} начинает совершать колебательные движения вдоль оси x, амплитуда которых зависит от начальной скорости вращения и заряда фуллерена. Наличие заряда приводит к практически полному экранированию силового воздействия частицы (пунктирная кривая). В отсутствие заряда вращательное движение молекулы фуллерена с угловой скоростью $\omega^0 = 1500$ рад/нс позволяет снизить максимальное отклонение от первоначального положения на 9,6% по сравнению с $\omega^0 = 0$ рад/нс.



Рис. 1. Траектория движения центра масс молекулы фуллерена после взаимодействия с заряженной частицей

Результаты расчетов показали, что внутри гранецентрированной решетки молекула C₆₀ совершает возвратно-вращательное движение с угловой скоростью от 0 до 650 рад/нс, которая удовлетворительно согласуется с данными эксперимента [2]. Переход к вращательному движению осуществляется при начальных угловых скоростях в диапазоне от 1000 до 1100 рад/нс. Взаимодействие с набегающей положительно зараженной частицей приводит к уменьшению смещения вращающегося фуллерена от первоначального положения по сравнению со случаем незаряженной набегающей частицы. Данные результаты показывают, что материалы, основанные на фуллерене, могут сильнее противодействовать внешнему воздействию при наличии заряда и вращения.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант №19-71-10049).

Литература

1. Todorovic-Markovic B., Draganic I., Vasiljevic-Radovic D., Romcevic N., Romcevic M., Dramicanin M., Markovic Z. Structural modification of fullerene thin films by highly charged iron ions // Applied Physics A, 2007, Vol. 89. P. 749–754.

2. Johnson R.D., Yannoni C.S., Dorn, H.C., Salem, J.R., Bethune D.S. C60 rotation in the solid state: Dynamics of a faceted spherical top // Science, 1992, Vol. 255. P. 1235–1238.

3. Bubenchikov M., Ovchinnikov V., Mamontov D. Numerical study of precession characteristics of rotating fullerene-C60 in intermolecular interaction // AIP Conference Proceedings, 2020, 2212, № 020013.

4. *Рудяк В.Я.* Статистическая аэрогидромеханика гомогенных и гетерогенных сред. Т. 1. Новосибирск: НГАСУ, 2005. 320 с.

5. Ortega J.M. An introduction to numerical methods for differential equations. Pitman Pub.: Marshfield, USA, 1981. P. 329.

References

1. Todorovic-Markovic B., Draganic I., Vasiljevic-Radovic D., Romcevic N., Romcevic M., Dramicanin M., Markovic Z. Structural modification of fullerene thin films by highly charged iron ions // Applied Physics A, 2007, Vol. 89. P. 749–754.

2. Johnson R.D., Yannoni C.S., Dorn, H.C., Salem, J.R., Bethune D.S. C60 rotation in the solid state: Dynamics of a faceted spherical top // Science, 1992, Vol. 255. P. 1235–1238.

3. Bubenchikov M., Ovchinnikov V., Mamontov D. Numerical study of precession characteristics of rotating fullerene-C60 in intermolecular interaction // AIP Conference Proceedings, 2020, 2212, № 020013.

4. *Rudyak V.Ya*. Statistical aerohydromechanics of homogeneous and heterogeneous media. Vol. 1. Novosibirsk: NSUACE, Russia, 2005. P. 320.

5. Ortega J.M. An introduction to numerical methods for differential equations. Pitman Pub.: Marshfield, USA, 1981. P. 329.

СВЯЗАННАЯ МЕХАНОХЕМОДИФФУЗИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ВОЛНОВЫХ ЯВЛЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ МАТЕРИАЛА ПРИ ОБРАБОТКЕ ПОТОКОМ ЧАСТИЦ

Е.С. Парфенова, А.Г. Князева

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия E-mail: linasergg@mail.ru

Ключевые слова: связанная модель, упругие напряжения, диффузия, время релаксации потоков тепла и массы, химическое взаимодействие.

Аннотация. Представлена в неизотермическом приближении связанная математическая модель начальной стадии процесса внедрения частиц в поверхность металла с учетом их химического взаимодействия с частицами обрабатываемого материала. В общем случае модель включает уравнения теплопроводности, баланса для внедряемого компонента и уравнение движения. Определяющие соотношения соответствуют теории обобщенной термоупругой диффузии. В модели учитываются конечность времен релаксации к термодинамическому равновесию потоков тепла и массы и взаимодействие волн разной физической природы (волн концентрации примеси, волн напряжений (деформаций) и температуры). Задача реализована численно с использованием метода прогонки. Приведены примеры решения связанной задачи. Продемонстрированы искажения волн деформации и температуры, которые и свидетельствуют о взаимодействии исследуемых процессов. Установлено, что образование химического соединения приводит к уменьшению концентрации примеси и увеличению температуры, напряжений и деформации.

COUPLED MECHANOCHEMODIFFUSION MODEL FOR DESCRIBING WAVE PHENOMENA IN THE SURFACE LAYER OF MATERIAL DURING TREATMENT BY PARTICLES FLUX

E. Parfenova, A. Knyazeva

Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Russian Federation E-mail: linasergg@mail.ru

Keywords: coupled model, elastic stress, diffusion, relaxation time of heat and mass fluxes, chemical interaction.

Abstract. The paper presents a coupled mathematical model of the initial stage of particle penetration in the metal surface in non-isothermal approximation with account the chemical interaction implanted particles and target particles. The simplified one-dimensional model includes the heat conduction equation, the equation of implanted component balance and the equation of motion. The governing relations correspond to the theory of generalized thermoelastic diffusion. The model takes into account the finiteness of relaxation times of heat and mass fluxes and the interaction of waves of different physical nature – impurity concentration, stresses (strain) and temperature. The problem was solved numerically using

the double sweep method. The paper presents examples of coupled problem solving. The obtained results demonstrated distortions in deformation and temperature waves which are indicative of the interaction between the processes under consideration. The formation of chemical compound leads to a decrease in the impurities concentration and an increase in temperature, stresses and deformation.

В настоящее время использование различных металлических изделий без предварительной обработки, улучающей поверхностные свойства, нецелесообразно, так как с повышением технологических свойств материала срок службы значительно увеличивается. С целью улучшения механических свойств и износостойкости широко используют разные методы поверхностной обработки металлов потоками заряженных частиц. Но недостаточное понимание физических процессов, протекающих в твердом теле при его обработке пучками частиц, ограничивает возможности данного метода, несмотря на имеющийся экспериментальный и теоретический материал. Поэтому исследования в данной области являются актуальными.

При столкновении частиц потока с обрабатываемой поверхностью наблюдается ряд физических и химических процессов, которые взаимодействуют друг с другом и оказывают влияние на конечный результат.

Цель настоящей работы состоит в численном исследовании совместного распространения упругих механических волн (которые генерируются при ударе частиц о поверхность) и диффузии внедряемых частиц с учетом их химического взаимодействия с обрабатываемым материалом и неизотермичности процесса. При построении математической модели учитываются времена релаксации потоков тепла и массы. Таким образом, уравнения теплопроводности и диффузии не соответствуют классическим уравнениям.

Взаимодействие потока заряженных частиц с поверхностью металла с учетом химических реакций частиц с материалом мишени можно описать в рамках модели, включающей в общем случае уравнения теплопроводности, уравнения баланса внедряемого компонента и движения, а также уравнение для описания скорости образования продукта химической реакции. При этом деформации, скорости и ускорения считаем малыми, а поток частиц равномерно распределённым вдоль обрабатываемой поверхности (следовательно, можно ограничиться одномерной задачей). Уравнения теплопроводности и баланса внедряемого компонента в данной работе включают источник/потери тепла вследствие химической реакции и потери компонента на образование химического соединения соответственно, в отличие от работы [1], где возможное химическое взаимодействие не рассматривалось. Определяющие соотношения соответствуют теории обобщенной термоупругой диффузии [2-4],но дополняются физикохимическими изменениями. Компоненты тензоров деформаций связаны с компонентами тензора упругих напряжений, концентрациями и температурой соотношениями теории термоупругой диффузии [4]. А в случае ма-298

лых перемещений и деформаций имеют место соотношения Коши. В соотношении для потока массы учтен перенос под действием напряжений; примем, что времена релаксации потоков тепла и массы – различны; явления Соре и Дюфора не учитываем.

Для удобства численного исследования осуществлен переход к безразмерным переменным. Задача была решена численно по неявной разностной схеме. В результате получены примеры распределения упругих волн, волн концентрации внедряемого компонента и тепловой волны с учетом их взаимодействия (рис. 1).



а – распределение концентрации внедренного материала; б – распределение массовой доли продукта реакции; в – распределение напряжений; г – распределение температуры.
Моменты времени т: 1 – 0.025; 2 – 0.03; 3 – 0.04; 4 – 0.05; 5 – 0.06. Время действия импульса т_{imp} = 0.05

При выбранном наборе параметров достаточно отчётливо выделяется влияние друг на друга волн температуры и напряжения. В волне температуры имеется максимум на некотором расстоянии от обрабатываемой поверхности при временах, близких и сравнимых со временем действия импульса; таким образом, в этом временном интервале температура в глубине образца немного больше, чем на поверхности. Максимуму температуры соответствует экстремум на упругой волне (серые квадраты). А черными кругами на волне напряжений отмечено искажение – это минимальное 299 значение деформации. Распределение концентрации примеси не имеет видимых искажений, но, как и тепловая волна, имеет волновой характер. Если в моменты времени 1 и 2 концентрация примеси на левой границе уменьшается, вследствие активной химической реакции, то к моментам 3 и 4 (время действия импульса) заметен рост концентрации примеси в этой области. Таким образом, можно сделать вывод, что поступающая примесь не успевает потратиться в реакции и идет ее незначительное накопление на границе. После окончания действия импульса (момент времени 5) реакция продолжается, следовательно, тепловыделения в реакции и тепла, поступившего извне, еще достаточно на химическое взаимодействие.

Стоит отметить, что большое значение имеет выбранный набор параметров модели, и, возможно, другое их сочетание позволит выявить новые или усилить уже установленные взаимодействия рассматриваемых процессов. Область изменения параметров зависит не только от параметров вещества и реакций, но и от режима обработки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках научного проекта № 20-21-00064 Росатом.

Литература

1. Парфенова Е.С., Князева А.Г. Неизотермическая механодиффузионная модель начальной стадии процесса внедрения потока частиц в поверхность мишени // Вычислительная механика сплошных сред. 2019. Т. 12. №1. С. 36–47.

2. Sherief H.H., Hamza F., Saleh H. The Theory of Generalized Thermoelastic Diffusion // Int. J. Eng. Sci., 2004. Vol. 42. P. 591–608.

3. *Aouadi M*. Generalized Theory of Thermoelastic Diffusion for Anisotropic Media // J. Thermal Stresses, 2008. Vol. 31. P. 1–16.

4. *Князева А.Г*. Нелинейные модели деформируемых сред с диффузией // Физ. мезомех. 2011. Т. 14, № 6. С. 35–51.

References

1. *Parfenova E.S., Knyazeva A.G.* Non-isothermal mechanodiffusion model of the initial stage of penetration of particle flow in a target surface. Vychisl. mekh. splosh. sred – Computational continuum mechanics, 2019. Vol. 12. No. 1. P. 36–47.

2. *Sherief H.H., Hamza F., Saleh H.* The Theory of Generalized Thermoelastic Diffusion. Int. J. Eng. Sci., 2004. Vol. 42. P. 591–608.

3. *Aouadi M*. Generalized Theory of Thermoelastic Diffusion for Anisotropic Media. J. Thermal Stresses, 2008. Vol. 31. P. 1–16.

4. *Knyazeva A.G.* Nonlinear diffusion models of deformed media. Fiz. mezomekh. – Physical mesomechanics, 2011. Vol. 14. No. 6. P. 35–51.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА МНОГОСЛОЙНУЮ ПЛАСТИНУ ЧЕРЕЗ ВОЗДУШНЫЙ ЗАЗОР

С.А. Пономарев, А.В. Азин, С.В. Пономарев, С.В. Рикконен

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

Ключевые слова: ультразвук, проходящий через воздух; многослойная система, математическая модель, коэффициент затухания, интерференция волн.

Аннотация. Для проектирования ультразвуковых акустических систем необходимо учитывать волновую картину процесса передачи энергии в пространстве, которая существенно зависит от соотношения длины волны и толщины слоя сплошной среды. Важным моментом является поглощение энергии в среде, которая существенно изменяет интерференционную картину процесса передачи энергии ультразвуковым полем. В работе предложена математическая модель, позволяющая смоделировать передачу акустической энергии в многослойную пластину через воздушный зазор с учетом коэффициента затухания среды. Это позволяет увеличить достоверность получаемых расчетных данных при определении несплошностей в структуре многослойных пластин.

SIMULATION OF THE IMPACT OF ULTRASONIC WAVE ON A MULTILAYER PLATE THROUGH AN AIR GAP

S. Ponomarev, A. Azin, S. Ponomarev, S. Rikkonen

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

Keywords: 1 Air-coupled ultrasound; multilayer structures; mathematical model; rate damping; wave interference.

Abstract: In order to design ultrasonic acoustic systems, it is necessary to take into account the wave pattern of the energy transmission process in space, which depends substantially on the ratio of the wavelength to the thickness of the layer of solid medium. An important point is energy absorption in the medium, which significantly changes the interference pattern of the transmission of energy by an ultrasonic field. A mathematical model for simulating the transfer of acoustic energy into a multilayer plate through an air gap with the attenuation coefficient is proposed. This makes it possible to increase the reliability of the calculated data obtained when determining irregularities in the structure of multilayer plates.

Ультразвуковой метод контроля является одним из самых распространенных методов неразрушающего контроля изделий из разнообразных материалов. Различают контактный и бесконтактный (через воздух) ультразвуковые методы проведения контроля. Бесконтактный метод контроля имеет ряд преимуществ:

во-первых, этот метод не загрязняет поверхность испытуемого материала и не изнашивает преобразователь, а испытуемые материалы не могут быть повреждены при погружении в жидкость;

во-вторых, из-за удобства инсталляции и высокой скорости тестирования, бесконтактный метод был признан в отдельных сферах применения потенциально пригодным для оценки качества через онлайн-мониторинг. Однако ультразвуковое исследование через воздух не может полностью заменить традиционные ультразвуковые методы (контактный и иммерсионный (с погружением в воду)) из-за его некоторых недостатков, например, узкой полосы пропускания, низкого отношения сигнал/шум и низкого разрешения [1].

Большой интерес исследователей во всем мире представляет изучение с помощью бесконтактного ультразвукового метода тестирования многослойных систем из различных материалов (древесины [2], полимеров [3], металлов [4] и композитов [5]) на наличие несплошностей в их структуре. Результаты исследований показали, для увеличения достоверности расчетных данных необходимо в математической модели распространения звуковых волн в многослойной конструкции учитывать коэффициент затухания материала каждого слоя.

Рассмотрена задача о распространении плоских волн в слоистой среде, образованной параллельными друг другу пятью слоями вещества (воздух/оргстекло/эпоксидная смола/оргстекло/воздух) (рис. 1).



Рис. 1. Схема падения нормальных волн в бесконтактной ультразвуковой диагностике [3]

Разработана математическая модель с учетом интерференции волн в слоях и поглощения звуковой энергии в слоистой среде. Для каждого слоя системы записывается выражение:

$$I_{i+1} = I_i \cdot e^{-2 \cdot \alpha(i+1) \cdot d(i+1)} \cdot e^{i2(\omega t - K(i+1) \cdot d(i+1))} - R_{i+1}^2 \cdot I_i \cdot e^{-4 \cdot \alpha(i+1) \cdot d(i+1)} \cdot e^{i2(\omega t + K(i+1) \cdot d(i+1))},$$

где I_i – интенсивность акустического поля в *i*-ом слое, Bt/m^2 ; $\alpha(i)$ – коэффициент затухания акустического поля в *i*-ом слое, дБ/м; K(i) – волновое число *i*-ого слоя, 1/м; d(i) – толщина *i*-ого слоя акустической системы, м.

Численные расчеты проводилось в пакете прикладных программ Math-Cad. Результаты теоретических расчетов согласуются с результатами экспериментальных исследований, полученными для аналогичной многослойной системы в [3].

Выводы. Разработана математическая модель распространения плоских волн в слоистой среде с учетом интерференции волн в слоях и поглощения звуковой энергии в слоистой среде.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0721-2020-0036).

Литература/References

1. Zhou Z.G., Wei D. Progress of Air-coupled Ultrasonic Non-destructive Testing Technology // Chin. J. Mech. Eng. 2008. Vol. 44. P. 10–14.

2. Marhenke T., Neuenschwanderc J., Furrerc R., Twiefela J., Hasenerb J., Niemzd P., Sanabriad S. Modeling of delamination detection utilizing air-coupled ultrasound in wood-based composites // NDT & E International. 2018. Vol. 99. P. 1–12, DOI: 10.1016/j.ndteint.2018.05.012.

3. *Wang X., Wu W., Huang Z., Chang J., Wu N.* Research on the Transmission Characteristics of Air-Coupled Ultrasound in Double-Layered Bonded Structures // Materials. 2018. Vol. 11. No. 310. DOI: 10.3390/ma11020310.

4. *Zhu Z.Y., Sui H., Yu L., Zhu H., Zhang J., Peng J.* Effective Defect Features Extraction for Laser Ultrasonic Signal Processing by Using Time-Frequency Analysis // IEEE ACCESS. 2019. Vol. 7. P. 128706–128713. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2939262.

5. *Wu W.L., Wang X., Huang Z., Wu N.* Measurements of the weak bonding interfacial stiffness by using air-coupled ultrasound // AIP ADVANCES. 2017. Vol. 7. No. 125316. DOI: 10.1063/1.5001248.

ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ НАГРУЗКИ НА ЖЕСТКУЮ СТЕНКУ ПРИ УДАРЕ ВЫСОКОПОРИСТОГО ЦИЛИНДРА

Ю.В. Попов, Г.В. Белов, В.А. Марков, В.И. Пусев, В.В. Селиванов, В.В. Фролов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия E-mail: popovuv@bmstu.ru

Ключевые слова: история нагружения, удар, жесткая стенка, механические эквиваленты, моделирование.

Аннотация. Исследование направлено на уточнение нагрузки на начальной стадии взаимодействия самолета военного назначения и сооружения атомной электростанции. В работе рассматриваются несколько подходов к определению нагрузки на жесткую стенку при ударе деформируемого ударника. В качестве ударников рассматривались механические эквиваленты бортовой аппаратуры в виде высокопористых объемноперфорированных цилиндрических образцов из алюминиевого сплава. Цель работы заключалась в установлении количественных и качественных отличий в результатах, а также оценки применимости подхода, описывающего самолет как жесткопластический стержень с распределенными по длине параметрами (подход Дж. Риеры) к механическим эквивалентам бортовой аппаратуры. Рассмотренные упрощенные подходы сравнивались с расчетами в пакете численного моделирования нестационарных процессов LS-DYNA и было показано, что они могут служить для оценки историй нагружения сверху (авторское одномерное приближение) и снизу (подход Дж. Риеры).

APPROACHES TO DEFINE THE LOAD ON THE RIGID WALL AT HIGH-POROUS CYLINDER IMPACT

Yu. Popov, G. Belov, V. Markov, V. Pusev, V. Selivanov, V. Frolov

Bauman Moscow State Technical University, Russian Federation E-mail: popovuv@bmstu.ru

Keywords: loading history, impact, rigid wall, mechanical equivalents, simulation.

Abstract. The research is aimed to refine the loads at early stages of combat aircraft and nuclear power plant interaction. The paper reviews a number of approaches to define loads on rigid wall on impact of the deformable striker. Strikers were considered as mechanical equivalents of the onboard equipment – cylindrical volume-perforated aluminum alloy samples. The main goal was to show quantitative and qualitative differences in results of approaches along with applicability of the approach in which the aircraft is represented as a rigid-plastic rod with lengthwise-distributed parameters (Riera's approach) to mechanical equivalents of the onboard equipment. Reviewed simplified approaches were compared to the finite-element analysis in LS-DYNA software and the comparison shows, that author's one-dimensional approach may be used as an upper-bound estimate of the loading history and Riera's approach – as a lower-bound estimate.

Отечественные строительные нормы и правила, а также рекомендации МАГАТЭ предполагают возможное падение самолета на сооружения атомных электростанций. Сооружения должны выдерживать такой удар без появления аварийных для внутреннего оборудования ситуаций.

В современной проектной практике задача об ударе самолета разделяется на две подзадачи. Сначала определяют внешнюю ударную нагрузку от самолета, а затем исследуют динамический отклик конструкции уже под действием заданной нагрузки. Нагрузка от ударов самолетов различных типов внесена в существующие нормы разных стран. Подход к определению такой нагрузки предложил Дж. Риера, который рассматривал взаимодействие жесткопластического стержня (эквивалентного самолету) с жесткой стенкой. Такая декомпозиция задачи позволяет значительно экономить вычислительное время и решать прикладные проблемы при проектировании. В рекомендациях МАГАТЭ допускается использование заданных историй нагружения для расчетов отклика жестких или массивных зданий и сооружений.

В известных работах при рассмотрении самолетов военного назначения типа истребителя F-4 Phantom II масса бортовой аппаратуры (БА) включается в фюзеляж, а механические свойства БА, которая размещается в самолетах военного назначения, в том числе в носовой части фюзеляжа, не упоминаются и не учитываются. Как было показано, для этого типа самолетов при скорости удара 200 м/с прочностной составляющей нагрузки нельзя пренебречь, так как она сопоставима с инерционной составляющей.

С позиций механики фюзеляж (включает силовой каркас и обшивку) и БА – это различные конструкции. Фюзеляж это совокупность тонкостенных оболочек и балок, а БА – это композиционная высокопористая среда, которая по компоновочным характеристикам, составу материалов и механическим свойствам весьма близка к высокопористым алюминиевым сплавам и сотовым конструкциям из алюминиевых сплавов. БА составляет 70–75% массы внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов и заполняют 90–95% площади поперечного сечения отсека. При этом количество БА на самолетах военного назначения продолжает увеличиваться как по массе, так и по ее доле в массе самолета.

В работе были рассмотрены несколько возможных подходов к определению нагрузки на жесткую стенку при ударе механических эквивалентов БА в виде цилиндрических образцов из объемно-перфорированного алюминиевого сплава. Самым трудоёмким является численное моделирование взаимодействия с прямым заданием пористости ударника, который был реализован в пакете LS-DYNA.

Для подхода Дж. Риеры в качестве исходных данных необходима зависимость предельной нагрузки разрушения по сечениям от координаты. Различия в результатах у разных исследователей связано с использованием разных зависимостей для нагрузки разрушения, но общих рекомендаций к построению зависимости нет.

Для расчета по подходу Дж. Риеры использовались эффективные пределы текучести из результатов численного моделирования сжатия образцов в трехмерной постановке с прямым заданием пористости.

Также был рассмотрен подход, в котором нагрузка рассчитывалась по авторской программе в одномерном приближении. Для описания высокопористой среды использовалась модель Кэрролла–Холта. Это одна из наиболее простых моделей, которая позволяет описывать поведение высокопористой среды по свойствам материала матрицы и априорно получить первое приближение для диаграмм деформирования.

Полученные по разным подходам истории нагружения сравнивались как качественно, так и количественно. При скорости удара 100 м/с нагрузка по модели Дж. Риеры оказалась достаточно близка к наиболее затратному численному моделированию с прямым заданием пористости, особенно для менее плотных образцов. Модель Дж. Риеры не воспроизводит начальный пик нагрузки и ее плавный спад в конце нагружения. Однако важно отметить, что хорошее совпадение обеспечивалось эффективным пределом текучести из результатов моделирования сжатия образцов. В ситуации, когда необходимо провести первоначальные инженерные оценки без привлечения трехмерного численного моделирования в пакетах прикладных программ, для описания материала может быть использована достаточно простая модель Кэрролла-Холта. Эта модель использовалась для описания поведения высокопористой среды одномерного стержня при ударе о жесткую стенку в авторской программе. С увеличением скорости удара выше 100 м/с (рассматривались скорости 150, 200 и 250 м/с) растет роль эффектов упрочнения, и появляются колебания нагрузки, связанные со схлопыванием пор. Это приводит к нагрузкам выше, чем были рассчитаны по подходу Дж. Риеры. Результаты по авторской программе, использующей модель полых сфер, приводит к верхним оценкам амплитудных значений давления. Это связано с рядом допущений модели полых сфер. Каждый из рассмотренных подходов имеет свои особенности и область применимости. Рассмотренные упрощенные подходы (подход Дж. Риеры и одномерное приближение) позволили получить верхнюю и нижнюю оценку амплитудных значений нагрузки на жесткую стенку, которая была получена из результатов численного моделирования с прямым заданием пористости.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-00701-а).

РАЗДЕЛЕНИЕ ИЗОТОПОВ ГЕЛИЯ С ПОМОЩЬЮ ДВОЙНОЙ МЕМБРАНЫ НИТРИДА УГЛЕРОДА

В.А. Потеряева, М.А. Бубенчиков

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

Ключевые слова: разделение изотопов, туннелирование, полиномы Эрмита.

Аннотация. В работе изучается задача разделения смеси изотопов гелия с помощью двухслойных мембран графитового нитрида углерода (graphitic carbon nitride). Потенциальная энергия взаимодействия мембраны с гелием получена на основе модифицированного потенциала Леннарда–Джонса. Проницаемость мембраны определяется из решения уравнения Шредингера с применением полиномов Эрмита. Построенное на их основе решение интегрального уравнения Шредингера обладает высокой точностью, поскольку в этом случае волны материи могут свободно проходить по всей действительной оси, при этом отсутствует необходимость "сшивки" решений на конечном интервале.

HELIUM ISOTOPE SEPARATION THROUGH THE BI-LAYER CARBON NITRIDE MEMBRANE

V. Poteryaeva, M. Bubenchikov

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

Keywords: isotope separation, tunneling, Hermite polynomials.

Abstract. The helium isotope separation through bi-layer membranes of graphitic carbon nitride has been studied. The potential energy is obtained based on the modified LJ potential. The permeability of a membrane is calculated solving Schrödinger equation with the use of Hermite functions. The solution of the Schrödinger integral equation constructed on their basis is highly accurate since, in this case, waves of matter can freely pass along the entire real axis, and moreover, there is no need for "matching" solutions on the finite interval.

Актуальность. Несмотря на широкую распространенность гелия во Вселенной, его земные источники ограничены. В настоящее время гелий добывается из природного газа с помощью криогенной дистилляции, адсорбции при переменном давлении, а также мембранного метода. Последний является более предпочтительным ввиду его меньшей стоимости и простоты. В свою очередь, разделение изотопов также является актуальной проблемой. Изотоп 4He составляет основную часть гелия, в то время как 3He является весьма редким и ценным элементом. В настоящее время гелион получают как продукт радиоактивного распада трития, что далеко не удовлетворяет спрос на него. 3He находит применение в криогенной промышленности, медицине (магнитно-резонансная томография), для детектирования нейтронов.

Цель и задачи. Решить задачу разделения изотопов гелия и определить оптимальные условия данного процесса.

Задачи:

– создать алгоритм решения уравнения Шредингера, основанный на применении полиномов Эрмита;

 найти потенциальную энергию взаимодействия двухслойной мембраны нитрида углерода с гелием;

- провести расчеты проницаемости мембраны для изотопов гелия;

- найти резонансные условия прохождения компонент.

Методология. Изотопы одного элемента имеют идентичные химические свойства, поэтому их разделение возможно лишь с помощью зависящих от массы процессов, например, использующих квантовые эффекты. В отличие от классического способа определения проницаемости мембраны, когда однозначно известно, преодолеет молекула с заданной кинетической энергией потенциальный барьер или нет, в квантовомеханическом случае всегда существует вероятность прохождения молекулой мембраны. Разделение достигается благодаря небольшим различиям вероятностей прохождения двух изотопов через узкий потенциальный барьер подходящей формы, который напрямую зависит от выбора материала и конструкции наномембраны. Использование двойного барьера позволяет увеличить разницу в прохождении изотопов при определенных условиях за счет возникающего резонансного эффекта. При расстоянии между двумя пиками потенциальной энергии, кратному длине волны де Бройля одного из изотопов, его способность преодолевать барьер существенно увеличивается, в то время как другая компонента еще более задерживается вторым барьером [1].

Разделение изотопов более требовательно к выбору материала и конструкции мембраны в отличие от разделения смесей обычных газов в виду их близких размеров и свойств. Недавние исследования показывают, что пористые графеновые и графеноподобные мембраны (например, нитрида углерода [2]), а также мембраны из цеолита и полимерные материалы успешно разделяют изотопы [3]. Кроме того, хорошо себя показывают и различные конструкции углеродных аллотропов: нанотрубки, нанонити, нанорожки.

Вероятность прохождения атома через барьер определяется из решения стационарного уравнения Шредингера. Уравнение обычно решается численно с помощью конечно-разностного метода. Однако в данной работе предлагается аналитический способ получения решения уравнения Шредингера, который основан на использовании многочленов Эрмита.

Разложение по полиномам Эрмита [4] значительно облегчает решение интегро-дифференциальных [5] и интегральных уравнений, возникающих во многих физических и инженерных задачах. Тот факт, что множество

полиномов Эрмита образуют базис, позволяет раскладывать различные функции в ряд, что облегчает решение множества задач. Полиномы Эрмита сыграли решающую роль в теории флуктуаций света и квантовых состояний и, в частности, проблемах береговой гидродинамики и метеорологии. Метод разложения по полиномам Эрмита используется в биологических и эпидемиологических науках, экономических задачах.

Эти полиномы являются, безусловно, полезными для решения любых задач, в которых решение определено на всей действительной оси. К таким задачам приводит анализ процессов отражения и прохождения волн через заданные потенциальные барьеры. Другими словами, это задачи волновой динамики Шредингера. Их решение позволяет найти вероятность прохождения атомов и молекул, представляемых в виде волн де Бройля, через различные мембраны.

Основные результаты и выводы. Для разделения смеси изотопов гелия была использована двойная мембрана из графитового нитрида углерода. Были проведены расчеты проницаемости мембраны в отношении изотопов гелия для различных значений расстояния между двумя слоями тонких листов b при криогенных температурах в пределах T=10–60 К. Для каждого значения b в пределах от 0.1 до 6 нм была вычислена максимальная степень разделения смесей изотопов.

Согласно полученным результатам значение селективности R = 1046 достигается при выделении гелиона, в то время как использование однослойной мембраны в тех же условиях дает степень разделения изотопов 1.34. Условия, при которых достигается максимальная проницаемость мембраны: температура T = 12 K, расстояние между листами мембраны b = = 4.6 нм.

Таким образом, в работе найдены условия, при которых достигается максимальная степень разделения изотопов гелия при использовании двухслойной мембраны нитрида углерода. Для получения проницаемости мембраны было решено уравнение Шредингера с помощью разложения функций, используя многочлены Эрмита.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-51-44002).

Литература/References

1. *Poteryaeva V.A., Bubenchikov M.A., Jambaa S, D Gankhuyag D.* Tsedenbaya. Quantum tunneling of molecules through compound barriers // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1527. P. 012008. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1537/ 1/012008/meta

2. *Feng Li, Yuanyuan Qu, Mingwen Zhao*. Efficient Helium Separation of Graphitic Carbon Nitride Membrane // Carbon. 2015. Doi: 10.1016/j.carbon.2015.08.013

3. *Joshua Schrier*. Helium Separation Using Porous Graphene Membranes // J. Phys. Chem. Lett. 2010, 1, 2284-2287. DOI: 10.1021/jz100748x

4. (1998) Hermite Polynomials. In: Weyl Transforms. Universitext. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/0-387-22778-4_18

5. *Akgönüllü, N., Şahin N., Sezer M.* A Hermite collocation method for the approximate solutions of high-order linear Fredholm integro-differential equations // Numerical Methods for Partial Differential Equations. 2010. 27(6), 1707–1721. Doi:10.1002/num.20604

МЕТОД ФИКТИВНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧЕ ДЛЯ СЛОЯ, ОСЛАБЛЕННОГО ТРЕЩИНОЙ

И.С. Телятников¹, А.В. Павлова²

¹Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской Академии наук, Россия ²Кубанский государственный университет, Россия E-mail: ilux t@list.ru

Ключевые слова: упругий слой, трещина отрыва, метод фиктивного поглощения.

Аннотация. Слой или слоистая среда с трещиной или системой трещин служат моделями различных природных структур, например, геологических, и конструкционных элементов. Использование положений теории «вирусов» вибропрочности позволяет строить системы интегральных уравнений для слоистых сред с плоскими дефектами, в свою очередь для решения интегральных уравнений (ИУ) может быть применен метод фиктивного поглощения (МФП). Цель настоящей работы – построение решения интегрального уравнения задачи об установившихся колебаниях упругого слоя вызванных вибрацией берегов внутренней трещины конечных размеров и нулевой толщины с использованием модифицированного МФП. В работе представлен алгоритм решения ИУ с растущим символом ядра задачи о вибрации одиночной плоской трещины в слое, который может быть применен для решения систем уравнений динамических задач для пакета слоев с нарушением сплошности их соединений. МФП, являясь полуаналитическим, дает возможность исследовать особенности решений ИУ и учитывать их при разработке численных алгоритмов.

FICTITIOUS ABSORPTION METHOD IN A DYNAMIC PROBLEM FOR A LAYER WEAKENED BY A CRACK

I. Telyatnikov¹, A. Pavlova²

¹Federal Research Centre The Southern Scientific Centre of the Russian Academy of The Sciences, Russian Federation ²Kuban State University, Russian Federation E-mail: ilux t@list.ru

Keywords: elastic layer, separation crack, fictitious absorption method.

Abstract. A layer or layered medium with a fracture or fracture system serves as a model for various natural structures, such as geological and structural elements. The use of the provisions from the theory of the vibration strength «viruses» allows us to construct systems of integral equations (IE) for layered media with flat defects. And to solve aforementioned inte-

gral equations we can apply the fictitious absorption method (MPA). The purpose of the work presented is to construct a solution for the integral equation of the steady-state oscillation problem on an elastic layer caused by vibration of the edges of an internal fracture with finite dimensions and zero thickness using a modified MPA. In the paper we present an algorithm for solving the IE with a growing kernel symbol for the vibration problem of a singular flat fracture in a layer, which can further be used to solve equation systems of dynamic problems for a package of layers with discontinuity in their connections. The MPA, being a semi-analytical method, makes it possible to investigate the features of the IE solutions and take them into account during the development of numerical algorithms.

Введение. Результаты исследования напряженного состояния и характеристик волновых полей в слоистых средах, ослабленных трещинами, востребованы при решении многочисленных практических задач: строительная механика, неразрушающий контроль, вибрационная сейсморазведка, материаловедение и пр.

Слой или слоистая среда с трещиной или системой трещин служат моделями различных природных структур, например, геологических и конструкционных элементов. Использование положений теории «вирусов» вибропрочности позволяет строить системы интегральных уравнений для слоистых сред с плоскими дефектами, в свою очередь для решения интегральных уравнений (ИУ) может быть применен метод фиктивного поглощения (МФП) [1, 2]. МФП, являясь полуаналитическим, дает возможность исследовать особенности решений ИУ и учитывать их при разработке численных алгоритмов.

Цель работы. Построение решения интегрального уравнения задачи об установившихся колебаниях упругого слоя, вызванных вибрацией берегов внутренней трещины конечных размеров и нулевой толщины с использованием модифицированного МФП. Для этого решается задача преобразования интегрального оператора.

Постановка задачи и метод решения. Рассматривается ИУ осесимметричной задачи о возбуждении гармонических колебаний в упругом слое вибрацией берегов круглой трещины отрыва ($\Omega : x^2 + y^2 \le a^2$), т.е. к берегам трещины приложена гармоническая вертикально направленная нагрузка. Верхняя грань слоя свободна от нагрузок, в области трещины заданы равные напряжения на противоположных ее берегах, на нижней грани слоя ставятся условия отсутствия смещений. В этом случае вектор скачка перемещений и вектор напряжений на берегах трещины имеют одну компоненту, отличную от нуля. Так как рассматривается случай установившихся колебаний, решается ИУ для амплитудного значения скачка перемещений на берегах трещины

$$\int_{0}^{a} k(r,\tau) q(\tau) \tau \mathrm{d}\tau = f(r), \ 0 \le r \le a \,, \tag{1}$$

$$k(r,\tau) = \int_{\Gamma_0} K(\alpha) J_n(\alpha r) J_n(\alpha \tau) \alpha d\alpha.$$

Основной трудностью решения таких интегральных уравнений является растущая асимптотика символов их ядер на бесконечности. В отличие от символов ядер интегральных уравнений контактных задач, решаемых методом фиктивного поглощения, в данной задаче символа ядра ИУ имеет степенной рост, $K(\alpha) = C |\alpha| [1 + O(\alpha^{-1})]$, $|\alpha| \to \infty$. Ядро интегрального оператора в этом случае является обобщенной функцией. Для преодоления этой сложности в работе применен подход, изложенный в [3], использующий вынос дифференциального оператора определенного вида из обеих частей ИУ. Вынося из обеих частей интегрального уравнения дифферен-

циальный оператор $-L_n + l^2$, где $L_n = -\left(\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{d}{dr}\right) - \frac{n^2}{r^2}\right)$, l – некоторая

константа, в рассматриваемой области можно получить интегральное уравнение с убывающей на бесконечности функцией символа ядра. Использование такого преобразования, а также свойств цилиндрических функций позволяют применить для решения ИУ метод фиктивного поглощения. Кроме того, ставится физически обоснованное условие равенства нулю скачка перемещений на краю трещины, позволяющее избавиться от произвола, вносимого преобразованием оператора. Т.е. решение ИУ отыскивается в классе суммируемых функций $q(r) \in \mathbf{L}_b(0,a)$ (b > 1), обращающихся в нуль на границе области трещины q(a) = 0.

Не нарушая общности рассматриваемой задачи, можно считать, что функция амплитудной характеристики нагрузки f(r) на берегах трещины представима равномерно сходящимся рядом по функциям Бесселя первого рода или интегралом Фурье – Бесселя. Тогда в (1) в качестве правой части можно рассматривать $J_n(\eta r)$, $\text{Im}\eta = 0$, $\eta > 0$, а преобразованное ИУ задачи будет иметь в правой части линейную комбинацию функций Бесселя $J_n(\eta r)$, $I_n(\eta r)$, содержащую произвольную постоянную. В силу линейности интегрального оператора для построения решения можно строить решение для каждой из функций отдельно.

Алгоритм метода фиктивного поглощения позволяет свести полученное ИУ к уравнению с регулярным на вещественной оси символом ядра, характерным для среды с поглощением. Неизвестная постоянная, входящая в решение, определяется из условия равенства нулю скачка перемещений на краю трещины. Постоянная выбирается так, чтобы устранить корневую особенность на краю отрезка [0, a].

Заключение. В настоящей работе построено решение интегрального уравнения осесимметричной задачи о возбуждении гармонических колеба-

ний в упругом слое вибрацией берегов круглой в плане трещины заданного радиуса (r=a). При этом в качестве вспомогательных использованы решение ИУ осесимметричной задачи для среды с поглощением для правой части в виде функции Бесселя первого рода [4] и построенное в работе решение ИУ вспомогательной статической задачи для ИУ с правой частью в виде модифицированной функции Бесселя $I_n(lr)$. Исследованы зависимости амплитудных значений скачка перемещений на берегах трещины от частоты колебаний и свойств упругой среды.

Представленный в работе алгоритм решения интегрального уравнения задачи о вибрации одиночной плоской трещины в слое может быть применен для решения систем уравнений динамических задач для пакета слоев с нарушением сплошности их соединений, свойства матриц-символов ядер которых описаны в [5].

Фрагменты работы выполнены в рамках ГЗ ЮНЦ РАН, проект № 01201354241 и частично поддержаны РФФИ (проект 19-08-00145).

Литература

1. Ворович И.И., Бабешко В.А., Пряхина О.Д. Динамика массивных тел и резонансные явления в деформируемых средах. М.: Научный мир, 1999. 248 с.

2. *Telyatnikov I.S., Pavlova A.V., Kapustin M.S.* Modification of the fictitious absorption method for solving integral equations of mixed problems for arbitrary simply connected regions // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1709(012024)

3. *Бабешко В.А.* К проблеме динамического разрушения трещиноватых слоистых тел // ДАН СССР.1989. Т. 207, № 2. С. 324–327.

4. Ворович И.И., Бабешко В.А. Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей. М.: Наука, 1979. 319 с.

5. Пряхина О.Д., Смирнова А.В., Кардовский И.В., Мазин В.А. О свойствах матриц Грина динамических задач для многослойной среды с трещинами // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2004. № 4. С. 13–17.

References

1. Vorovich I.I., Babeshko V.A., Pryakhina O.D. The dynamics of massive bodies and resonance phenomena in deformable media. M.: Scientific World, 1999.248 p. (in Rus.)

2. *Telyatnikov I.S., Pavlova A.V., Kapustin M.S.* Modification of the fictitious absorption method for solving integral equations of mixed problems for arbitrary simply connected regions // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1709(012024).

3. *Babeshko V.A.* On the problem of dynamic fracture of fractured layered bodies // DAS USSR. 1989. Vol. 207, № 2. P. 324–327. (in Rus.)

4. Vorovich I.I., Babeshko V.A. Dynamic mixed problems of elasticity theory for nonclassical domains. Moscow: Nauka, 1979. 319 p. (in Rus.)

5. *Pryakhina O.D., Smirnova A.V., Kardovsky I.V., Mazin V.A.* On the properties of Green's matrices of dynamic problems for a multilayer medium with cracks // Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation. 2004. №. 4. P. 13–17. (in Rus.)

ЕДИНЫЙ ПОДХОД КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СИНТЕЗА И СПЕКАНИЯ

А.О. Товпинец, М.А. Дмитриева, В.Н. Лейцин

Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия E-mail: tovpinets_a@mail.ru

Ключевые слова: компьютерное моделирование, реагирующие порошковые среды, механохимические превращения, низкотемпературное спекание, остаточные напряжения.

Аннотация. Работа посвящена развитию подхода компьютерного моделирования, позволяющего исследовать определяющие факторы и режимы подготовки исходных многокомпонентных и полидисперсных химически реагирующих порошковых компактов для возможности прогнозирования структурного состояния, оценки усадки, а также физико-механических характеристик и свойств композиционных материалов, получаемых в процессе химических превращений и спекания порошковых компонентов. Развитая схема компьютерного моделирования представляется генеральной совокупностью нестационарных задач теплового баланса, модификации дисперсного материала во фронте волны синтеза и спекания, вынужденной фильтрации суспензии и жидкой фазы, макрокинетики физико-химических превращений и фазовых переходов. Процессы спекания рассматриваются для низкотемпературных совместно спекаемых композитов, получаемых современными методами аддитивных технологий. Новая комплексная модель, наряду с синтезом химически реагирующих порошковый материалов, позволяет исследовать определяющие факторы и режимы спекания: определение исходных концентрации компонентов и пор, фракционного состава компонентов, предсказывать локальные значения минимальной пористости, достигаемой в процессе спекания материала, проводить оценки усадки спекаемых компактов, остаточных напряжений в матрице композиционных материалов с учетом деструкции связующего, а так же механические и структурные характеристики.

UNIFIED APPROACH OF COMPUTER SIMULATION OF SYNTHESIS AND SINTERING

A. Tovpinets, M. Dmitrieva, V. Leitsin

Immanuel Kant Baltic Federal University, Russian Federation E-mail: tovpinets_a@mail.ru

Keywords: computer simulation, reacting powder media, mechanochemical transformations, low-temperature sintering.

Abstract. A complex computer simulation scheme has been developed. This scheme is based on a numerical model of a physically non-stationary and geometrically nonlinear two temperature boundary value problem of heat balance. Sintering processes are considered for low-temperature co-fired composites, which are obtained by modern methods of additive technologies. New computational modules have been developed to simulate the physico-chemical sintering processes. The developed complex model, along with the synthesis of

chemically reacting powder materials, makes it possible to study the determining factors and modes of sintering: determination of the initial concentration of components and pores, the fractional composition of components, to predict local values of the minimum porosity achieved in the stresses in the matrix of composite materials, taking into account the destruction of the binder, as well as mechanical and structural characteristics.

Введение и актуальность исследования. Для изучения сложных физико-химических процессов, к которым относятся процессы синтеза и/(или) спекания многокомпонентных композиционных материалов, бывает сложно, а порой и невозможно, проводить многопараметрические исследования в натурном эксперименте. В этом случае единственным способом исследования является компьютерный вычислительный эксперимент. В вычислительном эксперименте варьирование параметров отдельных моделей физико-химических процессов, сопровождающих производство композиционных материалов на всех этапах синтеза и/(или) спекания дисперсных компонентов, позволяет изучать определяющие технологические факторы формирования структуры и свойств получаемых продуктов.

Методология исследования. В качестве главного направления развития компьютерного моделирования процессов синтеза и спекания для проведения вычислительных экспериментов рассмотрено не создание новых, а расширение круга существующих алгоритмов и программ. В согласии с предложениями [1, 2] это развитие осуществляется не столько за счет замены имеющихся модулей их более совершенными версиями, сколько за счет расширения: включения в программный комплекс новых модулей, отражающих различные процессы и технологические режимы, исследуемые в ходе вычислительного эксперимента. Затем, накапливаемые модули могут комбинироваться в самых разнообразных сочетаниях, позволяя тем самым провести достаточно систематическое и глубокое изучение исследуемого явления.

Исследования процессов спекания композиционных материалов основаны на развитии подхода компьютерного моделирования механохимических процессов в ударно-нагруженных реагирующих порошковых материалах, способных к экзотермическим химическим превращениям [3]. Микромеханический подход, заложенный в основу моделирования, позволяет с одной стороны выделить исследования поведения отдельных компонентов гетерогенной среды (частиц, агрегатов частиц и реакционных ячеек), проводя их с использованием аппаратов механики деформируемого твердого тела, механики сплошной среды и численных методов. С другой стороны, дает возможность рассматривать макрокинетические процессы в гетерогенной среде, как в однородной. При этом результаты исследования процессов на микроуровнях отдельных компонентов, агрегатов частиц или ячеек среды могут быть использованы в континуальных уравнениях с помощью осредненных параметров состояния, отражающих, в том числе, поведение элементов структуры неоднородного тела. Данная компьютерная модель позволяет учитывать: возможность фазовых переходов, механическую активацию реагирующих компонентов, образование продукта химических превращений, изменение агрегатного состояния реагирующей среды, вынужденную фильтрацию расплавленного компонента смеси, изменение параметров состояния на каждом шаге физико-химических превращений, возможность формирования морфологических элементов структуры нанометрических размеров.

Основные результаты и выводы. Развитая схема компьютерного моделирования представляется генеральной совокупностью нестационарных задач теплового баланса, модификации дисперсного материала во фронте (волне горения) синтеза и/(или) спекания, вынужденной фильтрации суспензии и жидкой фазы и макрокинетики физико-химических превращений и фазовых переходов. Схема основана на базе численной модели нестационарной физически и геометрически нелинейной двух температурной краевой задачи теплового баланса.

В развитом подходе для задач спекания низкотемпературных композитов учтены следующие режимы и процессы [4]:

1) низкотемпературные превращения в процессе ламинирования;

2) учет наличия конвективных тепло- и массопереносов;

3) режим термоактивированных превращений в дисперсном слое и затекания пор;

4) режим превращений в процессе высокотемпературного отжига и кристаллизации.

Единый подход компьютерного моделирования позволяет провести оценку эффективных механических характеристик в спеченных образцах и оптимизировать концентрационные составы компонентов исходной смеси. Кроме того, разработанный подход позволяет исследовать определяющие факторы и режимы подготовки исходных многокомпонентных порошковых компактов для возможности получения прогноза структурного состояния, оценки усадки, а также физико-механических характеристик и свойств получаемых композиционных материалов [5].

Для проведения много параметрических исследований синтеза многокомпонентных реагирующих смесей с привлечением кластерных вычислительных систем разработан алгоритм распределенных вычислений многофакторных объектно-ориентированных исследований. Он позволяет автоматизировать первичную обработку и верификацию результатов вычислительных экспериментов, построение зависимостей результатов от исходных данных, корреляционных кривых, функциональных зависимостей. Благодаря модульной структуре и гибким настройкам функционал платформы может быть расширен и дополнен путем добавления новых модулей. Основная программа вычислительного эксперимента подключается в виде внешнего модуля к разработанной платформе распределенных вычислений. Использование разработанного алгоритма позволяет провести вычислительный эксперимент для различных диапазонов значений исходных параметров за обозримое время. Сокращение календарных временных затрат связано с тем, что алгоритм формирует сразу пакет исполняемых параллельно заданий для расчета и производит необходимую первичную обработку полученного комплекта результатов. Алгоритм может быть модифицирован для схожих задач, относящихся к классу распределенных вычислений.

Литература

1. *Самарский А.А.* Математическое моделирование и вычислительный эксперимент. Вестник Академии наук СССР. 1979. № 5. С. 38.

2. Горбунов-Посадов М.М. Расширяемые программы. М., 1999.

3. *Лейцин В.Н., Дмитриева М.А.* Схема компьютерного моделирования механохимических процессов в ударно-нагруженных реагирующих порошковых смесях // Вычисл. технологии. 2002. Т. 7. Ч. 2. С. 198–206.

4. *Imanaka Y*. Multilayered low temperature cofired ceramics (LTCC) technology, Springer science business media, Inc. (2005). 205 p.

5. Leitsin V.N., Dmitrieva M.A., Tovpinets A.O., Narikovich A.S., Ivonin I.V., Ponomarev S.V., Polyushko V.A. Determining factors in the formation of low-temperature ceramics structure. Physical Mesomechanics. 2018. T. 21. № 6. P. 529–537.

References

1. *Samarskiy A.A.* Mathematical modeling and computational experiment. Bulletin of the USSR Academy of Sciences. 1979. No. 5. P. 38. (in Rus.)

2. Gorbunov-Posadov M.M. Extensible programs. Moscow, 1999. (in Rus.)

3. *Leitsin V.N., Dmitrieva M.A.* Scheme of computer modeling of mechanochemical processes in shock-loaded reacting powder mixtures // Computational Technologies. 2002. T. 7. Part 2. P. 198–206. (in Rus.)

4. *Imanaka Y*. Multilayered low temperature cofired ceramics (LTCC) technology, Springer science business media, Inc. (2005). 205 p.

5. Leitsin V.N., Dmitrieva M.A., Tovpinets A.O. et al. Determining factors in the formation of low-temperature ceramics structure. Physical Mesomechanics. 2018. T. 21. № 6. P. 529–537.

ВРАЩЕНИЯ ФУЛЛЕРЕНОВ В СЕМЕЙСТВЕ ФУЛЛЕРИТОВ ОТ С₂₈ ДО С₉₆

А.С. Челнокова

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

Ключевые слова: молекулярная динамика, углы Эйлера, фуллериты.

Аннотация. Доклад посвящен исследованию вращательной динамики узлов в молекулярных кристаллах фуллеритов. Рассмотрены фуллерены группы C_{28} — C_{96} с простой кубической и гранецентрированной кубической решетками. Численные расчеты средней энергии взаимодействия пар изомеров фуллерена в зависимости от расстояния между их центрами выполнены с использованием разностных схем. На основе найденных расстояний, соответствующих минимуму энергии взаимодействия двух фуллеренов, были построены теоретические конструкции кристаллических решеток фуллеритов. Если при плотной упаковке фуллеренов ковалентные связи не возникают, то они удерживаются только силами Ван-дер-Ваальса и имеют способность вращаться вокруг собственных центров масс. Уравнения вращательной динамики фуллеренов для таких кристаллов были построены в рамках подхода Эйлера, который используется в классической механике для описания вращения любых тел вокруг их центров масс. Расчеты показали, что молекулы фуллеритов вращаются регулярно, что позволило определить их среднюю частоту вращения.

FULLERENES ROTATIONS IN A FAMILY OF FULLERITES FROM C $_{28}$ TO C $_{96}$

A. Chelnokova

National ResearchTomsk State University, Russian Federation E-mail: smolina-nyuta@mail.ru

Keywords: molecular dynamics, Euler angles, fullerites.

Abstract. We study the rotational dynamics of nodes in molecular crystals fullerites. Fullerenes from the C_{28} – C_{96} group with simple cubic (SC) and face-centered cubic (FCC) lattices are considered. Numerical calculations of the average interaction energy of fullerene isomers pairs are performed as a function of the distance between their centers using difference schemes. Based on the found distances corresponding to the minimum of the interaction energy of two fullerenes, theoretical constructions of the fullerites crystal lattices are made. If covalent bonds do not arise during dense packing of fullerenes, then they are held only by van der Waals forces and have the ability to rotate around their own centers of mass. The equations of fullerenes rotational dynamics were constructed within the framework of Euler's approach is used in classical mechanics to describe the rotations of any bodies about their centers of mass. Calculations have shown molecules in fullerites rotate in a regular manner. The found rotation of fullerenes made it possible to determine the average rotation frequency.

Возможность существования третьей, молекулярной формы углерода, наряду с графитом и алмазом, была теоретически исследована в начале 80-х годов. Эти молекулы C20+2n (n – положительное целое число) были экспериментально обнаружены в середине 80-х годов [1]. С момента разработки эффективных технологий производства, разделения и очистки фуллеренов в количествах, достаточных для выращивания кристаллов макроскопических размеров, фуллеритов [2], наблюдается постоянный интерес к их экспериментальным и теоретическим исследованиям [3]. В последние годы наблюдается рост интереса к высшим фуллеритам C₇₆, C₈₄ и 318

 C_{96} [4], а также к более мелким фуллеритам, особенно к C_{36} [5]. Настоящая работа посвящена теоретическому исследованию вращательной динамики изомеров фуллеренов из ряда C_{28} – C_{96} с наименьшей свободной энергией. Определен характер вращения узлов молекулярных кристаллов фуллеритов и их энергия взаимодействия.

Метод моделирования. Будем в своих рассуждениях исходить из условия отсутствия полимеризации. Тогда фуллерены в молекулярном кристалле удерживаются силами Ван-дер-Ваальса. С позиций поля потенциальных взаимодействий они, без учета коллективных эффектов, находятся в потенциальных ямах друг друга. Положение потенциальной ямы можно найти, сближая два фуллерена предварительно разнесенных на достаточное расстояние. При этом из-за отсутствия сферической симметрии во взаимодействии необходимо осреднять результат по углам поворота фуллеренов относительно их центров масс. Кроме того, мы будем считать фуллерены недеформируемыми объемными структурами.

Естественно, что фуллерены участвуют во вращательных и в поступательных перемещениях около их средних положений в молекулярном кристалле. Для всех указанных перемещений молекул и атомов могут быть выписаны классические уравнения динамики. Уравнения вращательной динамики фуллеренов могут быть построены в рамках подхода Эйлера, который составляет фундаментальную основу для описания вращения любых тел вокруг их собственных центров масс. Динамические уравнения Эйлера должны применяться к каждому отдельному фуллерену, составляющему выбранный кусок материала. В правые части этих уравнений могут входить влияния разной природы, например, электромагнитные. Все рассматриваемые моменты сил зависят от расстояний до конкретных атомов, составляющих фуллерен. Поэтому в процессе расчета необходимо знать все углы поворота фуллерена. Эти углы можно найти из дифференциальных уравнений, которые обычно называют кинематическими соотношениями Эйлера.

Для полного описания динамики фуллеренов в материале фуллерита необходимо записать уравнения поступательного движения узлов молекулярного кристалла. Эти уравнения являются уравнениями движения центров масс фуллеренов.

Результаты расчетов. Для описания вращательной динамики фуллеренов и определения колебаний их центров масс использовались обыкновенные дифференциальные уравнения (ОДУ) первого порядка. Решения строились с использованием классической схемы Рунге–Кутты четвертого порядка.

Были построены распределения энергии взаимодействия некоторых фуллеренов из ряда С₂₈-С₉₆. Потенциальные ямы в этих распределениях приблизительно определяют расстояние нахождения соседнего фуллерена в материале фуллерита. Расчеты показали, что с увеличением размера фуллерена увеличивается и глубина потенциальной ямы молекулы. На основе

полученных данных по расстояниям между соседними узами в кристаллах были построены модели простой кубической (ПК) и гранецентрированной кубической решетки (ГЦК). После чего проведено моделирование вращательной динамики узлов кристаллов и построены распределения мгновенных значений угловой скорости фуллеренов. Эти распределения имеют характер «белого шума», который определяет примерно одинаковую интенсивность в двух рассмотренных случаях ПК- и ГЦК-решеток. Также были получены средние значения частот вращения фуллеренов, которые принимает немного меньшие значения в фуллеритах с ГЦК-решеткой. Полученные численные результаты хорошо согласуются с другими теоретическими работами по вращательной динамике фуллеренов.

Выводы. Предложена эффективная математическая модель вращательной динамики фуллеренов в материале фуллерита. На первом этапе были найдены распределения энергий взаимодействия набора фуллеренов из ряда C_{28} - C_{96} в зависимости от расстояний между их центрами. На основе этих данных было определено исходное статическое положение узлов в фуллеритах. Из-за их случайной ориентации в начальный момент времени энергия их взаимодействия с соседними узлами в кристалле не была минимизирована, что породило вращения узлов. Описана схема получения численного решения вращательной динамики. Расчеты показали, что в кристалле фуллерита молекулы фуллеренов вращаются регулярным образом. Для рассматриваемого класса фуллеритов определен характер угловых движений узлов молекулярного кристалла и найдены типичные распределения мгновенных угловых скоростей.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-71-10049).

Литература/References

1. Kroto H.W., Heath J.R., O'Brien S.C., Curl R.E., Smalley R.E. Nature 1985, 318, 162.

2. Kratschmer W., Lamb L.D., Fostinoupolos K., Huffman R.D. Nature 1990, 347, 354.

3. Sakhaee-Pour A., Vafai A. Applied Physics Letters 2010, 96, 021903.

4. Shasha Zhao, Pei Zhao, Wenting Cai, Lipiao Bao, Muqing Chen, Yunpeng Xie, Xiang Zhao, Xing Lu. / Journal of the American Chemical Society 2017, 139, 13, 4724.

5. Malolepsza E., Witek H.A., Irle S. The Journal of Physical Chemistry A 2007, 111, 6649.

Именной указатель

A

Авдюшев В.А. 189, 210, 225, 229, 232 Агафонцев М.В. 279 Азин А.В. 289 Акимов К.О. 101 Аксенов А.А. 105 Александрова А.Г. 196, 214, 222, 232 Антонникова А.А. 285 Атовуллаева А.А. 110 Ахмадиева А.А. 113 Ахметов А.Ж. 243 Ахметиин Л.Р. 15

Б

Баландин В.В. 81 Баньшикова М.А. 189 Батурин А.П. 185 Бахтигараев Н.С. 229 Бевз А.В. 43 Белов Г.В. 84, 88, 304 Белов С.В. 70 Белоусова Н.С. 18 Блинкова Е.В. 196 Богданов А.Н. 21 Богомолов Г.Н. 30, 47 Бордовицына Т.В. 196, 229, 232 Брагов А.М. 81 Бубенчиков А.М. 282 Бубенчиков М.А. 282, 293, 307 Бураков В.А. 159 Буркин В.В. 159, 179, 163 Бурлаченко А.Г. 125 Буяков А.С. 117 Буякова С.П. 117, 125, 152

B

Васильев А.С. 120 Васильева М.А. 204 Войцик В.Ф. 117

Г

Галушина Т.Ю. 200, 225, 229 Гимаева Н.Р. 166 Глазырин В.П. 47 Глазырин К.В. 47 Глотов О.Г. 18 Гонтарев Р.А. 210 Горбенко М.В. 131 Горбенко Т.И. 131 Городилов Д.В. 51 Гуськов А.В. 18, 170

Д

Ван Дакунь 125 Дедова Е.С. 125 Демин В.А. 128 Дерябин С.Л. 59 Диль Д.О. 91 Дмитриева М.А. 141, 314 Добродеев А.А. 246 Дьяченко Ф.А. 110 Дьячковский А.С. 159, 179 Дяченко И.А. 81

Ж

Жуков Е.Е. 285 Жуков И.А. 113, 149

3

Зелепугин А.С. 33 Зелепугин С.А. 33, 94 Земляк В.Л. 120 Землянов А.В. 251 Зиатдинов М.Х. 23 Зимин В.Н. 254

E

Евсеев Н.С. 23 Емельянова Е.С. 147 Енков М.О. 131

И

Иванов К.С. 51 Иохим К.В. 135, 138 Исмаилов К.К. 260 Ищенко А.Н. 159, 163, 179

К

Казаков К.Е. 55 Казакбаева А.А. 264 Казачинский А.О. 268 Каледин В.О. 70 Канзаманова Г.Ж. 105 Касимов В.З. 159, 163 Касымов Д.П. 279 Качурина Е.С. 81 Кахидзе Н.И. 105, 113, 149 Квашнёв А.А. 170 Климентьев А.С. 279 Князева А.Г. 297 Козин В.М. 120 Константинов А.Ю. 81 Кормашова М.Д. 117 Королев С.А. 175 Корольков Л.В. 179 Костромин Д.А. 274 Костюшин К.В. 260 Котов В.Л. 81 Красавин Д.С. 214 Крутова И.Ю. 268 Крылов А.В. 254 Кувыркин Г.Н. 254 Кузнецов Э.Д. 204, 217 Кушнарёв А.Г. 15 Кучерявченко Н.А. 222

Л

Левкина П.А. 200, 229 Лейцин В.Н. 141, 314 Липанов А.М. 175 Летнер О.Н. 225 Лобода Е.Л. 279 Лобода Ю.А. 279 Лукашов О.Ю. 274 Лун-Фу А.В. 293

Μ

Маевский К.К. 27 Мамонтов Д.В. 282 Марков В.А. 84, 88, 304 Мартынов П.С. 279 Марышев Б.С. 128 Мезенцев А.В. 59 Мейснер Л.Л. 110 Меньшиков А.И. 128 Мировой Ю.А. 117, 125 Михайлова Я.А 210 Морозова О.Н. 285

H

Нурматов М.М. 289 322

0

Овчинников В.А. 293 Орлова Ю.Н. 30

Π

Павленко А.А. 285 Павлова А.В. 310 Паршин Д.А. 15, 62, 66 Парфенова Е.С. 297 Паульзен А.Е. 70 Пахнутова Н.В. 33 Пашков С.В. Писарев М.А. 147 Плавалова Е. 204, 217 Пономарев С.А. 301 Пономарев С.В. 70, 141, 301 Попандопуло Н.А. 196, 222, 229, 232 Попов Ю.В. 84, 88, 304 Потеряева В.А. 307 Пусев В.И. 84, 88,304

P

Рейно В.В. 279 Рикконен С.В. 301 Рогаев К.С. 159 Рожкова Е.И. 74 Розаев А.Е. 204, 217 Русяк И.Г 175 Романдин В.И. 23

С

Салтыков И.Е. 77 Саморокова Н.М. 159, 163 Саммель А.Ю. 179 Селиванов В.В. 84, 88, 304 Селиховкин М. А. 149 Сидоров А.Д. 163 Скрипняк В.А. 135 Скрипняк В.А. 135 Скрипняк Е.Г. 138 Скрипняк Н.В. 138 Скрипняк Н.В. 138 Сопин С.В. 81 Смолин И.Ю. 243, 264 Старков А.А. 260 Степанов Е.Ю. 179 Сюсина О.М. 225

Т

Телятников И.С. 310 Темербеков В.М. 37 Титов С.С. 285 Товпинец А.О. 141, 314 Томилова И.В. 196, 232

Φ

Фотин И.А. 152 Фролов В.В. 84, 88, 304

X

Хань Лян 152 Хребтова М.С. 170

Ц

Цесельская Я.П. 91

Ч

Челнокова А.С. 317 Черепанов Р.О. 94 Чувашов И.Н. 236 Чупашев А.В. 179

Ш

Шахвердов А.О. 254 Шеин А.В. 200, 229 Шмаков В.В. 117 Шмидт Е.Е. 189

Я

Яковлев Е.В. 110

NAME INDEX

A

Avdyushev V. 189, 211, 226, 229, 233 Agafontsev M. 279 Azin A. 301 Akimov K. 101 Aksenov A. 106 Aleksandrova A. 196, 214, 222 Antonnikova A. 285 Atovullaeva A. 110 Akhmadieva A. 114 Akhmetov A. 243 Akhmetshin L. 15

B

Balandin V. 81 Banshchikova M. 189 Baturin A. 185 Bakhtigaraev N. 229 Bevz A. 43 Belov G. 85. 88. 304 Belov S. 71, Belousova N. 18 Blinkova E. 193, 196 Bogdanov A. 21 Bogomolov G. 18, 30 Bordovitsyna T. 196, 229, 233 Bragov A. 81 Bubenchikov A. 282 Bubenchikov M. 282, 293, 307 Burakov V. 159 Burkin V. 159, 164, 179 Burlachenko A. 126 Buyakov A. 117 Buyakova S. 117, 126, 153

V

Vasilyev A. 121 Vasileva M. 204 Voytsik V. 117

G

Galushina T. 200, 226, 229 Gimayeva N. 167 Glazyrin V. 48 Glazyrin K. 48 Glotov O. 18 Guskov A. 170 Gontarev R. 211 Gorbenko M. 132 Gorbenko T. 132 Gorodilov D. 52

D

Dakun Wan 126 Dedova E. 126 Demin V. 129 Derybin S. 59 Dil D. 91 Dmitrieva M. 142, 314 Dobrodeev A. 247 D'yachenko F. 110 Diachkovskiy A. 159, 179 Dyachenko I. 81

S

Sidorov A. 164 Shein A. 200, 229 Shmidt E. 189

Z

Zelepugin A. 33 Zelepugin S. 33, 95 Zemlianov A. 252 Zemlyak V. 121 Ziatdinov M. 24 Zimin V. 255 Zhukov E. 285 Zhukov I. 114, 149

E

Evseev N. 24 Emelianova E. 147 Enkov M. 132

I

Ivanov K. 52 Iokhim K. 136, 138 Ismailov K. 261 Ishchenko A. 159, 164, 179
K

Kazakov K. 55 Kazakbaeva A. 265 Kazachinsky A. 269 Kaledin V. 71 Kanzamanova G. 106 Kachurina E. 81 Kasimov V. 159, 164 Kasymov D. 279 Kakhidze N. 106, 114, 149 Kvashnyov A. 170 Klimentiev A. 279 Kozin V. 121 Konstantinov A. 81 Kormashova M. 117 Korolev S. 175 Korolkov L. 179 Kotov V. 81 Kostromin D. 274 Kostvushin K. 261 Krasavin D. 214 Krutova I. 269 Kuvvrkin G. 255 Kuznetsov E. 204, 218 Kushnaryov A. 15 Kucheryavchenko N. 222 Knyazeva A. 297 Krylov A. 255

Kh

Khrebtova M. 170

L

Levkina P. 200, 229 Leitsin V. 142, 314 Letner O. 226 Lipanov A. 175 Loboda E. 279 Loboda Yu. 279 Lukashov O. 274 Lun-Fu A. 293

M

Maevskii K. 27 Mamontov D. 282 Markov V. 85, 88, 304 Martynov P. 279 Maryshev B. 129 Menshikov A. 129 Mezentsev A. 59 Meisner L. 110 Mirovoy Yu. 117, 126 Mikhaylova Y. 211 Morozova O. 285

N

Nurmatov M. 290

0

Ovchinnikov V. 293 Orlova Yu. 30

P

Pavlenko A. 285 Pavlova A. 310 Parshin D. 63, 67 Pakhnutova N. 33 Parfenova E. 297 Pashkov S. 15 Paulzen A. 71 Plavalova E. 204, 218 Ponomarev S.A. 71, 142, 301 Ponomarev S.V. 301 Popandopulo N. 196, 222, 229, 233 Popov Yu. 85, 88, 304 Poteryaeva V. 307 Pisarev M. 147 Pusev V. 85, 88, 304

R

Reyno V. 279 Rikkonen S. 301 Rogaev K. 159 Rosaev A. 204, 218 Rozhkova E. 75 Romandin V. 24 Rusyak I. 175

S

Saltykov I. 78 Samorokova N. 159, 164 Sammel A. 179 Selivanov V. 85, 88, 304 Selikhovkin M. 149 Sidorov A. 164 Skripnyak V.A. 136 Skripnyak V.V 136 Skripnyak E. 138 Skripnyak N. 138 Smolin I. 243 Sopin S. 81 Syusina O. 226 Shmakov V. 117 Shakhverdov A. 255 Starkov A. 261 Stepanov E. 179 Shein A. 200, 229

Η

Han L. 153

Т

Telyatnikov I. 310 Temerbekov V. 37 Tomilova I. 196, 233 Titov S. 285 Tovpinets A. 142, 314 Tseselskaya Y. 91

F

Fotin I. 153 Frolov V. 85, 88, 304

Ch

Chelnokova A. 318 Cherepanov R. 95 Chupashev A. 179 Chuvashov I. 236

Ya

Yakovlev E. 110

| Введение11 |
|---|
| Секция 1. ВЗРЫВНЫЕ, ДЕТОНАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА ПРИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ |
| Ахметшин Л.Р., Кушнарев А.Г., Пашков С.В. Влияние угла взаимодействия |
| снаряда с сеточной преградой15 |
| Белоусова Н.С., Глотов О.Г., Гуськов А.В. Исследование горения пористых |
| частиц титана18 |
| Богданов А.Н. Динамика ударной волны в стратифицированной среде. |
| Неодномерные особенности процесса |
| Евсеев Н.С., Зиатдинов М.Х., Романдин В.И. Исследование горения порошков |
| металлов в режиме спутной фильтрации |
| Маевский К.К. Численное моделирование термодинамических параметров |
| для сплавов с золотом при ударно-волновом нагружении |
| Орлова Ю.Н., Богомолов Г.Н. Разрушение заснеженного ледяного покрова под |
| действием двойного заряда ВВ |
| Пахнутова Н.В., Зелепугин А.С., Зелепугин С.А. Микротвердость медного образца |
| при тесте Тейлора |
| <i>Темербеков В М.</i> Расчет полавления газовой летонации многорялной |
| иилиндрической решеткой в водородо-воздушной смеси 37 |

Секция 2. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ, ПРОГРАММЫ И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД

| Бевз А.В. Величина остаточных напряжений в зоне сварного шва 09Г2С | .43 |
|--|------|
| Глазырин В.П., Богомолов Г.Н., Глазырин К.В. Исследование разрушения | |
| льда при внедрении металлических ударников при скоростях до 250 м/с | .47 |
| Городилов Д.В., Иванов К.С. Веб-ориентированная платформа облачных | |
| вычислений в задачах гидродинамики | .51 |
| Казаков К.Е. Взаимодействие вязкоупругой трубы с внутренним покрытием | |
| переменной толщины и вставки со сложным профилем | .55 |
| Мезенцев А.В., Дерябин С.Л. Численное моделирование двумерных | |
| течений политропного газа, возникающих при истечении | |
| газа в вакуум после распада специального разрыва | . 59 |
| Паршин Д.А. О скачках напряжений внутри послойно изготавливаемых | |
| деформируемых твердых тел | .62 |
| Паршин Д.А. Решение задачи о деформировании послойно утолщаемой | |
| нагруженной опоры из вязкоупругого стареющего материала в условиях задания | |
| только главного вектора сжимающих усилий | .66 |
| Паульзен А.Е., Каледин В.О., Пономарев С.В., Белов С.В. Среда программирования | |
| «Алгозит» для задач механики сплошных сред | .70 |
| Рожкова Е.И. Метод Ван Лира для решения задач высокоскоростного течения | |
| газа в двумерном приближении | .74 |
| Салтыков И.Е. Использование комплекса OpenFOAM для моделирования | |
| размыва несвязного грунта | .77 |

| Сопин С.В., Котов В.Л., Брагов А.М., Баландин В.В., Качурина Е.С., Дяченко И.А., | |
|--|-----|
| Константинов А.Ю. Исследование влияния параметров ударника на изменение | |
| траектории проникания в грунтовую среду | .81 |
| Фролов В.В., Белов Г.В., Марков В.А., Попов Ю.В., Пусев В.И., Селиванов В.В. | |
| О расчёте механических свойств и амортизирующих характеристик блока | |
| внутреннего оборудования носового отсека летательного аппарата | .84 |
| Фролов В.В., Белов Г.В., Марков В.А., Попов Ю.В., Пусев В.И., Селиванов В.В. | |
| Расчётная модель для механических свойств и амортизационных характеристик | |
| внутреннего оборудования носового отсека летательных аппаратов | |
| при деформировании | .88 |
| Цесельская Я.П., Диль Д.О. Схема высокого порядка точности для аппроксимации | |
| потоков в задаче двухфазной фильтрации | .91 |
| Черепанов Р.О., Зелепугин С.А. Моделирование пробития армированных | |
| 3D-печатных преград методом гладких частиц | .94 |

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

| Акимов К.О. Исследование закономерностей формирования низкоразмерных | |
|---|-----|
| зеренных структур и прочностных свойств в синтезированном в экстремальных | |
| условиях под давлением с деформацией продукта синтеза интерметаллическом | |
| соединении Ni ₃ Al | 101 |
| Аксенов А.А., Канзаманова Г.Ж., Кахидзе Н.И. Оценка структуры и результаты | |
| фрактографического анализа поверхностей разрушения сплава системы Al–Mg, | |
| полученного литьем с ультразвуковым воздействием и последующей прокаткой | 105 |
| Атовуллаева А.А., Дьяченко Ф.А., Яковлев Е.В., Мейснер Л.Л. Влияние | |
| параметров импульсной электронно-пучковой обработки на морфологию | |
| поверхности и твёрдость поверхностного слоя сплава TiNi | 110 |
| Ахмадиева А.А., Кахидзе Н.И., Жуков И.А. Исследование механического | |
| поведения магниевого сплава МЛ12, упрочненного наночастицами AlN, | |
| при квазистатическом нагружении | 113 |
| Буяков А.С., Кормашова М.Д., Войцик В.Ф., Мировой Ю.А., Шмаков В.В., | |
| Буякова С.П. Структурный дизайн функциональных композиционных материалов | |
| на основе ZrB ₂ –SiC–MoSi ₂ | 117 |
| Васильев А.С., Земляк В.Л., Козин В.М. Исследование ледовых образцов, | |
| усиленных в срединном сечении тонкостенными | |
| трубами из полимерных материалов | 120 |
| Ван Дакунь, Бурлаченко А.Г., Мировой Ю.А., Дедова Е.С., Буякова С.П. | |
| Структурная эволюция высокоэнтропийной керамики (Zr-Nb-Hf)C | 125 |
| Демин В.А., Марышев Б.С., Меньшиков А.И. О гидродинамических режимах | |
| пропитки пористых сред наносуспензиями при создании материалов | |
| с заданными свойствами | 128 |
| Енков М.О., Горбенко Т.И., Горбенко М.В. Исследование характеристик горения | |
| смесевых композиций, содержащих алюминий и бор | 131 |
| Иохим К.В., Скрипняк В.В., Скрипняк В.А. Деформация и разрушение титановых | |
| сплавов в сложном напряженном состоянии при динамических воздействиях | 135 |
| Иохим К.В., Скрипняк Н.В., Скрипняк Е.Г. Моделирование механического | |
| поведения сплавов Zr–Nb при высокоскоростной деформации в зависимости | |
| от распределения зерен по размерам | 138 |
| | |

| Лейцин В.Н., Товпинец А.О., Дмитриева М.А., Пономарев С.В. Комплексный подход | |
|---|----|
| оценки структуры и эффективных характеристик спекаемой керамики 1 | 41 |
| Писарев М.А., Емельянова Е.С. Моделирование деформационного поведения | |
| α-титана с явным учетом поликристаллической структуры 1 | 47 |
| Селиховкин М.А., Кахидзе Н.И., Жуков И.А. | |
| Влияние наночастиц AL ₂ O ₃ на механические характеристики и деформационное | |
| поведение технически чистого алюминия 1 | 49 |
| Хань Лян, Фотин И.А., Буякова С.П. Роль низкомодульных | |
| включений mwcnt/bn в полифазных керамических композитах 1 | 52 |

Секция 4. БАЛЛИСТИКА И НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА

Подсекция 4.1. Баллистика

| Бураков В.А., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Ищенко А.Н., Касимов В.З., | |
|--|------|
| Рогаев К.С., Саморокова Н.М. Исследование горения присоединеного заряда | |
| из пастообразного топлива в баллистическом эксперименте | .159 |
| Буркин В.В., Ищенко А.Н., Касимов В.З., Саморокова Н.М., Сидоров А.Д. | |
| Модернизация классического выстрела путем применения высокоэнергетических | |
| топлив и электротермохимической технологии метания | .163 |
| Гимаева Н.Р. Математическое моделирование динамической постановки задачи | |
| движения тела на сверхзвуковых скоростях с выдувом в пограничный слой | .166 |
| Квашнёв А.А., Гуськов А.В., Хребтова М.С. Исследование нагрева ведущих | |
| поясков внутри канала ствола | .170 |
| Королев С.А., Липанов А.М., Русяк И.Г. Учет возмущающего действия воздушного | |
| потока несущего винта вертолета в алгоритмах управления стрельбой | .175 |
| Степанов Е.Ю., Ищенко А.Н., Буркин В.В., Дьячковский А.С., | |
| Корольков Л.В., Саммель А.Ю., Чупашев А.В. Разработка электроплазменного | |
| устройства с многоочаговым режимом зажигания пороховых зарядов | |
| баллистических установок | .179 |
| | |

Подсекция 4.2. Небесная механика

| Батурин А.П. Исследование эффективности вычислений с дважды двойной | |
|--|-----|
| точностью при прогнозировании движения астероидов | 185 |
| Баньщикова М.А., Авдюшев В.А., Шмидт Е.Е. Нелинейность в обратных задачах | |
| динамики внешних спутников Юпитера | 189 |
| Блинкова Е.В., Бордовицына Т.В. Исследование динамики объекта 84414 | |
| из каталога NORAD | 193 |
| Блинкова Е.В., Александрова А.Г., Бордовицына Т.В., Попандопуло Н.А., | |
| Томилова И.В. Особенности динамики объектов, движущихся в областях | |
| LEO-MEO околоземного космического пространства под действием вековых | |
| резонансов различных типов | 196 |
| Галушина Т.Ю., Левкина П.А., Шеин А.В. Результаты наблюдений избранных | |
| астероидов на Терскольской обсерватории в сентябре 2020 года | 200 |
| Васильева М.А., Кузнецов Э.Д., Розаев А.Е., Плавалова Е. Исследование | |
| динамической эволюции семейства астероидов Rampo | 204 |
| Гонтарев Р.А., Михайлова Я.А., Авдюшев В.А. Численное моделирование динамики | |
| ИСЗ в орбитальных элементах Роя. | 210 |
| • | |

| 4 |
|---|
| |
| 7 |
| |
| 2 |
| |
| |
| 5 |
| |
| |
| 9 |
| |
| |
| 2 |
| |
| 6 |
| |

Секция 5. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

| Ахметов А.Ж., Смолин И.Ю. Компьютерный анализ напряженного состояния | |
|---|-----|
| структуры земной коры и верхней мантии Сибирского кратона | 243 |
| Добродеев А.А. Оценка неопределенности измерений ледового сопротивления | |
| судов в ледовом бассейне | 246 |
| Землянов А.В. Численное моделирование деформации и разрушения | |
| металлокерамических композитов с учетом остаточных напряжений | 251 |
| Зимин В.Н., Крылов А.В., Кувыркин Г.Н., Шахвердов А.О. Математическое | |
| моделирование динамики раскрытия крупногабаритных космических | |
| конструкций изменяемой конфигурации | 254 |
| Исмаилов К.К., Старков А.А., Костюшин К.В. Численные исследования запуска | |
| БПЛА с помощью наземных пусковых установок | 260 |
| Казакбаева А.А., Смолин И.Ю. Медленные деформационные возмущения | |
| в среде с разломами | 264 |
| Казачинский А.О., Крутова И.Ю. Моделирование закрутки газа | |
| придонной области восходящего закрученного потока | 268 |
| Костромин Д.А., Лукашов О.Ю. Оптимизация скорости расчёта параметров | |
| распространения воздушных ударных волн в местах изменения геометрии | |
| выработанного пространства угольных шахт | 274 |
| Лобода Е.Л., Агафонцев М.В., Климентьев А.С., Касымов Д.П., Лобода Ю.А., | |
| Мартынов П.С., Рейно В.В. Применение методов ИК-термографии для | |
| исследования турбулентной структуры в пламени и влияние на нее малых | |
| инфразвуковых воздействий | 279 |
| Мамонтов Д.В., Бубенчиков А.М., Бубенчиков М.А. Возможность | |
| применения фуллеритов в качестве поршней внутри CNT. | |
| На примере молекулярной динамики фуллерена C320 внутри CNT(35,0) | 282 |
| Морозова О.Н., Антонникова А.А., Жуков Е.Е., Титов С.С., Павленко А.А. | |
| Окисление порошков алюминия разной дисперсности в воде при нагревании | 285 |
| | |

| Нурматов М.М., Азин А.В. Исследование напряженно-деформированного | |
|---|-------|
| состояния элементов пьезоэлектрического двигателя | 289 |
| Овчинников В.А., Бубенчиков М.А., Лун-Фу А.В. Взаимодействие | |
| металл-фуллерена на основе С60 с анионом ксенона | 293 |
| Парфенова Е.С., Князева А.Г. Связанная механохемодиффузионная модель | |
| для описания волновых явлений в поверхностном слое материала | |
| при обработке потоком частиц | 297 |
| Пономарев С.А., Азин А.В., Пономарев С.В., Рикконен С.В. | |
| Моделирование воздействия ультразвука на многослойную пластину | |
| через воздушный зазор | 301 |
| Попов Ю.В., Белов Г.В., Марков В.А., Пусев В.И., Селиванов В.В., Фролов В.В. | |
| Подходы к определению нагрузки на жесткую стенку при ударе высокопористого | |
| цилиндра | 304 |
| Потеряева В.А., Бубенчиков М.А. Разделение изотопов гелия с помощью | |
| двойной мембраны нитрида углерода | 307 |
| Телятников И.С., Павлова А.В. Метод фиктивного поглощения в динамической | |
| задаче для слоя, ослабленного трещиной | 310 |
| Товпинец А.О., Дмитриева М.А., Лейцин В.Н. Единый подход компьютерного | |
| моделирования процессов синтеза и спекания | . 314 |
| Челнокова А.С. Вращения фуллеренов в семействе фуллеритов от С ₂₈ до С ₉₆ | 317 |
| | |
| ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ | 321 |

| EDITOR'S PREFACE | 12 | 2 |
|------------------|----|---|
| | | |

Session 1. EXPLOSION, DETONATION PHENOMENA AND PROPERTIES OF MATTER AT HIGH–INTENSIVE

| Akhmetshin L., Kushnarev A., Pashkov S. Influence of the angle interaction of the | |
|---|----|
| projectile with the wire mesh | 15 |
| Belousova N., Glotov O., Guskov A. Investigation of porous titanium particles | |
| Combustion | 18 |
| <i>Bogdanov A</i> . Shock wave dynamics in a stratified medium. Undimensional | |
| features of the process | 21 |
| <i>Evseev N., Ziatdinov M., Romandin V.</i> Study of combustion of metal powders | |
| in CO-FLOW filtration mode | 24 |
| Maevskii K. Numerical simulation of thermodynamic parameters for gold | |
| alloys under shock-wave loading | 27 |
| Orlova Yu., Bogomolov G. Research of ice damage characteristics subjected to | |
| combination of emulsion explosives | 30 |
| Pakhnutova N., Zelepugin A., Zelepugin S. Microhardness of a copper sample | |
| at the taylor test | 33 |
| Temerbekov V. Calculation of the gas detonation suppression by | |
| a multi-row cylindrical lattice in a hydrogen-air mixture | 37 |

Session 2. NUMERICAL METHODS, ALGORITHMS, CODES, AND ACCURATE SOLUTIONS OF THE CONTINIUM MECHANICS

| <i>Bevz A</i> . Value of residual voltage in the weld area 09G2S | .43 |
|---|-----|
| Glazyrin V., Bogomolov G., Glazyrin K. Deep penetration of projectiles into ice | |
| targets (UP TO 250 m/s) | .48 |
| Gorodilov D., Ivanov K. Web-based cloud computing platform for fluid | |
| dynamics problems | .52 |
| <i>Kazakov K</i> . Interaction of a viscoelastic tube with an inner | |
| coating of variable thickness and an insert with a complex profile | .55 |
| Mezentsev A., Derybin S. Numerical simulation of two-dimensional polytropic gas | |
| flows that occur when a gas flows into a vacuum after the breakup of a | |
| special discontinuity | .59 |
| Parshin D. On stress jumps inside layer-by-layer fabricated deformable solids | .63 |
| Parshin D. Solution of the problem on deformation of a layer-by-layer | |
| thickened burdened support made of viscoelastic aging material under conditions | |
| of awareness of only the resultant vector of compressive forces | .67 |
| Paulzen A., Kaledin V., Ponomarev S., Belov S. Programming environment "Algozit" for | |
| solving continuum mechanics problems | .71 |
| <i>Rozhkova E.</i> Van leer method for solving problems of high-speed gas flow | |
| in two-dimensional approximation | .75 |
| Saltykov I. Application of the openfoam software for non-cohesive soil scour simulation | .78 |

| 81 |
|----|
| |
| |
| 85 |
| |
| |
| 88 |
| |
| 91 |
| |
| 95 |
| |

Session 3. NEW MATERIALS RESEARCH IN APPLICATION TO CONTINUUM MECHANICS

| Akimov K. Investigation of the regularities of low-dimensional grain structures and strength properties formation in an intermetallic compound ni ₃ al synthesized under extreme conditions under pressure with deformation of the synthesis product Aksenov A., Kanzamanova G., Kakhidze N. Structure evaluation and fractographic analysis results of the fracture surfaces of Al-Mg-BASED alloy obtained by casting with ultrasonic action and subsequent rolling. 106 Atovullaeva A., D'yachenko F., Yakovlev E., Meisner L. The influence of the parameters of the pulse electron-beam treatment on the surface 110 morphology and hardness of NiTi alloy. 110 Akhmadieva A., Kakhidze N., Zhukov I. Study of the mechanical behavior of mag4 magnesium alloy hardened by aln nanoparticles under quasistatic loading. 114 Buyakov A., Kormashova M., Voytsik V., Mirovoy Yu., Shmakov V., Buyakova S. 117 Vasilyev A., Zemlyak V., Kozin V. Investigation of ice specimens, 121 Dakun Wan, Burlachenko A., Mirovoy Yu., Dedova E., Buyakova S. 121 Dakun Wan, Burlachenko A., Mirovoy Yu., Dedova E., Buyakova S. 121 Updruma and the predictable properties 126 Demin V., Maryshev B., Menshikov A. Hydrodynamic regimes of porous media saturation by nanosuspensions during creation of materials with predictable properties 126 | | |
|---|---|-----|
| and strength properties formation in an intermetallic compound ni ₃ al synthesized under extreme conditions under pressure with deformation of the synthesis product101 Aksenov A., Kanzamanova G., Kakhidze N. Structure evaluation and fractographic analysis results of the fracture surfaces of Al–Mg-BASED alloy obtained by casting with ultrasonic action and subsequent rolling | Akimov K. Investigation of the regularities of low-dimensional grain structures | |
| under extreme conditions under pressure with deformation of the synthesis product 101 Aksenov A., Kanzamanova G., Kakhidze N. Structure evaluation and fractographic analysis results of the fracture surfaces of Al-Mg-BASED alloy obtained by casting with ultrasonic action and subsequent rolling. 106 Atovullaeva A., D'yachenko F., Yakovlev E., Meisner L. The influence of the 106 parameters of the pulse electron-beam treatment on the surface 106 morphology and hardness of NiTi alloy. 110 Akhmadieva A., Kakhidze N., Zhukov I. Study of the mechanical behavior of mag4 114 Buyakov A., Kormashova M., Voytsik V., Mirovoy Yu., Shmakov V., Buyakova S. 117 Structural design of functional composite materials based on ZrB2_SiC-MOSi2_ 117 Vasilyev A., Zemlyak V., Kozin V. Investigation of ice specimens, 121 Dakun Wan, Burlachenko A., Mirovoy Yu., Dedova E., Buyakova S. 121 Dakun Wan, Burlachenko A., Mirovoy Yu., Dedova E., Buyakova S. 121 Dakun Wan, Burlachenko A., Mirovoy Yu., Dedova E., Buyakova S. 126 Demin V., Maryshev B., Menshikov A. Hydrodynamic regimes of porous media saturation by nanosuspensions during creation of materials with predictable properties 126 Demin V., Maryshev B., Menshikov A. Hydrodynamic regimes of porous media 132 Iokhi | and strength properties formation in an intermetallic compound ni ₃ al synthesized | |
| Aksenov A., Kanzamanova G., Kakhidze N. Structure evaluation and fractographic analysis results of the fracture surfaces of Al–Mg-BASED alloy obtained by casting with ultrasonic action and subsequent rolling. 106 Atovullaeva A., D'yachenko F., Yakovlev E., Meisner L. The influence of the 106 parameters of the pulse electron-beam treatment on the surface 110 Monophology and hardness of NiTi alloy. 110 Akhmadieva A., Kakhidze N., Zhukov I. Study of the mechanical behavior of mag4 114 magnesium alloy hardened by aln nanoparticles under quasistatic loading. 114 Buyakov A., Kormashova M., Voytsik V., Mirovoy Yu., Shmakov V., Buyakova S. 117 Vasilyev A., Zemlyak V., Kozin V. Investigation of ice specimens, 117 reinforced in the middle section with thin-walled pipes made of polymer materials 121 Dakun Wan, Burlachenko A., Mirovoy Yu., Dedova E., Buyakova S. 126 Structural evolution of high-entropic ceramics (Zr–Nb–Hf) C 126 Hydrodynamic regimes of porous media saturation by nanosuspensions during 126 creation of materials with predictable properties 126 Demin V., Maryshev B., Menshikov A. Hydrodynamic regimes of porous media 132 saturation by nanosuspensions during creation of materials with predictable properties 129 | under extreme conditions under pressure with deformation of the synthesis product | 101 |
| analysis results of the fracture surfaces of Al–Mg-BASED alloy obtained by 106 Atovullaeva A., D'yachenko F., Yakovlev E., Meisner L. The influence of the 106 Parameters of the pulse electron-beam treatment on the surface 110 Morphology and hardness of NiTi alloy | Aksenov A., Kanzamanova G., Kakhidze N. Structure evaluation and fractographic | |
| casting with ultrasonic action and subsequent rolling. 106 Atovullaeva A., D'yachenko F., Yakovlev E., Meisner L. The influence of the 106 parameters of the pulse electron-beam treatment on the surface 110 morphology and hardness of NiTi alloy. 110 Akhmadieva A., Kakhidze N., Zhukov I. Study of the mechanical behavior of mag4 114 Buyakov A., Kormashova M., Voytsik V., Mirovoy Yu., Shmakov V., Buyakova S. 117 Structural design of functional composite materials based on ZrB2–SiC–MOSi2 117 Vasilyev A., Zemlyak V., Kozin V. Investigation of ice specimens, 121 Pakun Wan, Burlachenko A., Mirovoy Yu., Dedova E., Buyakova S. 121 Structural evolution of high-entropic ceramics (Zr–Nb–Hf) C 121 Hydrodynamic regimes of porous media saturation by nanosuspensions during 126 creation of materials with predictable properties 126 Demin V., Maryshev B., Menshikov A. Hydrodynamic regimes of porous media 132 Iokhim K., Skripnyak V.V., Skripnyak V.A. Deformation and fracture of titanium 136 Iokhim K., Skripnyak V.V., Skripnyak V.A. Deformation and fracture of titanium 136 Iokhim K., Skripnyak N., Skripnyak V.A. Deformation and fracture of titanium 136 Iokhim K., Skripnyak N., Skripnyak F. Simulation of the mechanical behavior of <td>analysis results of the fracture surfaces of Al–Mg-BASED alloy obtained by</td> <td></td> | analysis results of the fracture surfaces of Al–Mg-BASED alloy obtained by | |
| Atovullaeva A., D'yachenko F., Yakovlev E., Meisner L. The influence of the parameters of the pulse electron-beam treatment on the surface 110 morphology and hardness of NiTi alloy | casting with ultrasonic action and subsequent rolling | 106 |
| parameters of the pulse electron-beam treatment on the surface 110 morphology and hardness of NiTi alloy | Atovullaeva A., D'yachenko F., Yakovlev E., Meisner L. The influence of the | |
| morphology and hardness of NiTi alloy | parameters of the pulse electron-beam treatment on the surface | |
| Akhmadieva A., Kakhidze N., Zhukov I. Study of the mechanical behavior of mag4 magnesium alloy hardened by aln nanoparticles under quasistatic loading. 114 Buyakov A., Kormashova M., Voytsik V., Mirovoy Yu., Shmakov V., Buyakova S. Structural design of functional composite materials based on ZrB2–SiC–MOSi2 117 Vasilyev A., Zemlyak V., Kozin V. Investigation of ice specimens, 117 reinforced in the middle section with thin-walled pipes made of polymer materials 121 Dakun Wan, Burlachenko A., Mirovoy Yu., Dedova E., Buyakova S. 121 Structural evolution of high-entropic ceramics (Zr–Nb–Hf) C 124 Hydrodynamic regimes of porous media saturation by nanosuspensions during 126 creation of materials with predictable properties 126 Demin V., Maryshev B., Menshikov A. Hydrodynamic regimes of porous media 127 saturation by nanosuspensions during creation of materials with predictable properties 128 Enkov M., Gorbenko T., Gorbenko M. Study of combustion characteristics of mixed 132 Iokhim K., Skripnyak V.V., Skripnyak V.A. Deformation and fracture of titanium 132 lokhim K., Skripnyak N., Skripnyak E. Simulation of the mechanical behavior of 134 Zr–Nb alloys at high rate deformation depending on the grain size distribution 138 Leitsin V., Tovpinets A., Dmitrieva M., Ponomare | morphology and hardness of NiTi alloy | 110 |
| magnesium alloy hardened by aln nanoparticles under quasistatic loading. 114 Buyakov A., Kormashova M., Voytsik V., Mirovoy Yu., Shmakov V., Buyakova S. 117 Structural design of functional composite materials based on ZrB2–SiC–MOSi2 117 Vasilyev A., Zemlyak V., Kozin V. Investigation of ice specimens, 112 reinforced in the middle section with thin-walled pipes made of polymer materials 121 Dakun Wan, Burlachenko A., Mirovoy Yu., Dedova E., Buyakova S. 121 Structural evolution of high-entropic ceramics (Zr–Nb–Hf) C 126 Hydrodynamic regimes of porous media saturation by nanosuspensions during 126 creation of materials with predictable properties 126 Demin V., Maryshev B., Menshikov A. Hydrodynamic regimes of porous media 128 saturation by nanosuspensions during creation of materials with predictable properties 129 Enkov M., Gorbenko T., Gorbenko M. Study of combustion characteristics of mixed 132 Iokhim K., Skripnyak V.V., Skripnyak V.A. Deformation and fracture of titanium 132 Iokhim K., Skripnyak N., Skripnyak E. Simulation of the mechanical behavior of 134 Zr–Nb alloys at high rate deformation depending on the grain size distribution 138 Leitsin V., Tovpinets A., Dmitrieva M., Ponomarev S. An integrated approach to 134 | Akhmadieva A., Kakhidze N., Zhukov I. Study of the mechanical behavior of mag4 | |
| Buyakov A., Kormashova M., Voytsik V., Mirovoy Yu., Shmakov V., Buyakova S. Structural design of functional composite materials based on ZrB2–SiC–MOSi2 | magnesium alloy hardened by aln nanoparticles under quasistatic loading | 114 |
| Structural design of functional composite materials based on ZrB2–SiC–MOSi2 117 Vasilyev A., Zemlyak V., Kozin V. Investigation of ice specimens, 117 reinforced in the middle section with thin-walled pipes made of polymer materials 121 Dakun Wan, Burlachenko A., Mirovoy Yu., Dedova E., Buyakova S. 121 Structural evolution of high-entropic ceramics (Zr–Nb–Hf) C 126 Hydrodynamic regimes of porous media saturation by nanosuspensions during 126 Demin V., Maryshev B., Menshikov A. Hydrodynamic regimes of porous media 126 Demin V., Gorbenko T., Gorbenko M. Study of combustion characteristics of mixed 132 Compositions containing aluminum and boron 132 Iokhim K., Skripnyak V.V., Skripnyak V.A. Deformation and fracture of titanium 136 Iokhim K., Skripnyak N., Skripnyak E. Simulation of the mechanical behavior of 136 Zr–Nb alloys at high rate deformation depending on the grain size distribution 138 Leitsin V., Tovpinets A., Dmitrieva M., Ponomarev S. An integrated approach to 138 Assessing the structure and effective characteristics of sintered ceramics 142 Pisarev M., Emelianova E. Microstructure-based modeling of the deformation 142 | Buyakov A., Kormashova M., Voytsik V., Mirovoy Yu., Shmakov V., Buyakova S. | |
| Vasilyev A., Zemlyak V., Kozin V. Investigation of ice specimens, reinforced in the middle section with thin-walled pipes made of polymer materials | Structural design of functional composite materials based on ZrB2-SiC-MOSi2 | 117 |
| reinforced in the middle section with thin-walled pipes made of polymer materials | Vasilyev A., Zemlyak V., Kozin V. Investigation of ice specimens, | |
| Dakun Wan, Burlachenko A., Mirovoy Yu., Dedova E., Buyakova S. Structural evolution of high-entropic ceramics (Zr–Nb–Hf) C Hydrodynamic regimes of porous media saturation by nanosuspensions during creation of materials with predictable properties 126 Demin V., Maryshev B., Menshikov A. Hydrodynamic regimes of porous media 126 saturation by nanosuspensions during creation of materials with predictable properties 129 Enkov M., Gorbenko T., Gorbenko M. Study of combustion characteristics of mixed 132 Iokhim K., Skripnyak V.V., Skripnyak V.A. Deformation and fracture of titanium 132 Iokhim K., Skripnyak N., Skripnyak E. Simulation of the mechanical behavior of 136 Zr–Nb alloys at high rate deformation depending on the grain size distribution 138 Leitsin V., Tovpinets A., Dmitrieva M., Ponomarev S. An integrated approach to 142 Pisarev M., Emelianova E. Microstructure-based modeling of the deformation 147 | reinforced in the middle section with thin-walled pipes made of polymer materials | 121 |
| Structural evolution of high-entropic ceramics (Zr–Nb–Hf) C Hydrodynamic regimes of porous media saturation by nanosuspensions during creation of materials with predictable properties 126 Demin V., Maryshev B., Menshikov A. Hydrodynamic regimes of porous media 126 saturation by nanosuspensions during creation of materials with predictable properties 129 Enkov M., Gorbenko T., Gorbenko M. Study of combustion characteristics of mixed 132 compositions containing aluminum and boron 132 Iokhim K., Skripnyak V.V., Skripnyak V.A. Deformation and fracture of titanium 136 Iokhim K., Skripnyak N., Skripnyak E. Simulation of the mechanical behavior of 136 Zr–Nb alloys at high rate deformation depending on the grain size distribution 138 Leitsin V., Tovpinets A., Dmitrieva M., Ponomarev S. An integrated approach to 142 Pisarev M., Emelianova E. Microstructure-based modeling of the deformation 147 | Dakun Wan, Burlachenko A., Mirovoy Yu., Dedova E., Buyakova S. | |
| Hydrodynamic regimes of porous media saturation by nanosuspensions during 126 Demin V., Maryshev B., Menshikov A. Hydrodynamic regimes of porous media 126 saturation by nanosuspensions during creation of materials with predictable properties | Structural evolution of high-entropic ceramics (Zr–Nb–Hf) C | |
| creation of materials with predictable properties126Demin V., Maryshev B., Menshikov A. Hydrodynamic regimes of porous media126saturation by nanosuspensions during creation of materials with predictable properties129Enkov M., Gorbenko T., Gorbenko M. Study of combustion characteristics of mixed132compositions containing aluminum and boron132Iokhim K., Skripnyak V.V., Skripnyak V.A. Deformation and fracture of titanium136alloys in a complex stress state under dynamic impacts136Iokhim K., Skripnyak N., Skripnyak E. Simulation of the mechanical behavior of138Leitsin V., Tovpinets A., Dmitrieva M., Ponomarev S. An integrated approach to142Pisarev M., Emelianova E. Microstructure-based modeling of the deformation147 | Hydrodynamic regimes of porous media saturation by nanosuspensions during | |
| Demin V., Maryshev B., Menshikov A. Hydrodynamic regimes of porous media saturation by nanosuspensions during creation of materials with predictable properties129 Enkov M., Gorbenko T., Gorbenko M. Study of combustion characteristics of mixed compositions containing aluminum and boron | creation of materials with predictable properties | 126 |
| saturation by nanosuspensions during creation of materials with predictable properties 129 <i>Enkov M., Gorbenko T., Gorbenko M.</i> Study of combustion characteristics of mixed compositions containing aluminum and boron | Demin V., Maryshev B., Menshikov A. Hydrodynamic regimes of porous media | |
| Enkov M., Gorbenko T., Gorbenko M. Study of combustion characteristics of mixed compositions containing aluminum and boron | saturation by nanosuspensions during creation of materials with predictable properties | 129 |
| compositions containing aluminum and boron132Iokhim K., Skripnyak V.V., Skripnyak V.A. Deformation and fracture of titaniumalloys in a complex stress state under dynamic impacts136Iokhim K., Skripnyak N., Skripnyak E. Simulation of the mechanical behavior ofZr-Nb alloys at high rate deformation depending on the grain size distribution138Leitsin V., Tovpinets A., Dmitrieva M., Ponomarev S. An integrated approach toassessing the structure and effective characteristics of sintered ceramics142Pisarev M., Emelianova E. Microstructure-based modeling of the deformation147 | Enkov M., Gorbenko T., Gorbenko M. Study of combustion characteristics of mixed | |
| Iokhim K., Skripnyak V.V., Skripnyak V.A. Deformation and fracture of titanium alloys in a complex stress state under dynamic impacts | compositions containing aluminum and boron | 132 |
| alloys in a complex stress state under dynamic impacts | Iokhim K., Skripnyak V.V., Skripnyak V.A. Deformation and fracture of titanium | |
| Iokhim K., Skripnyak N., Skripnyak E. Simulation of the mechanical behavior of Zr-Nb alloys at high rate deformation depending on the grain size distribution | alloys in a complex stress state under dynamic impacts | 136 |
| Zr-Nb alloys at high rate deformation depending on the grain size distribution 138 Leitsin V., Tovpinets A., Dmitrieva M., Ponomarev S. An integrated approach to 142 assessing the structure and effective characteristics of sintered ceramics 142 Pisarev M., Emelianova E. Microstructure-based modeling of the deformation 147 behaviour of polycrystalline titanium 147 | Iokhim K., Skripnyak N., Skripnyak E. Simulation of the mechanical behavior of | |
| <i>Leitsin V., Tovpinets A., Dmitrieva M., Ponomarev S.</i> An integrated approach to assessing the structure and effective characteristics of sintered ceramics | Zr-Nb alloys at high rate deformation depending on the grain size distribution | 138 |
| assessing the structure and effective characteristics of sintered ceramics | Leitsin V., Tovpinets A., Dmitrieva M., Ponomarev S. An integrated approach to | |
| <i>Pisarev M., Emelianova E.</i> Microstructure-based modeling of the deformation behaviour of polycrystalline titanium | assessing the structure and effective characteristics of sintered ceramics | 142 |
| behaviour of polycrystalline titanium147 | Pisarev M., Emelianova E. Microstructure-based modeling of the deformation | |
| | behaviour of polycrystalline titanium | 147 |

| Selikhovkin M., Kahidze N., Zhukov I. Influence of AL ₂ O ₃ nanoparticles | |
|---|-----|
| on mechanical characteristics and deformation behavior of technical pure aluminum | 149 |
| Han L., Fotin I., Buyakova S. Role of low-modulus mwent / bn inclusions | |
| in polyphase ceramic composites | 153 |
| | |

Session 4. BALLISTICS AND CELESTIAL MECHANICS

Session 4.1 BALLISTICS

| Burakov V., Burkin V., Diachkovskiy A., Ishchenko A., Kasimov V., | |
|---|-----|
| Rogaev K., Samorokova N. The research of the combustion of a travelling charge made | |
| of paste-like propellant during a ballistic experiment | 159 |
| Burkin V., Ishchenko A., Kasimov V., Samorokova N., Sidorov A. | |
| Modernizing a classical shot by means of applying high-energy propellants | |
| and electrothermal chemical technology of throwing | 164 |
| <i>Gimayeva N</i> . Mathematical modeling of dynamic flow over a body at supersonic | |
| speeds with blowing into the boundary layer | 167 |
| Kvashnev A., Guskov A., Khrebtova M. Investigation of the heating of the driving | |
| belts inside the bore | 170 |
| Korolev S., Lipanov A., Rusyak I. Taking into account the disturbing effect | |
| of the helicopter main rotor air flow in the fire control algorithms | 175 |
| Stepanov E., Ishchenko A., Burkin V., Diachkovskiy A., Korolkov L., | |
| Sammel A., Chupashev A. Development of an electroplasma device with a | |
| multi-focal mode of ballistic installations powder charges ignition | 179 |
| | |

Session 4.2 CELESTIAL MECHANICS

| <i>Baturin A.</i> Investigation of the efficiency of double-double calculation in | |
|---|-----|
| the problem of asteroid's motion simulation | 185 |
| Banshchikova M., Avdyushev V., Shmidt E. Nonlinearity in inverse dynamics | |
| problems Jupiter's outer satellites | 189 |
| Blinkova E., Bordovitsyna T. Study of the dynamics of object 84414 from | |
| the NORA catalog | 193 |
| Blinkova E., Aleksandrova A., Bordovitsyna T., Popandopulo N., Tomilova I. | |
| Specific features of the dynamics of objects moving in the LEO-MEO regions | |
| of the orbital space under the action of secular resonances of different types | 196 |
| Galushina T., Levkina P., Shein A. Results of observations of selected asteroids | |
| at the Terskol observatory in september 2020 | 200 |
| Vasileva M., Kuznetsov E., Rosaev A., Plavalova E. Investigation of the dynamic | |
| evolution of Rampo asteroids family | 204 |
| Gontarev R., Mikhaylova Y., Avdyushev V. Numerical modeling of aes dynamics | |
| in Roy's orbital elements | 211 |
| Krasavin D., Aleksandrova A. Artificial neural networks application for | |
| detection of stable and unstable secular resonances | 214 |
| Kuznetsov E., Rosaev A., Plavalova E. Investigation of chaotic zones associated | |
| with resonances taking into account the Yarkovsky effect | |
| Kucheryavchenko N., Aleksandrova A., Popandopulo N. Software for studying | |
| space debris dynamics | 222 |
| | |

| Letner O., Galushina T., Syusina O., Avdyushev V. About the nonlinearity | |
|--|-----|
| of the parameters estimation problem for the asteroids with small | |
| perihelion distances | 226 |
| Popandopulo N., Avdyushev V., Bordovitsyna T., Galushina T., Levkina P., | |
| Bakhtigaraev N., Shein A. Determination of the orbital parameters | |
| for a group of geosynchronous satellites based on observations at Terskol peak | 229 |
| Popandopulo N., Bordovitsyna T., Aleksandrova A., Avdyushev V., | |
| Tomilova I. Numerical modeling of the dynamics of near-lunar objects | 233 |
| <i>Chuvashov I.</i> Numeric modeling of orbit selected objects of space debris with high | |
| area to mass ratio | 236 |
| | |

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

| Akhmetov A., Smolin I. Computer analysis of stress state of structure of earth's crust | |
|---|-------|
| and upper mantle of Siberian craton | |
| Dobrodeev A. Uncertainty assessment of vessel's ice resistance measurements | |
| in the ice tank | .247 |
| Zemlianov A. Numerical modeling of deformation and fracture of metal-ceramic | |
| composites given residual stresses | .252 |
| Zimin V., Krylov A., Kuvyrkin G., Shakhverdov A. Mathematical modeling | |
| of deployment dynamics of large transformable space structures | .255 |
| Ismailov K., Starkov A., Kostyushin K. Numerical studies of uav launch using | |
| ground launchers | .261 |
| Kazakbaeva A., Smolin I. Slow deformation perturbations in a medium with faults | . 265 |
| Kazachinsky A., Krutova I. Modeling of the bottom part of ascending twisting | |
| gas flows | .269 |
| Kostromin D., Lukashov O. Technology of building local-adaptive cartesian grids | |
| Loboda E., Agafontsev M., Klimentiev A., Kasymov D., | |
| Loboda Yu., Martynov P., Reyno V. Investigation of the turbulent structure in | |
| a flame and the effect of small infrasonic exposure on it using ir thermography methods | 279 |
| Mamontov D., Bubenchikov A., Bubenchikov M. The possibility of using | |
| fullerites as pistons inside the CNT. On the example of the molecular dynamics | |
| of the C ₃₂₀ fullerene inside CNT (35,0) | .282 |
| Morozova O., Antonnikova A., Zhukov E., Titov S., Pavlenko A. Heat-assisted | |
| oxidation of aluminum powders with different dispersity in water | .285 |
| Nurmatov M., Azin A. Research on stress-strain state of piezoelectric | |
| engine elements | |
| Ovchinnikov V., Bubenchikov M., Lun-Fu A. Interaction of C60-based | |
| metallofullerene with xenon anion | .293 |
| Parfenova E., Knyazeva A. Coupled mechanochemodiffusion model | |
| for describing wave phenomena in the surface layer of material during | |
| treatment by particles flux | .297 |
| Ponomarev S.A., Azin A., Ponomarev S.V., Rikkonen S. Simulation of the impact | |
| of ultrasonic wave on a multilayer plate through an air gap | .301 |
| Popov Yu., Belov G., Markov V., Pusev V., Selivanov V., Frolov V. Approaches to define | |
| the load on the rigid wall at high-porous cylinder impact | .304 |
| Poteryaeva V., Bubenchikov M. Helium isotope separation through the bi-layer | |
| carbon nitride membrane | .307 |
| | |

| Telyatnikov I., Pavlova A. Fictitious absorption method in a dynamic problem | |
|--|-----|
| for a layer weakened by a crack | |
| Tovpinets A., Dmitrieva M., Leitsin V. Unified approach of computer simulation | |
| of synthesis and sintering | 314 |
| Chelnokova A. Fullerenes rotations in a family of fullerites from C ₂₈ to C ₉₆ | |
| | |

| NAME INDEX |
|------------|
|------------|

СПОНСОРЫ И ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ





eLIBRARY.RU







точно в цель

X Всероссийская научная конференция с международным участием «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2020», 18–20 ноября 2020

> Подписано в печать 27.05.2021 г. Формат 60х84¹/₁₆. Тираж 100 экз.

