



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ  
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Национальный исследовательский  
Томский государственный университет  
НИИ прикладной математики и механики ТГУ



**IX Всероссийская молодежная научная конференция  
«Актуальные проблемы современной механики  
сплошных сред и небесной механики – 2019»**  
г. Томск, 18–20 ноября 2019 г.

**IX All-Russian Youth Scientific Conference  
«Current issues of  
continuum mechanics and celestial mechanics – 2019»**  
November, 18–20, 2019

Томск-2020

УДК 539.3.004  
ББК 22.25; 22.251.22.62  
М43

**Всероссийская** молодежная научная конференция «Актуальные проблемы М43 современной механики сплошных сред и небесной механики» 18–20 ноября 2019 г.: Материалы конференции / под ред. М.Ю. Орлова. – Томск: Изд-во «Красное знамя». 2020. – 340 с.

ISBN 978-5-6045081-1-4

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 2019 г.

Для научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов.

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

ISBN 978-5-6045081-1-4

© Томский государственный университет, 2020  
© Издательство «Красное знамя», 2020

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](http://www.cimcm.tsu.ru)

«Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics 2019»  
IX<sup>th</sup> International Youth Scientific Conference  
Tomsk, Russia, 18–20 November 2019



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

All-Russian Youth Scientific Conference "Currently issues of continuum mechanics and celestial mechanics", November 18–20, 2019: The conference proceedings / Ed. M.Yu. Orlov. – Tomsk: Izdatelstvo "Krasnoe znamya", 2020. – 340 p.

ISBN 978-5-6045081-1-4

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

© Tomsk State University, 2020  
© Izdatelstvo "Krasnoe znamya", 2020

## ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ:

Со-Председатели:

**Глазунов Анатолий Алексеевич**, д.ф.-м.н., профессор, ТГУ

**Крайнов Алексей Юрьевич**, д.ф.-м.н., профессор, ТГУ

### Члены программного комитета:

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

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

**Бордовицына Т.В.**, профессор, д.ф.м.н., профессор ФФ ТГУ

**Ворожцов А.Б.** проректор ТГУ по НИД

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

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

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

**Милейко С.Т.** проф. д.ф.-м.н. ИФТТ РАН

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

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

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

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

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

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

**Орлов М.Ю.** к.ф.-м.н., НИИ ПММ ТГУ

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

## МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

**Кружка Л.С.** (Военно-технологический университет им. Домбровского, Польша)

**Фомин Н.А.** (Институт тепло-массообмена им. Лыкова, Белоруссия)

**Кусаинов К.К.** (Карагандинский госуниверситет им. А.Е. Букетова, Республика Казахстан)

**Ахмед Брага** (директор RIB, Алжир)

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

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

**Мартина Дрдлова** (НИИ строительных материалов, Чехия)

**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

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

**Савкина Н.В.**, к.ф.-м.н., доцент ТГУ; **Козулин А.А.**, к.ф.-м.н., доцент ТГУ;

**Порязов В.А.**, аспирант ТГУ; **Хрусталева А.П.**, магистрант ТГУ; **Евсеев Н.С.**, НИИ ПММ ТГУ; **Пристай А.М.**, студент ТГУ; **Фазылов Т.В.**, студент ТГУ;

**Перфильева К.Г.**, магистрант ТГУ; **Маслов Е.А.**, к.ф.м.н. НИИ ПММ ТГУ;

**Басалаев С.А.** к.ф.м.н. НИИ ПММ ТГУ (веб-мастер)

## **Co-Chairs:**

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

**Alexey Krainov**, Ph.D., professor, TSU

## **PROGRAM COMMITTEE MEMBERS:**

**V. Arhipov** (SRI AMM), **T. Bordovitsyna** (SRI AMM), **V. Bimatov** (TSU), **V. Butov** (SRI AMM), **I. Vasenin** (TSU), **A. Vorozhtsov** Vice-rector of TSU, **A. Vasilev** (SPbPolyTechU), **V. Glazyrin** (SRI AMM), **A. Ishchenko** (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**, Ph.D., professor, TSU

## **INTERNATIONAL COMMITTEE MEMBERS:**

**L. Kruzhka**, Ph.D., Military University of Technology (Poland),  
**N. Fomin**, Professor, Ph.D., A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NASB (Belorussia), **K. Kusainov**, Professor, Ph.D., The Karaganda State University of the name of academician E.A. Buketov (Kazakhstan),  
**A. Brara**, Ph.D., director of CNERB Research Center (Algeria),  
**M. Milinovich**, professor, Ph.D., University of Belgrad (Serbia),  
**Hussam Ali Khalaf**, PhD Marshes Research Center, University of Thi-Qar (Iraq),  
**M. Drdlova**, PhD, Research Institute for Building Materials (Czech Republic), **Pascal Forquin**, Prof. Dr., Universite Joseph Fourier (France),  
**Iqbal M.A.** Ph.D. Dr. Indian Institute of Technology Roorkee (India),  
**Abraham Christian**, Ph. D. National University of Singapore (Singapore),  
**Yulie Bai**, Ph.D, Beijing University of Technology (China),  
**U. Johnson Alengaram**, Prof. Dr., University of Malaya (Malasia),  
**Al. Filkov**, Ph.D. The University of Melbourne, (Australia),  
**Mikko Hokka**, Ph.D. Tampere University Technology (Finland), Prof.  
**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., RSI 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 (Томск)  
НИИ прикладной математики и механики ТГУ (Томск)  
НИ Томский политехнический университет (Томск)  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (Томск)  
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (Томск)  
Томский научный центр СО РАН (Томск)  
НИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского (Н. Новгород)  
НИ Московский государственный университет им. Н.Э. Баумана (Москва)  
РФЯЦ ВНИИ экспериментальной физики (Саров)  
НИУ «Высшая школа экономики» (Москва),  
НИ Московский авиационный университет (Москва)  
НИУ «Информационных технологий, механики и оптики» (Санкт-Петербург)  
Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (Санкт-Петербург)  
Балтийский федеральный университет им. И. Канта (Калининград)  
Сибирский федеральный университет (Красноярск)  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)  
Новосибирский государственный технический университет (Новосибирск)  
Казанский (Приволжский) федеральный университет (Казань)  
Кубанский государственный университет (Краснодар),  
Ижевский технический университет им. М.Т. Калашникова (Ижевск)  
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск)  
Челябинский государственный университет (Челябинск)  
Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (Бийск)  
Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина (Саратов)  
Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского (Саратов)  
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск)  
Южный научный центр Российской академии наук (Ростов-на-Дону)  
Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема (Биробиджан)  
Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН (Новосибирск)  
Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина (Химки)  
МНИЦ «Когерентная рентгеновская оптика для установок Мегасайенс»  
ООО «ШахтЭксперт-Системы»

## ORGANIZATIONS

National research Tomsk State University (Tomsk)  
Scientific Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics  
of Tomsk State University  
National Research Tomsk Polytechnic University (Tomsk)  
Tomsk State University of control system and Radioelectronics (Tomsk)  
V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS (Tomsk)  
Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of  
Sciences (Tomsk)  
Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod (N. Novgorod)  
Bauman Moscow State Technical University (Moscow)  
The Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute  
of Experimental Physics (Sarov)  
Higher School of Economics (Moscow)  
National Research Moscow Aviation Institute (Moscow)  
ITMO University (St. Peterburg)  
Baltic State Technical University “VOENMEH” (St. Petersburg),  
Siberian State Aerospace University (Krasnoyarsk)  
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering  
(Novosibirsk)  
Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk)  
Kazan Federal University (Kazan)  
Kuban State University (Krasnodar)  
Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk)  
Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of  
Russian Academy of Sciences (Tomsk)  
Immanuel Kant Baltic Federal University (Kaliningrad)  
Chelyabinsk state University (Chelyabinsk)  
Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian  
Branch of the Russian Academy of Sciences (Biysk)  
Saratov State University (Saratov),  
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (Saratov)  
Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian  
Academy of Sciences (Novosibirsk)  
Federal Research Centre The Southern Scientific Centre of The Russian  
Academy of Sciences (Rostov-on-Don)  
Amur State University named after Sholom Aleichem (Birobidjan)  
Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion, Siberian Branch of  
the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk)  
Lavochkin Research and Production Association (Khimki)  
LLC Mining Expert Systems

## ПРЕДИСЛОВИЕ

18–20 ноября 2019 г. на базе Томского государственного университета прошла ежегодная IX Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики». Было заслушано более 100 докладов из Москвы, Санкт-Петербурга, Бийска, Н. Новгорода, Новосибирска, Ростова-на-Дону, Саратова, Казани, Кемерово, Красноярска, Челябинска, Биробиджана других городов.

Среди традиционных участников были студенты старших курсов, магистранты и аспиранты. Согласно статистике более тридцати процентов участников – это авторы и коллективы, которые ранее уже участвовали в конференции. Впервые приняли участие исследователи НИУ «Высшая школа экономики», Ижевского технического университета им. М.Т. Калашникова, НИУ «Информационных технологий, механики и оптики». Данный факт говорит о постоянном расширении географии мероприятия и интересе молодых ученых к механике сплошных сред и небесной механике. Количество посещений нашего сайта превысило 18 000.

Все доклады подвергались строгому рецензированию, программный комитет отдавал предпочтение работам, в которых изложены новые научные результаты на достаточно высоком уровне. Эти работы составили подавляющее большинство. Много докладов поддержаны различными научными фондами (РФФИ, РНФ, Фонд Бортника, Президента РФ).

Настоящий сборник материалов конференции – это шестая книга, доступная в режиме «открытого доступа». Расширенные версии докладов трижды опубликованы в международном издательстве IOPPublishing (United Kingdom) в научном издании «Journal of Physics. Conference Series». В прошлом году избранные статьи были опубликованы в сербском международном научном издании “Thermal Science” отдельным Специальным выпуском.

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

Информация о конференции находится на веб-страницах:

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

<https://vk.com/cimcm>

До новых встреч!

Председатель Организационного комитета конференции

К.ф.-м.н., Орлов М.Ю.

## EDITOR'S PREFACE

November 18–20, 2019, the annual IX All-Russian Youth Scientific Conference "Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics" was held at the National Research Tomsk State University. This time over 100 reports from Moscow, St. Petersburg, Biysk, N. Novgorod, Novosibirsk, Rostov-on-Don, Saratov, Kazan, Kemerovo, Krasnoyarsk, Chelyabinsk, Birobidzhan and other cities were presented.

Among the traditional participants were senior students of technical specialties, undergraduates and graduate students. According to statistics, more than thirty percent of the participants are authors and teams of authors who previously participated in our event. For the first time, researchers from the Higher School of Economics (Moscow), Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk), ITMO University (St. Petersburg). This fact indicates a constant expansion of the geography of the event and the interest of young researchers in continuum mechanics and celestial mechanics. By the way, the number of visits to our site has exceeded 40,000.

All reports were subjected to more rigorous peer-reviewing, the program committee preferred only papers that set forth new scientific results at a fairly high scientific level. Fortunately, it should be noted that the vast majority of such works. Many reports were supported by various scientific Foundations (RFBR, RSF, Bortnik Foundation, President of the Russian Federation).

The Proceeding is the sixth accessible book in "open access" mode. Expanded versions of the reports were published three times in the international publishing house IOPPublishing (United Kingdom) in the scientific journal *Journal of Physics. Conference Series*. Last year, selected articles were published in the Serbian international scientific publication "Thermal Science" as a separate Special Issue.

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

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

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

<https://vk.com/cimcm>

Until next time!

Chairman Conference Organizing Committee

Ph.D., M. Yu. Orlov

## ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

Со-Председатели:

д.ф.-м.н. А.Ю. Крайнов

д.ф.-м.н. А.А. Глазунов

Труд в сфере науки

Излучение и волновая оптика

Миллиметровые и субмиллиметровые волны

Механика сплошных сред

Механика деформируемого твердого тела

Численные методы в механике сплошных сред

Прочность машиностроительных конструкций

Разрушение

## PLENARY SESSION

Co-Chairs:

Prof. Alexey Krainov

Prof. Anatoly Glazunov

Science, general

Physics, general

Applied and Technical Physics

Software Engineering

Mathematics of Computing

Condensed Matter Physics

Continuum Mechanics and Mechanics of Materials

Job Careers in Science and Engineering



**FOR THE JUBILEE OF PROFESSORS  
IGOR V. MININ AND OLEG V. MININ: CONTRIBUTIONS TO  
PLASMA PHYSICS, SHOCK WAVE AND HYPERCUMULATION  
EFFECT**

**P. Baranov**

National Research Tomsk Polytechnic University, Russian Federation  
bpf@tpu.ru

**Keywords:** hypercumulation, diffractive optics; subwavelength focusing; optical forces, plasma jet; acoustic jet; acoustic hook.

**Abstract.** This March, 2020, Professors Igor V. Minin and Oleg V. Minin, Doctors of Physics, correspondent members of Russian Academy of Metrology, outstanding scientists in the field of calculation experiment technology, hypercumulative process, diffractive optics, and terahertz photonics, has marked their 60-th anniversary. This article gives a brief review of their life-time achievements in science and education. We briefly analyze the jubilee's contribution to the development of shock waves, cumulative and plasma jets, field localization by mesoscale particles in acoustic.

On March 22, 2020, we will be celebrating 60<sup>th</sup> birthday of outstanding scientists, teachers, twins and friends, doctors of Technics, of the professors, corresponding members of the Russian Academy of Metrology Igor Vladilenovich Minin and Oleg Vladilenovich Minin. I.V. Minin and O.V. Minin have established strong research foundations in different fields of physics having a global priority including hypercumulations, 3D diffractive optics for shock wave focusing, subwavelength structured light - acoustic jet and hook.

**Milestones.** Igor and Oleg Minin graduated in 1976 with honors from high school N162 in Novosibirsk and enrolled at the Physical Department of the Novosibirsk State University. They graduated from Novosibirsk State University in 1982. I.V. Minin defended his thesis for the degree of candidate of physics and mathematics on radiophysics, including quantum physics at St. Petersburg Electrotechnical Institute in 1986. O.V. Minin defended his thesis for the degree of candidate of physics and mathematics on radiophysics, including quantum physics in Tomsk Institute of Atmospheric Optics, in 1987. At the same time, from 1981 to 1982 they part-time worked as the laboratory assistants at the Institute of Applied Physics (IAP, Novosibirsk), founded by his father - Prof. V.F.Minin in 1966. The results of the thesis in 1982, 1988, 1991 formed the basis of 4 monographs (in Russian), later also translated to English. These works were awarded by the Minister of Defense of the Russian Federation (for the best scientific work during 1997–2000).

After defending their PhD theses, I.V.Minin and O.V.Minin worked in IAP as assistants and senior researchers. In 1991, they received a certificate of associate professors. In March 2004, I.V.Minin and O.V.Minin defended their doc-

toral thesis at the Novosibirsk State Technical University (on the same day) and received degrees of Doctor of Technical Sciences (equivalent to Habilitation degree). In addition, they are members of the several editorial boards of scientific journals, experts of the Russian Science Foundation, Russian Fund for Basic Research, Federal experts in scientific fields, were experts of the COST 284 "Innovative Antennas for Emerging Terrestrial & Space-based Applications", and awarded with medals named after V.I. Vernadsky and A. Nobel. The biographical data of profs. I.V.Minin and O.V.Minin were included into Marquis Who's Who in the World.

As up to date, I.V.Minin and O.V.Minin have 450 joint research publications, including 22 monographs (12 in Russian, 9 in English and 1 in Chinese) and more than 100 author's certificates and patents of the USSR and Russia.

**Plasma physics.** New effects of plasma properties with condensed dispersion phase initiated in the air by moving hypervelocity body and explosive plasma antenna formed due to chemoionization of combustion products have been discovered [1]. I.V. Minin and O.V. Minin made the pioneering investigations of plasma jets (PJ) produced by intense laser matter interactions. The forced jet formation regime was based on hypercumulation principles in application to better understand astrophysical jets, where a cumulative jets are observed to originate from young stellar objects and active nuclei galaxies (the physical principles of forced plasma jet formation for the first time was described in the patents of the USSR: 1508940 (1989), 1508938 (1990)). The comparison with the parameters of the PJ formed from the "ordinary" conical target showed that the increase of the PJ speed in the suggested configuration is 25–30% and the increase of PJ pulse is more than 100 times. These results also give insight into shock physics. Also the pioneering works in hypercumulation effect allowed to develop the concept of acceleration of microparticles to hypervelocity during ablative acceleration of a metal foil.

**Shock wave.** The polymorphic transformation of the graphite-like boron nitride into the diamond-like state at the shock compression were investigated in 1990. Experimental studies were conducted both on set-ups weighing up to two kilograms and on full-scale mock-ups weighing up to fifteen kilograms. Results of the X-ray analysis of the synthesized vucite show that the developed container construction provides a reliable mass yield of vucite-like boron nitride to 92–95%. Besides the peak area ratio of the graphite and vucite structure was almost constant and makes about 0.24.

Later it was shown that the diffractive optical element "transmitted" to the continuum mechanics from electromagnetic regions can be applied to focusing shock wave into arbitrary space. Pioneering methods developed by I.V.Minin and O.V. for diffraction optics design made it possible for the first time to focus shock waves in water in an arbitrary region [2] and for the Soret zone plate geometry simulated shock focusing and diffraction by referencing a characteristic wavelength of an attenuated shock pulse.

**Hypercumulations.** The main processes that proceed during the generation of a shaped-charge jet were described by the M.A. Lavrentyev-Birkhoff theory as a model of plane stationary impingement of incompressible fluid jets at angles less than 180 degrees. It is a well-known fact confirmed by the almost 100-year practice of designing shaped charges. Work under the scientific leadership of Prof. Vladilen F. Minin on the creation of the scientific foundations of the physics of hypercumulation made a significant contribution to the development of cumulation of energy and cumulative charges. As a result, in such charges, the mass of the formed cumulative jet reaches 80% or more of the mass of the liner with speed, for example, for aluminum or copper liners and conventional explosives, more than 20 km/s with a material density in the jet of the order of the density of the liner material, which is not achievable in classical cumulation [3–5]. Thus they are doing research on hypercumulative charges based on the new principles to open new prospects for different fields of science and technology, in the main way to increase oil production in the oil and gas industry by increasing the diameter of the wells. The results were summarized in the Russian monograph recently translated to Chinese. For the contribution to the theory of hypercumulation, I.V. Minin and O.V. Minin were awarded the medal of the Russian National Committee on Theoretical and Applied Mechanics named after Rakhmatulin in 2013.

The mechanism for eliminating the instabilities that arise when compressing thin from heavy metals, liners, and the formation of a cumulative jet has been investigated. For the first time, to increase the plastic properties of the material of the cumulative jet, the properties of the crystals of the cladding material were used. Involving the physics of crystals in the physics of cumulation, the creation of anisotropic claddings, can provide an increase in the penetration depth of the barrier, eliminate the strong dependence of the properties of the cumulative jet on the grain size in the cladding [4–5].

Impact craters formed by meteorites were also investigated. In the centre of some lunar craters there are some hills and discharges, with large diameter and small depth of the crater. Minins proved hypothesis that the shape of the crater explicitly depends on the shape of the striker, which determines its energy discharge in process of moving through the obstacle. There is a variety of shapes of meteorites craters colliding with planets surfaces. However it has not been proved that this variety is the only one and some new shapes of craters won't appear.

**Acoustics.** O.V. Minin and I.V. Minin are pioneers in the field of the effect of the acoustic jet. It has been demonstrated for the first time an existence of acoustic analogue of photonic jet phenomenon, called acoustojet, providing for subwavelength localization of acoustic field in shadow area of arbitrary 3D penetrable mesoscale particle [6]. This effect was experimentally verified for flat cubic gas-filled particle [7] despite the fact that per the laws of geometrical optics, a plane-parallel medium does not possess focusing properties, spherical

lenses using liquid mixtures [8], liquid-liquid core-shell configurable mesoscale spherical acoustic lens [9] where the choice of the inner liquid allows a coarse control of the acoustic jet properties. They have also demonstrated the effects of anomalous apodization for acoustic particle lenses [10], as well as the possibility of subwavelength focusing by a cubic lens with a photonic crystal structure [11]. It was found that by 2D periodic internal structure of 3-D external cuboid shape it is possible to obtain 3D sonic wave focusing and full width at half maximum below the diffraction limit can be achieved.

Also they discovered and report the experimental observation of a new type of near-field curved acoustic beam in water which is principal different from the Airy-family beams and generate due to asymmetric distribution of the vortices in a polymer Janus particle (Figure 1). The radius of curvature of acoustical hook is less than the wavelength. Indeed, today it is the smallest radius of curvature ever recorded for any acoustical beams [12].

The ability to control the focusing properties of an acoustic zone plate, including the formation of a Bessel beam, has been demonstrated in [13-14]. New methods for manipulating nanoparticles in droplets have been developed as well [15].

Summing up, we would like to wish Igor V. Minin and Oleg V. Minin bring about new exciting results and discoveries and to be always surrounded by enthusiastic and gifted disciples eager to further advance of scientific research!

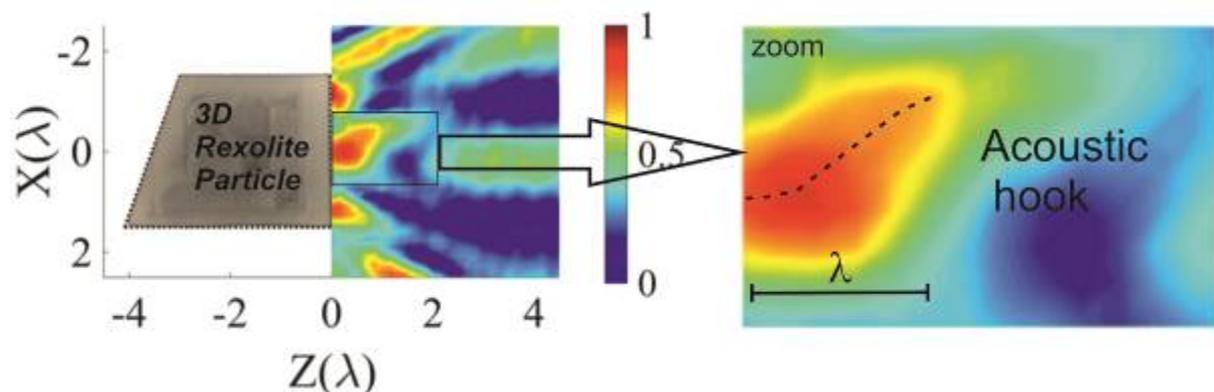


Fig. 1. Acoustic hook formation from 3D Rexolite Janus particle, immersed in water (adapted from [12])

## References

1. *Minin I.V. and Minin O.V.* The influence of the grain size of microstructure of the surface layer material of a hypersonic body on the properties of air plasma. The 10th Electromagnetic Launch Technology Symposium, Institute for Advanced Technology, San Francisco, California, USA, April 25–28, 2000.
2. *Minin V.F., Minin I.V., Minin O.V.* The possibility of shock wave focusing to a preset space region with the elements of diffraction quasiotics. In: Takayama K. (eds) Shock Waves. Springer, Berlin, Heidelberg, 351–353 (1992).

3. *Minin V.F., Minin O.V., Minin I.V.* Physics of hypercumulation and combined shaped charges. Proc. 11<sup>TH</sup> Int. Conf. on Actual problems of electronic inst. Eng. (APEIE) – 30057, 2rd – 4th October, 2012. Pp. 34–52.
4. *Minin V.F., Minin I.V., Minin O.V.* Hypervelocity fragment formation technology for ground-based laboratory tests. *Acta Astronautica*, 104(1), 77 (2014)
5. *Minin V.F., Minin I.V., Minin O.V.* Some Possibilities of Hypercumulative Regime of Jet Formations. *Applied Mechanics and Materials* 782, 42 (2015).
6. *Minin O.V. and Minin I.V.* Acoustojet: acoustic analogue of photonic jet phenomenon based on penetrable 3D particle. ***Optical and Quantum Electronics* (2017) (49:54)**
7. *Rubio C., Tarrazó-Serrano D., Minin O.V., Uris A., Minin I.V.* Sound focusing of wavelength scale gas-filled flat lens. *Europhysics letters, EPL*, 123 (2018) 64002
8. *Perez-Lopez S., Fuster J.M., Minin O.V., Minin I.V. and Candelas P.* Tunable sub-wavelength ultrasound focusing in spherical lenses using liquid mixtures. *Scientific Reports* **9**, 13363 (2019)
9. *Perez-Lopez S., Candelas P., Fuster J.M., Rubio C., Minin O.V. and Minin I.V.* Liquid-liquid core-shell configurable mesoscale spherical acoustic lens with subwavelength focusing. *Applied Physics Express* 12, 087001 (2019)
10. *Rubio C., Tarrazó-Serrano D., Minin O.V., Uris A., Minin I.V.* Enhancement of pupil-masked wavelength-scale gas-filled flat acoustic lens based on anomaly apodization effect. *Physics Letters A*, 383(5), 396 (2019)
11. *Castiñeira-Ibáñez S., Tarrazó-Ibáñez D., Candelas P., Minin O.V., Rubio C. and Minin I.V.* 3D sound wave focusing by 2D internal periodic structure of 3D external cuboid shape. *Results in Physics* 15 (2019) 102582
12. *Rubio C., Tarrazó-Serrano D., Minin O.V., Uris A., and Minin I.V.* “Acoustical hooks: a new subwavelength self-bending beam,” *Results in Physics* 16, 102921 (2020)
13. *Tarrazo-Serrano D., Castieira-Ibanez S., Minin O.V., Rubio C., and Minin I.V.* Tunable depth of focus of acoustical pupil masked Soret Zone Plate. *Sensors & Actuators: A. Physical*, 286 (2019)
14. *Tarrazo-Serrano D., Rubio C., Minin O.V., Candelas P., Minin I.V.* Manipulation of focal patterns in acoustic Soret type ZP lens by using reference radius/phase effect. *Ultrasonics* 91 (2019) 237–241
15. *Qi X., Tang Q., Liu P., Minin I.V., Minin O.V., Hu J.* Controlled concentration and transportation of nanoparticles at the interface between an ordinary substrate and droplet. *Sensors & Actuators: B. Vol. 274*, 2018. Pp. 381–392.

# ВОЗМОЖНОСТИ ТРУДОУСТРОЙСТВА ВЫПУСКНИКОВ ВУЗОВ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОДГОТОВКИ

**Л.Н. Мухин**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
cstv@mail.tsu.ru

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

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

## OPPORTUNITIES OF EMPLOYMENT OF GRADUATES – PHYSICISTS AND MATHEMATICIANS

**L. Mukhin**

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

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

**Abstract.** The graduates employment possibilities of higher educational institutions of physical and mathematical directions of preparation are analyzed. Sources of information about possible areas of employment, employment opportunities, and vacancies are given. The main enterprises and whole industries are listed, where young specialists of this profile are in demand. The addresses and features of sites in the Internet are given, where the main number of Tomsk enterprises vacancies and the whole of Russia are published. The role of industrial practice, as a source of practical experience was noted.

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

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

Наукой можно заниматься и на промышленных предприятиях, где теснее связь с производством, что позволяет увидеть результаты своей работы «в железе». В последнее десятилетие резко увеличилось количество предложений от крупных компаний о приеме на работу молодых специалистов инженерных и физико-математических специальностей. Крупнейшие промышленные предприятия России, испытывая дефицит кадров, стараются «рекрутировать» будущих сотрудников еще со студенческой скамьи. В течение учебного года менеджеры по персоналу посещают вузы, проводят презентации. Любое крупное предприятие ведет политику не только рекрутинга, но и адаптации, поддержки и развития выпускников, стремясь в короткий срок превратить их в квалифицированных специалистов. В качестве примера можно привести предприятия «Росатома»: ВНИИТФ (г. Снежинск) [1] и ВНИИЭФ (г. Саров) [2] и др., «Роскосмоса», как например АО «Информационные спутниковые системы им. М.Ф. Решетнева» (г. Железногорск), и многие другие.

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

В ряду современных научно-производственных предприятий находятся и предприятия министерства обороны РФ. Один из них – 12-й ЦНИИ МО РФ. По производственному и научному потенциалу, по направлению и уровню решаемых задач он стоит в одном ряду с вышеперечисленными ведущими предприятиями «Росатома» и «Роскосмоса». Институт предлагает несколько возможностей трудоустройства молодых специалистов – выпускников вузов [3]:

- военнотрудового по контракту на офицерских должностях научных сотрудников (для выпускников, прошедших обучение на военной кафедре);

- военнотрудового по призыву в составе научной роты, созданной в 2016 году при институте (для выпускников, подлежащих призыву на срочную военную службу);

- гражданского научного сотрудника.

При этом 12-й ЦНИИ МО РФ принимает на работу или на службу граждан России, независимо от наличия у них родственников за границей, и может послужить карьерным лифтом для многих из них в отсутствие других возможностей.

Министерство обороны РФ предлагает и другой вариант трудоустройства – служба по контракту. Выпускник вуза может выбрать место службы по своей гражданской специальности, при этом он обеспечивается обмундированием, питанием, служебной или съемной жилплощадью и конкурентной зарплатой в зависимости от места службы и специальности. В отличие от срочной службы в научной роте, контракт заключается на два года. Затем можно продолжить службу или уйти на работу на гражданское предприятие или организацию. На службу по контракту принимают и иностранных граждан, при этом первый контракт заключается на пять лет и, по желанию гражданина, процедура смены гражданства значительно упрощается. Это тоже один из вариантов карьерного лифта для иностранных граждан, желающих остаться в России.

В последнее десятилетие, в отличие от 90-х и начала 2000-х, на сайтах подавляющего большинства крупных промышленных компаний, академических институтов, предприятий госкорпораций появились разделы, посвященные привлечению молодых специалистов. В разделе «Карьера» или «Вакансии для выпускников вузов» или под другими подобными названиями описан порядок представления резюме, порядок проведения отбора, условия работы, размер вознаграждения, социальные гарантии сотрудников и т.д. Такие разделы появились уже даже на сайтах предприятий нефтегазовой отрасли.

Примером может служить сайт Компании «Шлюмберже» (Schlumberger) [4], где привлечению выпускников посвящен целый портал и описаны не только вакансии для выпускников различных направлений подготовки, но и возможности прохождения нескольких видов практик в разное время года. Огромная компания, насчитывающая более 120 тысяч сотрудников по всему миру, нуждается как в молодых специалистах технических специальностей, физиках, математиках, так и естественных специальностей – химиках, геологах, биологах. Очень интересные возможности открываются для выпускников магистратуры, которые бакалавриат закончили по одной специальности, а магистратуру – по другой, например биология и физика или химия и математика. Кроме того, компания периодически запускает обучающие бесплатные on-line проекты. На момент подготовки данного материала на сайте компании красовался анонс бесплатного ежегодного онлайн курса для девушек «Разгляди себя в нефтегазе» [5]. Это не только шанс получить важные знания для будущей возможности трудоустройства, но и получить стипендию в размере 50 000 рублей и пройти стажировку в глобальной технологической компании! Как и предприятия «Росатома», компания «Шлюмберже» не принимает на рабо-

ту в России граждан Казахстана, однако у них есть возможность устроиться в компанию через её казахстанский офис.

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

- разработка и сопровождение математических моделей спроса, ценообразования, оценки рисков и т.п.;

- анализ и прогнозирование рынков нефтепродуктов России и СНГ;

- ведение информационной базы рыночной статистики и т.д.

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

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

Приведены примеры только нескольких крупных предприятий. На самом деле таких возможностей для трудоустройства десятки, если не сотни в разных регионах России. Конечно, поиск возможностей удачного трудоустройства требует определенного труда: изучить на сайте информацию о компании, сравнить с другими, правильно составить и отправить несколько резюме в несколько разных компаний, обсудить с рекрутерами компаний условия приема и дальнейшей работы. Пройдя этот путь, можно будет уже выбирать из нескольких вариантов трудоустройства наиболее подходящий.

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

Хорошим заделом к будущему трудоустройству является производственная практика. Большую помощь в организации практики могут и должны оказывать преподаватели и сотрудники кафедры: очертить круг предприятий, помочь составить первое профессиональное резюме, написать сопроводительное письмо, характеристику, помочь оформить договор университета с предприятием – базой практики. Место практики можно выбрать себе самостоятельно, разослав несколько десятков резюме и со-

проводительных писем. Главное условие здесь, конечно, активность самого студента.

Многие студенты задают вопрос: «Что делать, если без опыта работы не берут на работу, а опыт во время учебы получить негде?». Производственная практика, проведенная на реальном предприятии, практическое знакомство с реальными научными или производственными задачами – это тот опыт, который в профессиональном резюме можно представить как опыт работы. Много примеров, когда этот прием полностью оправдывает себя. Даже если студент проходит практику в родном университете, но работает на современном оборудовании, использует аппаратные и программные средства, применяемые на реальных предприятиях, опыт выполнения таких практик можно представить в профессиональном резюме, как реальный опыт работы и не стесняться этого. В объявлениях о вакансиях слова о наличии опыта у кандидата не всегда означают необходимость записи в трудовой книжке. Часто опыт выполнения курсовых и дипломной работ может стать реальной заменой «опыту от одного года». Несколько выпускников химического факультета НИ ТГУ 2017 и 2018 годов, выполняли курсовые работы и проходили практику в стенах родных лабораторий, на типовом промышленном оборудовании. Они разместили свои резюме на рекрутинговых сайтах сети Интернет [7, 8] и получили предложения от работодателей. Сейчас они работают на промышленных предприятиях Томска и Новосибирска.

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

Кроме собственных сайтов предприятий, в Интернете можно найти множество других источников информации о возможностях трудоустройства. В первую очередь это, конечно, специализированные сайты с прямыми вакансиями работодателей. В Томске основными сайтами для поиска работы являются: сайт газеты «Вакансии для всех» [9], томский раздел федерального портала «Zarplata» [10]. На сайте ОПиТ ТГУ [11] можно найти

базу ссылок на страницы вакансий предприятий г. Томска, вакансии, полученные от работодателей, другие возможности трудоустройства выпускников и занятости студентов.

Много лет порталы федеральных рекрутинговых компаний HeadHunter [6] и Superjob [7] были ориентированы в основном на кандидатов, уже имеющих опыт работы. Однако в последние годы резюме выпускников – молодых специалистов – тоже востребованы. Причем обращаются к ним не кадровые агентства, а реальные работодатели, предприятия и компании.

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

Большие возможности для трудоустройства предоставляет федеральная служба занятости. После регистрации в Центре занятости молодому специалисту становится доступна база имеющихся вакансий на предприятиях всей России [8]. Эта база находится в открытом доступе, но иногда без контактных данных предприятий. Можно самому выбрать вакансию или предприятие по ключевым словам, а можно обратиться за помощью к консультанту. Кроме этого Центр занятости населения (ЦЗН) г. Томска совместно с ОПиТ НИ ТГУ открыли новую услугу – биржу труда для студентов. Можно выбрать вакансию на сайте ЦЗН [12] среди вакансий работодателей, готовых принять студентов на подработку в свободное от учебы время или прийти в приемные часы и получить консультацию специалиста.

Необходимо упомянуть еще два важных качества выпускника, способствующих успешному трудоустройству, владение специальными компьютерными программами и уверенное владение английским (или иным иностранным) языком. Почти у каждой специальности есть специализированные компьютерные программы. Некоторые профессии уже не существуют без компьютерных технологий. Уверенное владение профессиональными программами значительно повышает шансы молодого специалиста на успешное трудоустройство. Знание английского языка значительно расширяет кругозор, возможности окунуться не только в российскую, но и в мировую профессиональную среду. Это значительно увеличивает конкурентоспособность на рынке труда. К тому же, многие крупные мировые компании вообще не рассматривают кандидатов без знания английского.

Таким образом, перед студентами физико-математических направлений подготовки открывается множество возможностей найти и выбрать интересную работу после окончания вуза. Для этого надо определиться с выбором будущей занятости, повышать квалификацию, поставить себе цель

уже на 1–2 курсе и искать людей, работодателей, предприятия, которые помогут ее достичь.

### Литература

1. ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина». Целевой набор: [сайт]. URL: <http://www.vniitf.ru/sotrudnikam/budushchim-sotrudnikam/tselevoj-nabor-2014>
2. Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ – ВНИИЭФ). Организация практики и дипломного проектирования студентов: [сайт]. URL: <http://www.vniief.ru/wps/wcm/connect/vniief/site/carier/cpolit/practice/>
3. 12 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации. Вакансии: [сайт]. URL: <http://ens.mil.ru/science/SRI/information.htm?id=12008@morfOrgScience>
4. Компания «Шлюмберже». Вакансии для выпускников вузов: [сайт]. URL: [http://www.slb.ru/careers/carier\\_start/#tab\\_section113](http://www.slb.ru/careers/carier_start/#tab_section113)
5. Компания «Шлюмберже». Разгляди себя в нефтегазе: [сайт]. URL: <http://changelenge.com/slb-career/>
6. Группа компаний HeadHunter. Работа в Томске: [сайт]. URL: <https://tomsk.hh.ru/>
7. Superjob. Работа в Новосибирске: [сайт]. URL: <https://nsk.superjob.ru/>
8. Работа в России. Общероссийская база вакансий: [сайт]. URL: <https://trudvsem.ru/>
9. Вакансии для всех. Ежедневная газета: [сайт]. URL: <http://vacancy-tomsk.ru>
10. «Зарплата.ru». Вакансии в Томске: [сайт]. URL: <https://tomsk.zarplata.ru/>
11. Отдел практик и трудоустройства НИ ТГУ. Вакансии предприятий Томска: [сайт]. URL: [http://www.cstv.tsu.ru/pv\\_2017.pdf](http://www.cstv.tsu.ru/pv_2017.pdf)
12. Центр занятости населения г. Томска. Биржа труда для студентов: [сайт]. URL: <http://czn.tomsk.ru/notes/ob185/>

### References

1. Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All–Russia Research Institute of technical Physics». Target set: [site]. URL:
2. Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics. Organization of practice and graduate design of students: [site]. URL: <http://www.vniief.ru/wps/wcm/connect/vniief/site/carier/cpolit/practice/>
3. 12 Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Jobs: [site]. URL: <https://ens.mil.ru/science/SRI/information.htm?id=12008@morfOrgScience>
4. Schlumberger. Jobs for graduates: [site]. URL: [http://www.slb.ru/careers/carier\\_start/#tab\\_section113](http://www.slb.ru/careers/carier_start/#tab_section113)
5. Schlumberger. See yourself in the oil and gas industry: [site]. URL: <http://changelenge.com/slb-career/>
6. Group of companies HeadHunter. Work in Tomsk: [site]. URL: <https://tomsk.hh.ru/>
7. Superjob. Work in Novosibirsk: [site]. URL: <https://nsk.superjob.ru/>
8. Work in Russia. All-Russian database of vacancies: [site]. URL: <https://trudvsem.ru/>
9. Jobs for everyone. Weekly newspaper: [site]. URL: <http://vacancy-tomsk.ru>
10. "Zarplata.ru". Jobs in Tomsk: [site]. URL: <https://tomsk.zarplata.ru/>
11. Department of Practices and Employment TSU. Jobs Tomsk enterprises: [site]. URL: [http://www.cstv.tsu.ru/pv\\_2017.pdf](http://www.cstv.tsu.ru/pv_2017.pdf)
12. Employment Center of Tomsk. The employment center for students: [site]. URL: <http://czn.tomsk.ru/notes/ob185/>

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ. ИТОГИ РАБОТЫ ЛАБОРАТОРИИ ПРОЧНОСТИ НИИ ПММ ТГУ

**М.Ю. Орлов, В.П. Глазырин, Ю.Н. Орлов**

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

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

**Аннотация.** В работе суммированы результаты исследований процесса разрушения твердых тел при ударно-волновых нагрузках. Исследования проведены в интересах развития различных отечественных отраслей промышленности. Сформулирована физико-математическая модель как одна из сложных моделей механики сплошных сред. Модифицирован численный лагранжев метод специально для решения определенного круга задач. Модель и метод были тщательно проверены путем сравнения с известным аналитическим решением и надежными экспериментальными результатами. В отдельных случаях проведено сравнение с результатами моделирования других авторов. Создан и постоянно развивается некоммерческий программный комплекс. Численные результаты получены с помощью одной из последних версий. Организована мобильная лаборатория «Взрывное разрушение природных материалов» для углубления знаний разрушения материалов при динамических нагрузках. Проведен экспресс-анализ разрушения природных материалов, в том числе речного льда средней толщины.

## RESEARCH OF SOLID BODY DESTRUCTION AT SHOCKWAVE LOADING. RESULTS OF WORK OF THE STRENGTH LABORATORY OF RIAMM TSU

**M. Orlov, V. Glazyrin, Yu. Orlov**

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

**Keywords:** model, explosion, impact, experiment, modeling, calculation, destruction.

**Abstract.** The paper summarizes the results of studies of the process of destruction of solids under shock-wave loads. Research conducted in the interests of the development of various domestic industries. A physical and mathematical model is formulated as one of the complex models of continuum mechanics. The numerical Lagrangian method is modified specifically for solving a certain range of problems. The model and method were thoroughly tested by comparison with a well-known analytical solution and reliable experimental results. In some cases, a comparison was made with the results of modeling other authors. A non-commercial software package has been created and is constantly developing. Numerical results were obtained using one of the latest versions. The mobile laboratory “Explosive destruction of natural materials” was organized to deepen knowledge of the destruction of mate-

rials under dynamic loads. An express analysis of the destruction of natural materials, including river ice of medium thickness, was carried out.

Процессы, протекающие в твердых телах при ударно-волновом нагружении, являются предметом постоянных фундаментальных и прикладных исследований [1–5]. Это объясняется широкими практическими приложениями, а именно: создание новых ударостойких защит гражданских и военных объектов, сварку и резание взрывом, гидроштамповку, ударно-волновое прессование, взрывное упрочнение, безопасность оболочек ядерного реактора, защита космических аппаратов и элементов летательных аппаратов. Известно [5], что соударение тел сопровождается сложными процессами, окончательная роль которых определяется наличием ряда факторов: начальной скоростью объектов, их составом, формой, физико-механическими характеристиками и т.д. При количественном описании процессов деформирования и разрушения возникает много проблем, которые в настоящее время далеки от решения и требуют привлечения теоретических и экспериментальных методов исследования.

В работе суммированы результаты научно-исследовательской работы по данной теме, которая проведена в НИИ ПММ. Приведена физико-математическая модель деформирования и разрушения материалов при динамических нагрузках. На основе лагранжева подхода к описанию движения сплошных сред разработан численный метод расчета процесса разрушения неоднородных конструкций. Создан некоммерческий программный комплекс для моделирования процессов разрушения в осесимметричной и плоском случае. Постоянно проводятся лабораторные эксперименты, призванные проверить адекватность феноменологической модели и всех расчетных алгоритмов. Последней инновацией следует считать организованную на базе отдела МДТТ мобильную лабораторию «Взрывное разрушение природных материалов» [6].

Поведение твердых тел описывается макроскопической феноменологической сложной моделью механики сплошных сред. Модель базируется на фундаментальных законах сохранения массы, импульса и энергии. В рамках данной модели материал является упруго-пластическим, пористым, сжимаемым, учитывающий свойства прочности, ударно-волновые явления и совместное образование как отрывных, так и сдвиговых разрушений. Концепция разрушения твердых тел основана на детерминированном подходе. Определяющие соотношения задаются уравнениями Прандтля – Рейса при условии текучести Мизеса. Уравнение состояния выбрано в форме Уолша, так как модель не привязана к какому-либо одному уравнению состояния, можно использовать другие уравнения состояния (Тэта, Жаркова – Калинина, Жукова, Джонсона – Кука и т.п.). В процессе счета допускается появление новых свободных поверхностей, в том числе разделяющих рассматриваемые тела на отдельные части [7].

На основе общего подхода к МДТТ в лагранжевой постановке модифицирован численный метод [8]. В расчетную часть метода добавлены алгоритмы расщепления расчетных узлов, разрушения расчетных элементов, расчета контактных поверхностей и т.д. Согласно терминологии [5] метод содержит новый способ выделения поверхностей разрыва сплошности материалов, который не накладывает серьезных ограничений на решение многоконтактных динамических задач МДТТ (задачи расчета динамического нагружения конструкций с большим количеством контактных и свободных границ как находящихся изначально, так образующихся в процессе их деформирования и разрушения). Метод и модель были тщательно апробированы путем проведения внутренних, качественных и количественных тестов [9]. В отдельных случаях проведено сравнение с результатами моделирования других авторов. Разработан некоммерческий программный комплекс для моделирования упомянутых задач в различных постановках. В настоящий момент существует несколько версий программ просмотра и решателей [10].

Последней инновацией следует считать организованную на базе отдела МДТТ мобильную лабораторию «Взрывное разрушение природных материалов». В настоящий момент лаборатория имеет статус инициативного проекта. Наличие данной лаборатории расширяет исследовательские возможности коллектива. Традиционными объектами исследования были природный известняк и пресноводный речной лед, в том числе кожеляционный лед, полученный в искусственных условиях. В качестве ВВ использовались аммонит, гранулит, эмульсионная взрывчатка, а также взрывная смесь на основе этих компонентов. Проведен экспресс-анализ разрушения материалов при взрыве, а именно: морфология разрушения, диаметр, форма взрывного кратера/полыньи, состояние кромки и т.п. Согласно терминологии из [5], результаты можно использовать в качестве теста при апробации метода численного моделирования. Для проведения количественных тестов используется экспериментальная установка с высокоточными приборами регистрации быстропротекающих процессов на базе НИИ ПММ ТГУ. Некоторые эксперименты удалось получить совместно с обществом Практической Стрельбы [11].

Работа была выполнена в рамках Программы повышения конкурентоспособности ТГУ на 2013–2020 годы.

### Литература

1. Paul Hazell *Armour. Materials, Theory and Design* (CRC Press, 2016).
2. Физика взрыва: в 2 т. / под ред. Л.П. Орленко. 3-е изд. перераб. М.: Физматлит. 2002. Т. 1. 832 с.
3. Г.И. Канель [и др.]. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996. 408 с.

4. *Барашков В.Н., Герасимов А.В., Глазырин В.П. и др.* Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. 572 с.
5. *Фомин В.М., Гулидов А.И., Сапожников Г.А. и др.* Высокоскоростное взаимодействие тел. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 600 с.
6. *Orlov M.Yu., Tolkachev V.F., Orlova Yu.N.* Mobile laboratory "Explosive destruction of natural materials: investigation of the behavior of ice and limestone under explosive loading" *Journal of Physics: Conference Series*. 2015. Т. 653, № 1. С. 012038.
7. *Orlov M.Yu., Glazyrin V.P., Orlov Yu.N.* Ballistic performance multilayered plates impacted by 6.1-mm Smk projectile // *Proceedings 8<sup>th</sup> International Conference on Mechanics and Materials in Design, Bologna, Italy, 2019*. Pp. 106–107.
8. *Джонсон Г.Р.* Динамическое поведение осесимметричных тел под действием удара и вращения // *Ракетная техника и космонавтика*. 1975. Т. 17, № 9. С. 58–64.
9. Средства поражения и боеприпасы // под ред. В.В. Селиванова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 982 с.
10. *Глазырин В.П., Орлов Ю.Н., Орлов М.Ю.* Взрыв сглаживание контактной границы. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016663830 от 31.10.2016
11. Официальный сайт Томской региональной общественной организации «Ассоциация практической стрельбы», <http://strelok.tomsk.ru/>

## References

1. Paul Hazell *Armour. Materials, Theory and Design* (CRC Press, 2016)
2. *Explosion Physics*, 3rd ed, edited by L. Orlenko (FizMatLit, Moscow, 2004), Vol. 1, 832 p.
3. *Kanel G., Razorenov S., Utkin A. and Fortov V.* Shock waves in condensed matter (Yanus-K, Moscow, 1996), 407 p.
4. *Teoreticheskiye i eksperimental'nyye issledovaniya vysokoskorostnogo vzaimodeystviya tel*, edited by A. *Gerasimov* (Tomsk State University Press, Tomsk, 2007), 572 p.
5. *Fomin V. et al.* High-speed interaction of bodies (Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia, 1999), 600 p. (in Rus.)
6. *Orlov M.Yu., Tolkachev V.F., Orlova Yu.N.* Mobile laboratory "Explosive destruction of natural materials: investigation of the behavior of ice and limestone under explosive loading" *Journal of Physics: Conference Series*. 2015. Т. 653, № 1. С. 012038.
7. *Orlov M.Yu., Glazyrin V.P., Orlov Yu.N.* Ballistic performance multilayered plates impacted by 6.1-mm Smk projectile // *Proceedings 8<sup>th</sup> International Conference on Mechanics and Materials in Design, Bologna, Italy, 2019*. Pp. 106–107
8. *Johnson G.R.* Analysis of elastic plastic impact involving severe distortion, *Appl. Mech.* 43. Pp. 439–444 (1976)
9. Means of destruction and ammunition, (Ed. Vik. Selivanov), Bauman Moscow Technical University Publishing House, 2008 (in Rus.)
10. *Glazyrin V.P., Orlov Yu.N., Orlov M.Yu.* Explosion smoothing contact border. Certificate of state registration of a computer program No. 201663830 dated 10/31/2016.
11. The official website of the Tomsk regional public organization "Practical Shooting Association", <http://strelok.tomsk.ru/>

**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



# РАСЧЕТ ЗАЖИГАНИЯ И ВЫХОДА НА СТАЦИОНАРНЫЙ РЕЖИМ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА С ДОБАВЛЕНИЕМ ПОРОШКА АЛЮМИНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО ТЕПЛООВОГО ПОТОКА

**Н.С. Абрамова**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
natashaabramova97@mail.ru

**Ключевые слова:** зажигание, металлизированное твердое топливо, тепловой поток, задержка зажигания, стационарный режим горения.

**Аннотация.** В работе решается задача зажигания и выхода на стационарный режим горения твердого ракетного топлива с добавкой порошка алюминия под действием внешнего теплового потока. Исследовано влияние мощности и времени воздействия внешнего теплового потока на характеристики зажигания и выхода на стационарный режим горения металлизированного твердого топлива.

## CALCULATION OF IGNITION AND STEADY-STATE COMBUSTION OF SOLID ROCKET PROPELLANT WITH THE ADDITION OF ALUMINUM POWDER UNDER THE ACTION OF EXTERNAL HEAT FLOW

**N. Abramova**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
natashaabramova97@mail.ru

**Keywords:** ignition, metallized solid propellant, heat flow, ignition delay, stationary combustion mode.

**Abstract.** The paper present solves the problem of ignition and entering the stationary combustion mode of solid rocket fuel with the addition of aluminum powder under the action of an external heat flow. The influence of the power and time of the heat flow on the characteristics of ignition and the output of a stationary combustion mode of metallized solid fuel is studied.

Добавки порошков металлов в состав твердого топлива существенно изменяют характеристики его зажигания и горения [1–4]. Изучению процессов горения твердых топлив с добавками частиц алюминия посвящено много работ, что объясняется высокой практической значимостью исследований и полученных результатов.

В работе представлена физико-математическая модель зажигания и выхода на стационарный режим горения высокоэнергетического материала (ВЭМ) с добавкой порошка металла под воздействием внешнего теплового потока [5]. В работе рассматриваются одномерные нестационарные

процессы при зажигании и горении металлизированного твердого топлива, с предположением, что в твердом топливе при нагреве идут химические реакции, продуктами которых является газ. При достижении глубины превращения 0.99, газообразные продукты разложения высвобождаются. Предполагается, что первый порядок реакции и зависимость ее скорости от температуры определяется по закону Аррениуса. Теплофизические характеристики твердой фазы (плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности) не зависят от температуры и определяются компонентным составом твердого топлива. В газовой фазе протекает экзотермическая химическая реакция первого порядка по закону Аррениуса, конвекции и диффузии реагентов. Частицы алюминия в составе твердого топлива представляют собой шарики, равномерно распределенные в объеме топлива. Процессы агломерации порошка алюминия на поверхности горения не рассматриваются. Для решения задачи была использована математическая модель и методика расчета, описанная в [5]. Расчеты проводились при давлении 100 атм и массовой долей алюминия в составе топлива  $\alpha = 0.09$ . Значения формально-кинетических параметров были приняты для пороха Н:  $\lambda_1 = 0.25$  Вт/(м·К),  $\lambda_{2,0} = 0.066$  Вт/(м·К),  $Q_1 = 556800$  Дж/кг,  $Q_2 = 2435300$  Дж/кг,  $Q_{Al} = 36.51 \cdot 10^6$  Дж/кг,  $E_1 = 80000$  Дж/моль,  $E_2 = 186107$  Дж/моль,  $k_1 = 2 \cdot 10^9$  с<sup>-1</sup>,  $k_2 = 3.92 \cdot 10^{10}$  с<sup>-1</sup>,  $k_{Al} = 2.22 \cdot 10^{-5}$  м<sup>1.5</sup>/с,  $a = 0.5$ ,  $c_1 = 1465$  Дж/(кг·К),  $c_2 = 1466$  Дж/(кг·К),  $c_3 = 760$  Дж/(кг·К),  $\rho_1 = 1600$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_k = 2600$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{Al} = 2600$  кг/м<sup>3</sup>,  $R = 8.31$  Дж/(моль·К),  $T_0 = 293$  К,  $T_{ig} = 1300$  К. Коэффициент диффузии вычисляется через число Льюиса:  $D_2 = Le \lambda_2 / (c_2 \rho_2)$ , число Льюиса принято  $Le = 1$ . Температура воспламенения частиц алюминия принята равной 1300 К.

Практический интерес представляет исследование вопроса о влиянии мощности теплового потока на временные характеристики процесса зажигания и выхода на стационарный режим горения. Под действием теплового потока твердое топливо проходит стадии: «инертного прогрева» и начала газификации твердого топлива; выхода на стационарный режим горения под действием внешнего теплового потока; «индукционного периода», который длится с момента отключения теплового потока до выхода на стационарный режим горения за счет теплового потока из газа к поверхности твердого топлива и стационарный режим горения при заданном давлении. Результаты зависимости минимального времени воздействия теплового потока и его мощности, необходимых для зажигания и выхода на стационарный режим горения металлизированного твердого топлива при разных начальных температурах 243, 263, 273, 293 и 308 К, представлены на *рис. 1*.

На *рис. 1* показана кривая зависимости минимального времени зажигания от мощности теплового потока при  $P=100$  атм для пяти начальных

температур. Выше кривой - выходит на стационарный режим горения, ниже – не выходит.

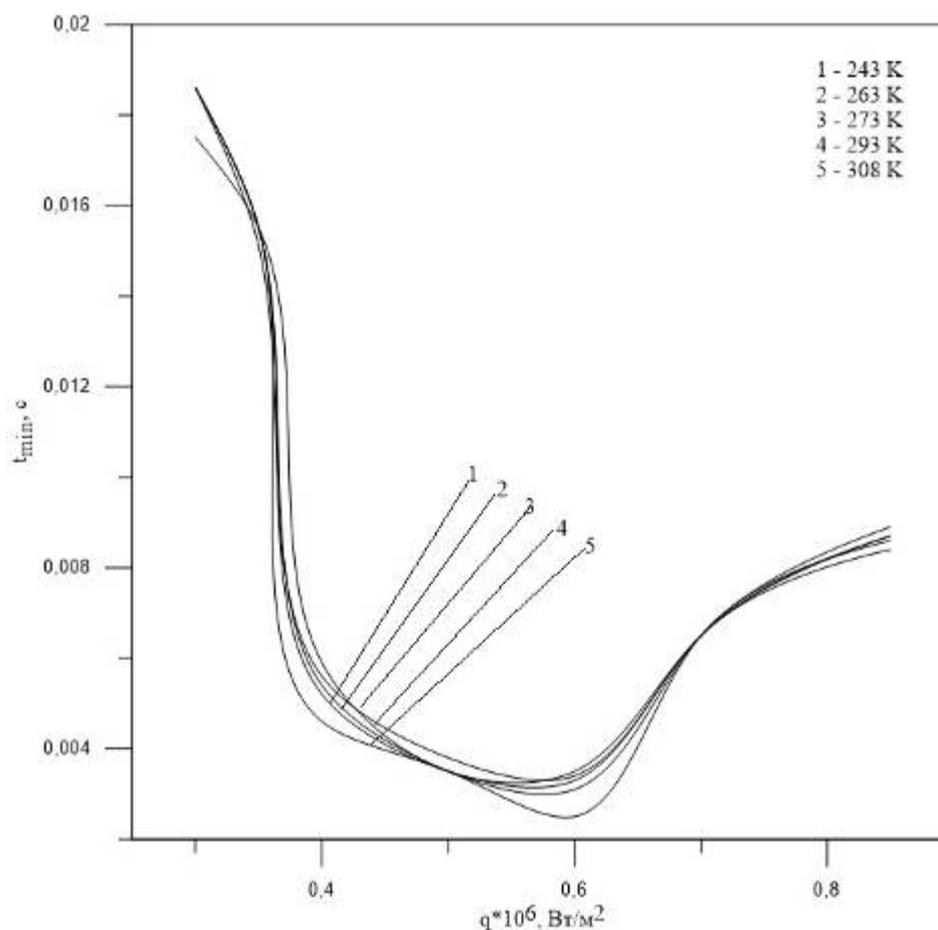


Рис. 1. Зависимость минимального времени зажигания от мощности теплового потока при  $P=100$  атм для пяти начальных температур

В работе представлены разработанная математическая модель, методика и результаты расчета задачи зажигания металлизированного твердого топлива внешним тепловым потоком при различных начальных температурах. Проведен расчетно-теоретический анализ влияния добавок порошка алюминия на характеристики зажигания металлизированных твердых топлив. Исследовано влияние мощности и времени теплового потока на характеристики зажигания металлизированного твердого топлива.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ мол\_а 18-38-00533.

### Литература

1. Похил П.Ф. Горение порошкообразных металлов в активных средах / П.Ф. Похил [и др.]. М.: Наука, 1972.
2. Мальцев В.М. Основные характеристики горения / В.М. Мальцев, М.И. Мальцев, Л.Я. Кашпоров. М.: Химия, 1977.

3. *Архипов В.А., Бондарчук С.С., Коротких А.Г., Кузнецов В.Т., Громов А.А., Волков С.А., Ревагин Л.Н.* Влияние дисперсности алюминия на характеристики зажигания и нестационарного горения гетерогенных конденсированных систем // *Физика горения и взрыва*. 2012. Т. 48, № 5. С. 148–159.

4. *Порязов В.А.* Влияние дисперсности частиц алюминия на скорость горения металлизированных смесевых твердых топлив // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2015. № 1. С. 96–104.

5. *Порязов В.А.* Расчет режимов зажигания и выхода на стационарный режим горения металлизированного твердого ракетного топлива под действием лазерного излучения / В.А. Порязов, А.Ю. Крайнов // *Вестник ТГУ: Математика и механика*. 2019. № 59. С. 94–104.

## References

1. *Pohil P.F.* Combustion of powdered metals in active media/ P.F. Pohil [et al.]. М.: Наука, 1972. (Rus.)

2. *Maltsev V.M.* Main characteristics of combustion / V. M. Maltsev, M.I. Maltsev, L.Ya. Kashporov. Moskva: Himiya, 1977. (Rus.)

3. *Arkhipov V.A., Bondarchuk S.S., Kuznetsov V.T., Korotkikh A.G., Gromov A.A., Volkov S.A., Revyagin L.N* (2012) Influence of aluminum particle size on ignition and nonstationary combustion of heterogeneous condensed systems. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 48(5). Pp. 625–635.

4. *Poryazov V.A.* The effect of dispersion of aluminum particles on the burning rate of metallized solid propellants / V.A. Poryazov, A.Yu. Krainov // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta: Matematika i mehanika*. 2015. No. 1. Pp. 96–104. (Rus.).

5. *Poryazov V.A.* Calculation of ignition modes and output to a stationary mode of combustion metallized solid rocket fuel under the action of laser radiation / V.A. Poryazov, A.Yu. Krainov // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta: Matematika i mehanika*. 2019. No. 59. Pp. 94–104. (Rus.).

## ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ ЧАСТИЦ ТИТАНА И АЛЮМИНИЯ

**Н.С. Белоусова<sup>1,2</sup>, О.Г. Глозов<sup>1,2</sup>, А.В. Гуськов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет, Россия

<sup>2</sup>Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН  
nata.bel.94@mail.ru

**Ключевые слова:** частицы титана, агломераты алюминия, горение в воздухе, фрагментация, движение частиц, продукты горения.

**Аннотация.** Проведено исследование горения монолитных частиц титана и агломератов алюминия диаметром 250–600 мкм 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.

# FEATURES OF COMBUSTION OF PARTICLES TITANIUM AND ALUMINUM

N. Belousova<sup>1,2</sup>, O. Glotov<sup>1,2</sup>, A. Guskov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, Russia

<sup>2</sup>Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation  
nata.bel.94@mail.ru

**Keywords:** titanium particles, aluminum agglomerates, burning in the air, fragmentation, particle motion, combustion products.

**Abstract.** The study of monolithic titanium particles and aluminum agglomerates combustion with a diameter of 250–600 microns in free fall in air was carried out. With the help of video recording, the burning times of the particle, the times of the beginning and end of fragmentation were found. The laws of particle motion, in particular, their speed and coordinate at the moment of the beginning of fragmentation were determined.

Алюминий и титан являются самыми распространенными конструкционными материалами [1, 2], которые применяются во многих технических объектах. Оба металла являются пирофорными, высококалорийными материалами, что обуславливает большой интерес к изучению процессов горения этих металлов и их соединений. Для более полного понимания процесса горения частиц этих металлов, необходимо знать особенности параметров горения и фрагментации каждого.

Методика проведения экспериментов заключалась в следующем:

– использовался образец, состоящий из безметального топлива матрицы, в который помещалось определённое количество частиц (титановые включения или алюминиевые агломераты);

– образец наносился на кварцевую трубку (она играла роль держателя образца) диаметром 12 мм. Размеры матрицы W×L×H примерно 3×30×2 мм. В волне горения матрицы каждый фрагмент превращается в горящую частицу-агломерат. Дальнейшее горение частиц происходит в воздухе [3, 4]. Способы обработки экспериментов были в основном аналогичны методике [4, 6].

В результате, с помощью использования подхода «модельных монодисперсных агломератов», исследовано горение крупных алюминиевых агломератов и монолитных материнских частиц титана диаметром 250–600 мкм при свободном падении в воздухе.

Для частиц титана были определены характерные времена начала фрагментации, окончания фрагментации, окончания горения, закономерности движения частиц, в частности, их скорость и координата в момент начала фрагментации. Оценен размер частиц, при котором изменяется режим

фрагментации («звезда» → «еловая ветвь»). Отобраны и исследованы конденсированные продукты горения частиц (рис. 1, а).

Для агломератов алюминия аналогичным образом были определены времена горения агломератов, размер, масса и плотность финальных частиц-остатков. Также получены данные о фрагментации горящих Al-агломератов (временные параметры процесса и доля фрагментирующих агломератов). На дистанции падения около 3 м агломераты алюминия, сгорая, формировали остаток в виде крупной частицы оксида сферической формы с диаметром 400–600 мкм (рис. 1, б).

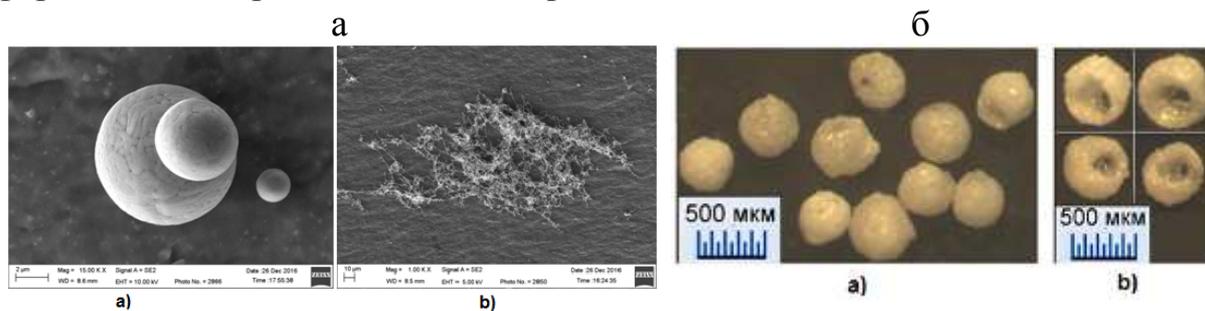


Рис. 1, а. Продукты горения частиц титана  
*a* – сферические остатки материнских частиц с размерами до сотен микрон (в случае фрагментации вида еловая ветвь); *b* – сферические частицы оксида с размерами единиц-десятков микрон

Рис. 1, б. Частицы-остатки горения двух морфологических типов  
*a* – оксидные частицы без видимых вкраплений металла; *b* – оксидные частицы с лунками и/или вкраплениями металла

Таким образом, в результате проделанной работы, были выявлены основные закономерности горения в свободном падении крупных алюминиевых агломератов и монолитных частиц титана. Были определены характерные времена горения, типы и условия фрагментации горящих металлических частиц, а также проведен анализ продуктов горения.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 19-03-00294).

### Литература

1. *Зубков Л.Б.* Космический металл. Все о титане. М.: Наука, 1987. 129 с.
2. *Шидловский А.А.* Основы пиротехники. М.: Машиностроение, 1973. 280 с.
3. *Белюсова Н.С., Глотов О.Г., Гуськов А.В.* Исследование траектории свободного падения частиц при горении монолитных частиц титана // Материалы Всероссийской молодежной научной конференции «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики», Томск, 26–28 ноября 2018 г. Томск: Красное знамя, 2019. С. 42–44.

### References

1. *Zubkov L.B.* Space A.V. metal. All about titanium. M.: Nauka, 1987. 129 p.
2. *Shidlovsky A.A.* Fundamentals of pyrotechnics. M.: Engineering, 1973. 280 p.

3. *Belousova N.S., Glotov O.G., Guskov A.V.* Study of the free falling particles trajectory at the burning monolithic titanium particles // Materials of the All-Russian Youth Scientific Conference «Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics», Tomsk, November 26–28, 2018 Tomsk: Krasnoye znamya, 2019. Pp. 42–44.

## **ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОРОХА И НА УСЛОВИЯ ЗАЖИГАНИЯ ВНЕШНИМ ТЕПЛОВЫМ ПОТОКОМ**

**А.А. Блохина**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
bloxinaanny@yandex.ru

**Ключевые слова:** математическая модель, зажигание, переходные процессы, твердое топливо, порох Н.

**Аннотация.** В работе представлена математическая модель и методика решения задачи зажигания и выхода на стационарный режим горения конденсированного высокоэнергетического вещества под действием внешнего теплового потока. Проведены тестовые расчеты зажигания и выхода на стационарный режим горения. Проведено исследование влияния начальной температуры конденсированного высокоэнергетического вещества на характеристики зажигания. Найдены минимальные значения времени и мощности воздействия внешнего теплового потока на поверхность вещества, приводящего к зажиганию и выходу на стационарный режим горения.

## **THE EFFECT OF THE INITIAL TEMPERATURE OF THE N POWDER AT THE CONDITIONS OF IGNITION UNDER EXTERNAL HEAT FLUX**

**A. Blokhina**

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

**Keywords:** mathematical model, ignition, combustion, solid propellant, N powder.

**Abstract.** The paper presents mathematical models and methods for solving the problems of ignition and exit from the stationary combustion regime of condensed high-energy substances under the influence of an external heat flux. Test calculations were carried out using high-energy substances. A study was made of the influence of the initial temperature of a condensed high-energy substance on the ignition characteristics. The found minimum values of time and power of the external heat flux on the surface of the substance, leading to ignition and exit to a stationary combustion mode.

Изучению физико-химических процессов, протекающих при зажигании и горении высокоэнергетических материалов, посвящено много теоретических и экспериментальных работ [1–3], что объясняется высокой практиче-

ской значимостью результатов подобных исследований. Одной из основных задач является определение условий гарантированного зажигания, т.е. устойчивости переходного процесса, когда стадия зажигания сменяется стационарным самоподдерживающимся горением вещества без подвода дополнительной энергии от внешнего источника. В работе представлена физико-математическая модель зажигания и выхода на стационарный режим горения высокоэнергетического материала (ВЭМ) под воздействием внешнего теплового потока [1]. В постановке учитываются физико-химические процессы в конденсированной и газовой фазах. Математическая модель основывается на модели, представленной в работе [2]. Проведено исследование влияния начальной температуры ВЭМ на критические значения времени и мощности воздействия внешнего теплового потока, обеспечивающих зажигание и выход на стационарный режим горения.

В работе рассматриваются одномерные нестационарные процессы при горении конденсированного высокоэнергетического материала (ВЭМ). Предполагается, что в ВЭМ при нагревании идут химические реакции, продуктами которых является газ. Газообразные продукты разложения высвобождаются на последней стадии реакции по достижении глубины превращения 0.99. Порядок реакции и зависимость ее скорости от температуры определяется по закону Аррениуса. Теплофизические характеристики твердой фазы – плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности не зависят от температуры и определяются компонентным составом твердого топлива.

Расчеты проводились для значений теплофизических и формально-кинетических параметров, характерных для пороха Н:  $\lambda_1 = 0.25 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ,  $\lambda_2 = 0.066 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ,  $Q_1 = 556800 \text{ Дж}/\text{кг}$ ,  $Q_2 = 2435300 \text{ Дж}/\text{кг}$ ,  $E_1 = 80000 \text{ Дж}/\text{моль}$ ,  $E_2 = 186107 \text{ Дж}/\text{моль}$ ,  $k_1 = 2 \cdot 10^9 \text{ 1}/\text{с}$ ,  $k_2 = 3.92 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$ ,  $c_1 = 1465 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ,  $c_2 = 1466 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ,  $\rho_1 = 1600 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $R = 8.31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ ,  $T_0 = 293 \text{ К}$ . Коэффициент диффузии вычисляется через число Льюиса  $Le$ :  $D_2 = Le \lambda_2 / (c_2 \rho_2)$ , число Льюиса принято  $Le = 1$ .

Полученные кривые зависимостей минимального времени воздействия теплового потока от мощности теплового потока, необходимые для зажигания и выхода на стационарный режим горения пороха Н, приведены на рис. 1, при температурах равных 243К (кривая 1), 263К (кривая 2), 273К (кривая 3), 293К (кривая 4) и 308К (кривая 5). Расчеты проводились при давлении 100 атм. Наглядно видно, что ниже приведенных кривых выхода на стационарный режим горения происходить не будет, а выше данных кривых гарантированно будет происходить зажигание с последующим выходом на стационарный режим горения.

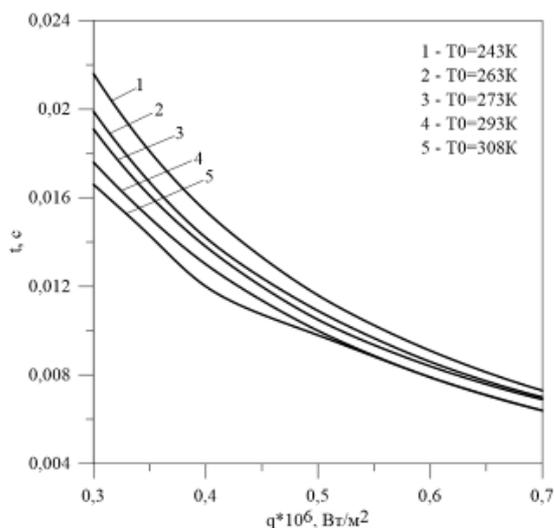


Рис. 1. Зависимости минимального времени зажигания от мощности теплового потока при  $P=100$  атм

Из рис. 1 видно, что чем выше начальная температура пороха  $H$ , тем меньшее время и мощность теплового потока необходимы для стационарного режима горения. Установлено, что минимальные значения времени воздействия и мощности внешнего теплового потока, необходимые для выхода на стационарный режим горения, линейно зависят от начальной температуры.

Показано, что предложенный подход применим для расчета параметров зажигания конденсированного высокоэнергетического вещества.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ мол\_а 18-38-00533.

### Литература

1. Гусаченко Л.К., Зарко В.Е., Рычков А.Д. Зажигание и гашение гомогенных энергетических материалов световым импульсом // Физика горения и взрыва. 2012. Т. 48, № 1. С. 80–88.
2. Князева А.Г., Буркина Р.С., Вилюнов В.Н. Особенности очагового теплового воспламенения при различных начальных распределениях температуры // Физика горения и взрыва. 1988. № 3. С. 45–47.
3. Князева А.Г. Приближенные оценки характеристик зажигания топлива лучистым потоком через преграду с различными свойствами // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 1. С. 26–41.
4. Порязов В.А., Крайнов А.Ю. Расчет режимов зажигания и выхода на стационарный режим горения металлизированного твердого ракетного топлива под действием лазерного излучения // Вестн Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2019. № 59. С. 94–104. DOI: 10.17223/19988621/59/10
5. Крайнов А.Ю., Порязов В.А. Численное моделирование погасания пороха  $H$  при резком сбросе давления на основе сопряженной модели горения // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51, № 6. С. 47–52.

### References

1. Gusachenko L.K., Zarko V.E., Rychkov A.D. (2012) Ignition and extinction of homogeneous energetic materials by a light pulse // Combustion, Explosion and Shock Waves. 48(1). Pp. 73–80. DOI: 10.1007/BF00748915

2. *Knyazeva A.G., Burkina R.S., Vilyunov V.N.* (1988) Characteristics of local thermal ignition with various initial temperature distributions // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 24(3). Pp. 303–305. DOI: 10.1007/BF00750611

3. *Knyazeva A.G.* (1996) Approximate estimates of the characteristics of propellant ignition using radiant flux through shields with various properties // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 32(1). Pp. 22–35. DOI: 10.1134/S0010508212050115

4. *Poryazov V.A., Krainov A.Yu.* Calculation of the ignition stages and steady-state combustion of a metallized solid propellant under laser radiation // *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta, Matematika i Mekhanika*. 2019. No. 59. Pp. 94–104. DOI: 10.17223/19988621/59/10

5. *Krainov, A.Y., Poryazov, V.A.* (2015). Numerical simulation of the extinction of N powder by a pressure drop based on a coupled combustion model. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 51(6), 664–669. doi:10.1134/S0010508215060076

## РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ ЗАЖИГАНИЯ МЕТАЛЛИЗИРОВАННОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА ПРИ ЗАЖИГАНИИ КОНВЕКТИВНЫМ ПОТОКОМ

**В.Л. Гойко, В.А. Порязов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
goiko@data.tsu.ru

**Ключевые слова:** зажигание, горение, высокотемпературный поток, конвективный поток, конденсированное высокоэнергетическое вещество.

**Аннотация.** Представлены математическая модель и методика расчета задержки зажигания металлизированного твердого топлива конвективным высокотемпературным потоком. В постановке рассматривается зажигание полубесконечной пластины металлизированного твердого топлива неограниченным обдувающим высокотемпературным потоком. Модель учитывает влияние эффекта обдува высокотемпературным потоком через турбулентный теплоперенос.

## IGNITION DELAY TIME OF METALLIZED SOLID PROPELLANT IGNITED BY A CONVECTIVE FLOW

**V.L. Goiko, V.A. Poryazov**

National research Tomsk State University, Russian Federation  
goiko@data.tsu.ru

**Keywords:** the ignition, high-temperature flow, condensed high-energy substance, convective flow.

**Abstract.** This paper presents a mathematical model and methodology to calculate the time of ignited by a convective high-temperature flow of a metallized solid propellant with aluminum additives. The study investigates the ignition of a semi-infinite slab of the metal-

lized solid propellant blown by an unlimited high-temperature flow. We have used the boundary-layer approximation to construct the ignition model and the effect of the high-temperature blowing is taken into account by the turbulent heat and mass transfer.

Целью работы является разработка методики численного расчета задержки зажигания металлизированного твердого топлива под действием высокотемпературного конвективного потока.

На основе нестационарной модели горения металлизированного твердого топлива в сопряженной постановке [1] и модели эрозионного горения металлизированного твердого топлива [2] построена модель зажигания и выхода на стационарный режим горения металлизированного твердого топлива под действием высокотемпературного конвективного потока.

В твердом топливе при нагреве идут химические реакции, полупродуктами которых является газ. Газообразные продукты разложения высвобождаются на последней стадии реакции. Теплофизические характеристики твердой фазы не зависят от температуры и определяются компонентным составом твердого топлива, путем осреднения. Над поверхностью топлива записываются уравнения течения двухфазной реагирующей среды, учитывающие межфазный обмен импульсом и энергией, конвективный и кондуктивный теплоперенос, зависимость коэффициентов переноса от температуры и интенсивности турбулентности.

Для описания характеристик динамической турбулентности в пограничном слое использовалась модель турбулентности Ван-Дрифта [3], являющаяся обобщением результатов экспериментов и широко распространенной в инженерных расчетах, так как справедлива во всей внутренней части пограничного слоя [4, 5]. Расчеты проводились для формально-кинетических параметров, характерных для пороха Н,  $P = 6$  МПа,  $\alpha_{Al} = 0.09$ ,  $r_{Al,0} = 5$  мкм. Результаты расчетов задержки времени зажигания для различных значений скорости и температуры обдувающего потока представлены на *рис. 1*.

В твердом топливе при нагреве идут химические реакции, полупродуктами которых является газ. Газообразные продукты разложения высвобождаются на последней стадии реакции. Теплофизические характеристики твердой фазы не зависят от температуры и определяются компонентным составом твердого топлива, путем осреднения. Над поверхностью топлива записываются уравнения течения двухфазной реагирующей среды, учитывающие межфазный обмен импульсом и энергией, конвективный и кондуктивный теплоперенос, зависимость коэффициентов переноса от температуры и интенсивности турбулентности. Для описания характеристик динамической турбулентности в пограничном слое использовалась модель турбулентности Ван-Дрифта [3], являющаяся обобщением результатов экспериментов и широко распространенной в инженерных расчетах, так как справедлива во всей внутренней части пограничного слоя [4, 5].

Расчеты проводились для формально-кинетических параметров, характерных для пороха Н,  $P = 6$  МПа,  $\alpha_{Al} = 0.09$ ,  $r_{Al,0} = 5$  мкм.

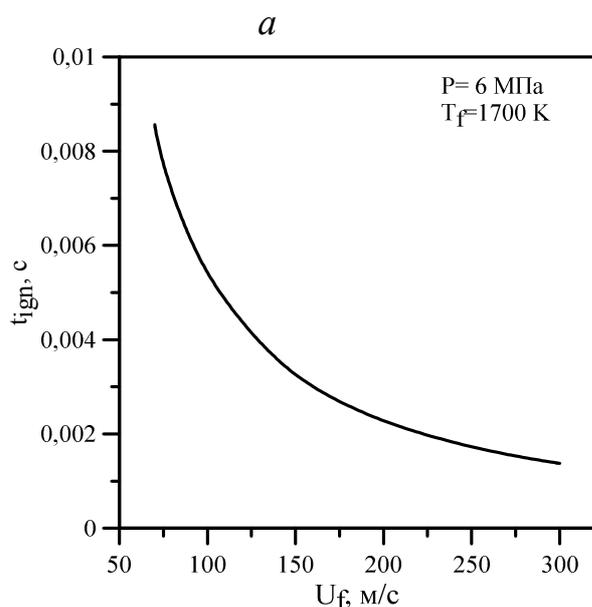


Рис. 1, а. Зависимость времени задержки зажигания пороха Н с добавлением порошка алюминия от температуры обдувающего высокотемпературного потока.

$T_f = 1700$  К,  $r_{Al,0} = 5$  мкм,  $\alpha_{Al} = 0.09$ ,  
 $P = 6$  МПа

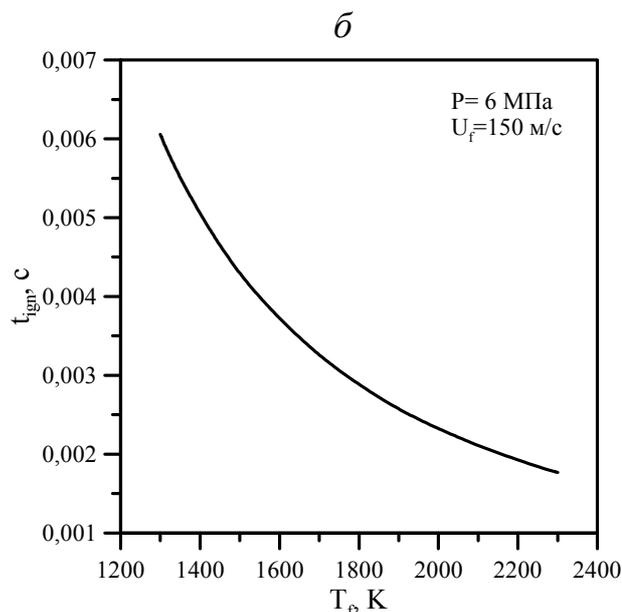


Рис. 1, б. Зависимость времени задержки зажигания пороха Н с добавлением порошка алюминия от температуры обдувающего высокотемпературного потока.  $U_f = 150$  м/с,

$r_{Al,0} = 5$  мкм,  $\alpha_{Al} = 0.09$ ,  $P = 6$  МПа

В рамках представленной модели и методики решения системы уравнений математической модели проведен расчетно-теоретический анализ влияния скорости и температуры обдувающего потока на время задержки зажигания металлизированного твердого топлива.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ мол\_а 18-38-00533.

## Литература

1. Порязов В.А., Крайнов А.Ю. Математическая модель и расчет нестационарной скорости горения металлизированных твердых ракетных топлив // Вестн Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2017. № 50. С. 99–111.
2. Порязов В.А., Крайнов Д.А. Математическое моделирование эрозионного горения металлизированных твердых топлив // Вестн Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2019. № 58. С. 119–127.
3. Driest E.R. van On turbulent flow near a wall // AIAA Journal Special Supplement: Centennial of Power Flight. Vol. 23, No. 11, 1956. Pp. 1007–1011. <https://doi.org/10.2514/8.3713>
4. Булгаков В.К., Липанов А.М. Теория эрозионного горения твердых ракетных топлив. М.: Наука, 2001. 138 с.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 714 с.

## References

1. Poryazov V.A., Krainov A.Yu. (2017) Matematicheskaya model' i raschet nestatsionarnoy skorosti goreniya metallizirovannykh tverdykh raketnykh topliv [Mathematical model and calculation of the unsteady combustion rate of the metallized solid rocket propellants]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, Matematika i mekhanika – Tomsk State University // Journal of Mathematics and Mechanics. 50. pp. 99–111. DOI: 10.17223/19988621/50/9.
2. Poryazov V.A., Krainov D.A. (2019) Matematicheskaya model' erosiionnogo goreniya metallizirovannykh tverdykh topliv [Mathematical modeling of the erosive burning of metallized solid propellants]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics. 58. Pp. 119–127. DOI: 10.17223/19988621/58/10.
3. Driest E.R. van. On turbulent flow near a wall (1956) // AIAA Journal Special Supplement: Centennial of Power Flight. 23(11). Pp. 1007-1011. <https://doi.org/10.2514/8.3713>.
4. Bulgakov V.K. and Lipanov A.M. (2001) Theory of Erosive Combustion of Solid Rocket Propellants. Moscow: Nauka.
5. Schlichting H., Gersten K. (2004) Boundary Layer Theory, 8th ed. Springer-Verlag. ISBN 81-8128-121-7.

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ

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

Новосибирский государственный технический университет; Россия  
grifkatia@gmail.com

**Ключевые слова:** кумуляция, размер зерна, кумулятивная струя, кумулятивная облицовка.

**Аннотация.** Анализируются возможности и проблемы применения численного моделирования в современных исследованиях процесса кумуляции. Предлагается выделение оцениваемых параметров в момент формирования кумулятивной струи как способа сокращения ресурсоемкости расчетов. Проводится исследование влияния микроструктуры материала кумулятивной облицовки (среднего размера зерна меди) на эффективность струеобразования за счет выделяемых параметров: угла между приведенным вектором скорости головной части струи и осью заряда  $\gamma$  и угла схлопывания кумулятивной облицовки  $\gamma'$ . Получаемые результаты коррелируют с известными данными, полученными другими способами, что подтверждает перспективность выделяемого направления.

# PROSPECTIVE METHODS OF INVESTIGATION OF THE FUNCTIONING OF CUMULATIVE CHARGES

E. Grif, A. Guskov, K. Milevskii

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

**Keywords:** cumulation, grain size, shaped-charge jet, shaped-charge lining.

**Abstract.** The possibilities and problems of applying numerical modeling in modern studies of the cumulation process are analyzed. It is proposed to isolate the estimated parameters at the time of formation of the cumulative jet as a way to reduce the resource consumption of the calculations. A study is made of the influence of the microstructure of the material of the cumulative lining (the average grain size of copper) on the efficiency of jet formation due to the distinguished parameters: the angle between the reduced velocity vector of the head of the jet and the axis of the charge  $\gamma$  and the angle of collapse of the cumulative lining  $\gamma'$ . The results obtained correlate with the known data obtained by other methods, which confirms the promising nature of the identified area.

Термин «кумуляция» происходит от лат. *cumulate* – скопление или *cumulo* – накапливаю и дословно означает увеличение или усиление какого-либо эффекта за счет сложения или накопления нескольких однородных с ним эффектов. Особенностью проводимых современных исследований процесса кумуляции является применение численного моделирования. Расчеты функционирования кумулятивных зарядов (КЗ) расширяют возможности исследователей как за счет уменьшения необходимых для проведения численных экспериментов материально-технических ресурсов, так и за счет широкого спектра получаемых в ходе численных расчетов выходных данных.

Зачастую при численных исследованиях функционирования КЗ оцениваемым параметром является глубина пробития преграды кумулятивной струей (КС). Устанавливается связь между исследуемым (оптимизируемым) параметром КЗ, преграды или окружающей среды и получаемой глубиной пробития, на основании которой выявляются исследуемые закономерности (определяется оптимальное значение исследуемого параметра).

Несмотря на свою популярность, подобный подход имеет существенные недостатки. Во-первых, он ограничивает исследователя в рамках конкретной задачи: получаемые результаты напрямую зависят от таких нюансов постановки задачи, как особенности описания математической модели окружающей среды, преграды и элементов КЗ, правильности подбора фокусного расстояния КЗ (более того, существует ряд задач, где соблюдение фокусного расстояния невозможно) и т.п. Во-вторых, подобный подход подразумевает выбор расчетных областей большой длины (КС способна растягиваться более чем в 10 раз). Так как шаг расчетной сетки при моде-

лировании кумуляции обычно составляет порядка 100–250 мкм, необходимость моделирования процесса на больших расчетных областях влечет за собой огромные вычислительные затраты.

Целью работы является создание универсальной методики оценки результатов численного моделирования функционирования кумулятивных зарядов. Эта цель предусматривает решение ряда задач: патентно-информационный обзор научно-технической литературы, выделения оптимальных параметров оценки эффективности протекания процесса кумуляции, проведения численного эксперимента функционирования кумулятивного заряда и анализа полученных результатов численного моделирования по предлагаемой методике.

Возможности современных сред моделирования позволяют применять иные подходы при проведении исследований. Например, выделение оцениваемых параметров в момент формирования КС позволяет минимизировать отмеченные выше недостатки. Обычно при оценке эффективности струеобразования выделяют параметры длины формируемой струи и скорости движения ее головной части. Однако в первом случае сохраняется проблема ресурсоемкости расчета, а во втором – получаемые результаты сами по себе не дают сделать наглядных выводов.

Разработки по совершенствованию КЗ ведутся научно-техническим сообществом по следующим направлениям: оптимизация размеров и формы КЗ, формы, геометрии и материала кумулятивной облицовки (КО); повышение качества, энергосодержания, плотности и скорости детонации взрывчатого вещества; установка линзового узла; правильный подбор фокусного расстояния для заряда и повышение точности изготовления деталей заряда и их сборки [1]. Рассмотрим возможности применения в исследованиях современных сред моделирования на одном из вышеперечисленных направлений – совершенствованию материала КО.

Известный факт: при уменьшении размера зерна металла КО, однородности его среднего диаметра, формы и ориентации растет пробивающая способность КЗ. Исследования связи микроструктуры и поведения металла кумулятивных облицовок обычно проводятся экспериментально, и лишь их результаты обрабатываются с помощью программно-вычислительных комплексов, так как строгое и полное описание поведения реальных металлов при деформировании вызывает определенные трудности.

В физике пластичности и прочности металлов хорошо известно явление зернограничного скольжения – смещение одного кристаллита относительно другого вдоль общей границы [2]. Физическая мезомеханика [3] рассматривает зернограничное скольжение и внутрeзеренную дислокационную деформацию на различных структурно-масштабных уровнях: границы зерен в поликристаллах классифицируются не как дефект микромасштабного уровня, а как самостоятельная 2-D подсистема мезомасштабного уровня [4]. Воспользовавшись подобным допущением, в среде моделиро-

вания высокоскоростных нелинейных динамических процессов Ansys Autodyn можно провести численный эксперимент функционирования осесимметричного кумулятивного заряда с облицовкой конического типа для трех вариантов назначенных шагов расчетных сеток – трех размеров ячеек-зерен – для выявления предполагаемой связи между средним размером зерна металла и упорядоченностью его пластического течения – кинематикой процесса струеобразования [5].

Задача ставится в 2-D пространстве, симметрия – аксиальная, верхняя и боковые границы – открытые. Основные уравнения решаются с применением метода Эйлера. Шаг расчетной сетки задается в 125, 250 и 500 мкм, исходя разумной точности расчета и вычислительных затрат. Выделяется два критерия, свидетельствующих о том, что процесс струеобразования идет с минимальными потерями. Во-первых, эффективность пластической деформации: направленность движения большей части ячеек-зерен, формирующих струю в данный момент, должна соответствовать направлению, параллельному главной оси симметрии заряда: угол между приведенным вектором скорости головной части струи и осью заряда  $\gamma$  должен быть близок к  $0^\circ$ . Во-вторых, эффективность пластического деформирования: величина угла схлопывания кумулятивной облицовки  $\gamma'$ : очевидно, что при больших  $\gamma'$  происходит размывание уже сформировавшейся части кумулятивной струи. Схема оценки эффективности протекания процесса представлена на *рис. 1*.

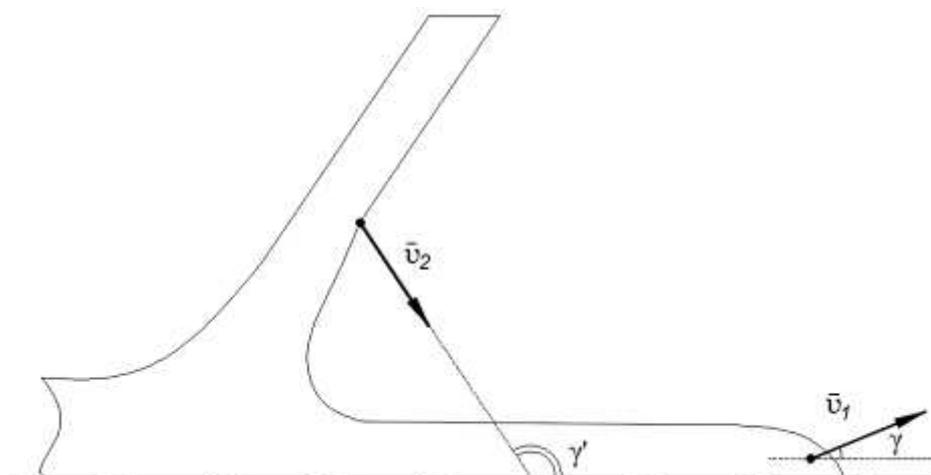


Рис. 1. Схема оценки эффективности протекания процесса

По результатам численного эксперимента при дроблении расчетной сетки (зерна металла) угол между приведенным вектором скорости головной части струи и осью заряда составил  $\gamma(500)=0.8^\circ$ ,  $\gamma(250)=0.2^\circ$ ,  $\gamma(125)=0^\circ$ , а величина угла схлопывания кумулятивной облицовки  $\gamma'$  – соответственно,  $\gamma'(500)=160^\circ$ ,  $\gamma'(250)=154^\circ$ ,  $\gamma'(125)=151^\circ$ .

Действительно: проводимые численные расчеты функционирования КЗ расширяют возможности исследователей как за счет уменьшения необходимых материально-технических ресурсов, так и за счет широкого спектра получаемых в ходе численных расчетов выходных данных. Например, выделение оцениваемых параметров в момент формирования КС – отражающего эффективность пластической деформации угла между приведенным вектором скорости головной части струи и осью заряда  $\gamma$  и отражающего эффективность пластического деформирования угла схлопывания кумулятивной облицовки  $\gamma'$  при исследовании влияния микроструктуры материала кумулятивной облицовки – среднего размера зерна меди – на эффективность струеобразования позволило значительно сократить вычислительные затраты за счет отсутствия необходимости в расчете задачи на больших расчетных областях, а полученные результаты коррелируют с известными данными.

### Литература

1. Физика взрыва: в 2 т. Т. 2 / под ред. Л.П. Орленко. 3-е изд., испр. М.: Физматлит, 2004. 656 с.
2. Панин В.Е. Физическая мезомеханика зернограничного скольжения в деформируемом поликристалле / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, Т.Ф. Елсукова // Физ. мезомеханика. 2011. № 6. С. 15–22.
3. Meyers M.A. Mechanical Metallurgy: Principles and Applications / M.A. Meyers, K.K. Chawla. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1984. Pp. 688–731.
4. Панин В.Е. Деформируемое твердое тело как нелинейная иерархически организованная система / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин // Физ. мезомеханика. 2011. Т. 14, № 3. С. 7–26. DOI: 10.1016/j.physme.2011.12.002
5. Гуськов А.В. Влияние микроструктуры металла на процесс струеобразования = Influence of the metal microstructure on the jet formation process / А.В. Гуськов, К.Е. Милевский, Е.М. Гриф // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Машиностроение. 2019. Т. 19, № 4. С. 28–38.

### References

1. Orlenko L.P. (Ed.) Fizika vzryva [Explosion Physics]. Moscow, 2004. 656 p.
2. Panin V.E., Egorushkin V.E., Yelsukova T.F. [Physical Mesomechanics of Grain Boundary Sliding in a Deformable Polycrystal]. Phys. mesomech., 2011, no. 6. Pp. 15–22. (in Rus.)
3. Meyers M.A., Chawla K.K. Mechanical Metallurgy: Principles and Applications. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1984. Pp. 688–731.
4. Panin V.E., Egorushkin V.E. [Deformable Solid as a Nonlinear Hierarchically Organized System]. Phys. Mesomech., 2011. Vol. 14, no. 3. Pp. 7–26. (in Rus.) DOI: 10.1016/j.physme.2011.12.002
5. Guskov A.V. Influence of the metal microstructure on the jet formation process / A.V. Guskov, K.E. Milevsky, E.M. Grif // Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical engineering industry. 2019. Vol. 19, no. 4. S. 28–38. DOI: 10.14529 / engin190404.

# ГОРЕНИЕ ПОРОШКОВ ТИТАНА И ХРОМА В СПУТНОМ ПОТОКЕ АЗОТОСОДЕРЖАЩЕГО ГАЗА

Н.С. Евсеев<sup>1,2</sup>, М.Х. Зиятдинов<sup>1</sup>, В.И. Романдин<sup>1</sup>, А.Б. Толынбеков<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Россия

evseevns@gmail.com

**Ключевые слова:** фильтрационное горение, спутный поток газа, нитрид титана, нитрид хрома.

**Аннотация.** В работе рассмотрена оригинальная установка, позволяющая исследовать горение металлических порошков в спутном течении газа, а также приведены результаты экспериментальных исследований по горению порошков титана и хрома в спутном потоке азотосодержащего газа. Данный способ обладает высокой энергоэффективностью и позволяет получать нитриды без использования высоких давлений. Проведены рентгенофазовые исследования полученных порошков. Установлено, что режим принудительной фильтрации позволяет синтезировать нестехиометрический нитрид хрома Cr<sub>2</sub>N. Содержание азота в полученных образцах Cr<sub>2</sub>N достигало 9.6%. Для образцов TiN содержание азота не превышало 11.5%.

## COMBUSTION OF TITANIUM AND CHROME POWDERS IN THE CO-FLOW OF A NITROGEN CONTAINING GASE

N. Evseev<sup>1,2</sup>, M. Ziatdinov<sup>1</sup>, V. Romandin<sup>1</sup>, A. Tolynbekov<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation

evseevns@gmail.com

**Keywords:** filtration combustion, co-flow of gas, titanium nitride, chromium nitride.

**Abstract.** An original apparatus is presented in the work, which allows one to study the combustion of metal powders in a confined gas flow, and also presents the results of experimental studies on the combustion of titanium and chromium powders in a co-flow of nitrogen-containing gas stream. This method has high energy efficiency and allows you to get nitrides without the use of high pressures. X-ray phase studies of the obtained powders were carried out. It is established that the forced filtration mode allows the synthesis of non-stoichiometric chromium nitride Cr<sub>2</sub>N. The nitrogen content in the obtained Cr<sub>2</sub>N samples reached 9.6%. The nitrogen content in the obtained TiN samples reached 11.5%.

Широкое применение нитридов металлов обусловлено их уникальными физико-химическими свойствами, например, жаропрочность, коррозионная стойкость, износостойкость. Благодаря своим уникальным свойствам, нитриды металлов применяют в качестве абразивных материалов, износо-

стойких и декоративных покрытий, сырья для получения нитридной керамики, легирующих материалов.

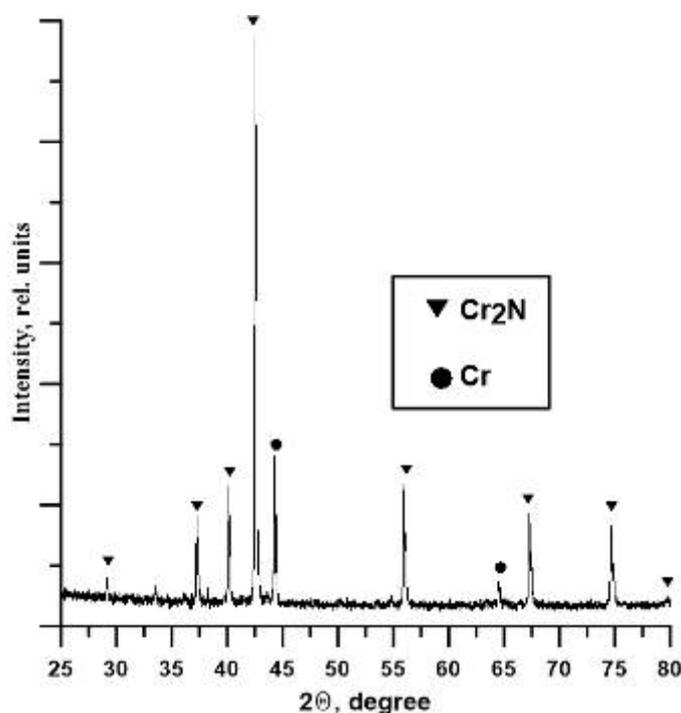
Обычно фильтрационное горение металлических порошков в азоте и самораспространяющийся высокотемпературный синтез нитридов экспериментально исследуются в условиях естественной фильтрации [1], причем поддерживается перепад давления, благодаря которому реакционный газ поставляется в область горения.

В работе рассматривается другой вид фильтрационного горения, при котором реагирующий газ принудительно подводится в зону горения и движется в направлении горения через продукты реакции вслед движущемуся фронту горения [2]. Данный тип горения теоретически изложен достаточно подробно [3], и, одновременно, мало изучен экспериментально [4, 5]. При этом такой способ является энергоэффективным и обладает высокой прикладной значимостью.

Целью работы является изучение закономерностей образования структуры нитридов металлов, получаемых в режиме фильтрационного горения и изучение их свойств.

Созданная оригинальная установка позволяет исследовать горение металлов в среде азотосодержащего газа в режиме спутной фильтрации. В работе приведены результаты экспериментальных исследований по горению порошков титана и хрома в спутном потоке азотосодержащего газа.

Рис. 1. Рентгенограмма образца, полученного в результате горения порошка хрома в проточном реакторе



На *рис. 1* представлена рентгенограмма продукта горения при сжигании хрома в режиме спутной фильтрации. Установлено, что режим принудительной фильтрации позволяет синтезировать нестехиометрический нитрид хрома  $\text{Cr}_2\text{N}$ . Элементный анализ показал, что содержание азота в по-

лученных образцах  $\text{Cr}_2\text{N}$  достигало 9.6%. Для образцов  $\text{TiN}$  содержание азота не превышало 11.5%.

**Заключение.** Экспериментальные исследования проведены на оригинальной установке «Лабораторный проточный СВС-реактор». В работе приведены результаты экспериментальных исследований по горению порошков титана и хрома в режиме спутной фильтрации. Установлено, что режим принудительной фильтрации позволяет синтезировать нестехиометрический нитрид хрома  $\text{Cr}_2\text{N}$ . Содержание азота в полученных образцах  $\text{Cr}_2\text{N}$  достигало 9.6%. Для образцов  $\text{TiN}$  содержание азота не превышало 11.5%. Рентгенографически в образцах, полученных при горении хрома, обнаружены две фазы: хром и полунитрид хрома. В продуктах горения порошка титана, обнаружен только нитрид титана. Иных рефлексов обнаружено не было.

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

### Литература

1. Мержанов А.Г., Боровинская И.П., Володин Ю.Е. В механизме горения пористых металлических образцов в азоте // Докл. АН СССР. 1972. Т. 206, № 4. С. 905–908.
2. Сеплярский Б.С. Динамические режимы горения слоевой системы  $\text{Ti}-(\text{Ti}+0.5\text{C})$  в спутном потоке азота / Б.С. Сеплярский, С.В. Костин, Г.Б. Брауэр // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44, № 6. С. 44–51.
3. Алдушин А.П. Фильтрационное горение металлов // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах. Новосибирск: Наука, 1988. С. 52–71.
4. Ziatdinov M.Kh., Gubar A.G. The combustion of titanium powders with forced filtration // Abstr. Intern. Symp. «Chemistry of flame Front», Almaty, Kazakstan, October 6–9, 1997. pp. 59–61.
5. Тарасов А.Г. Влияние содержания водорода в титане на структуру фронта и особенности горения гранулированной смеси  $\text{Ti}+0.5\text{C}$  в спутном потоке азота / А.Г. Тарасов, Б.С. Сеплярский, Р.А. Кочетков, Ю.Н. Баринов // Химическая физика. 2016. Т. 35, № 3. С. 77–83.

### References

1. Merzhanov A.G., Borovinskaya I.P., Volodin Yu.E. In the combustion mechanism of porous metal samples in nitrogen // Dokl. USSR Academy of Sciences. 1972. Vol. 206. No. 4. Pp. 905–908.
2. Seplyarsky B.S. Dynamic combustion regimes of the  $\text{Ti}-(\text{Ti} + 0.5\text{C})$  layer system in a nitrogen nitrogen stream / B.S. Seplyarsky, S.S. Kostin, B.B. Brauer // Physics of combustion and explosion. 2008. Vol. 44. No. 6. Pp. 44–51.
3. Aldushin A.P. Filtration combustion of metals // Propagation of thermal waves in heterogeneous media. Novosibirsk: Nauka, 1988. Pp. 52–71.
4. Ziatdinov M.Kh., Gubar A.G. The combustion of titanium powders with forced filtration // Abstr. Intern. Symp. «Chemistry of flame Front», Almaty, Kazakstan, October 6–9, 1997. Pp. 59–61.
5. Tarasov A.G. Influence of the hydrogen content in titanium on the front structure and combustion characteristics of the granular mixture  $\text{Ti} + 0.5\text{C}$  in a nitrogen flux / A.G. Tara-

## **СОЗДАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ ИСПЫТАНИЕМ НА РАЗРЫВ КОЛЬЦЕВЫХ ОБРАЗЦОВ**

**А.А. Квашнёв, А.В. Гуськов, К.Е. Милевский**

Новосибирский государственный технический университет, Россия  
kvashnyov.2015@stud.nstu.ru

**Ключевые слова:** ведущий поясок, разрыв, напряжение, испытание.

**Аннотация.** В данной статье рассматривается необходимость проведения разнообразных лабораторных работ для студентов, обучающихся на инженерных специальностях. Также предложен вариант проведения лабораторной работы для определения механических свойств изделий испытанием на разрыв образца. Данный метод позволяет исследовать механические свойства изделия, не прибегая к дополнительной обработке. Также имеется возможность исследования механических свойств с учётом остаточных деформаций, после изготовления изделия. Испытания на разрыв кольцевых образцов является наиболее точным и лёгким в исполнении методом определения механических свойств уже готового изделия, конструкция которого не позволяет использовать стандартные методы испытания на разрыв плоских образцов.

## **CREATION OF A LABORATORY COMPLEX FOR DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF PRODUCTS BY TESTING FOR FRACTURE OF ANNULAR SAMPLES**

**A. Kvashnyov, A. Guskov, K. Milevskii**

Novosibirsk state technical University, Russian Federation  
kvashnyov.2015@stud.nstu.ru

**Keywords:** Lead belt, tear, tension, test.

**Abstract.** This article discusses the need for a variety of laboratory work for students enrolled in engineering specialties. Also, a variant of laboratory work for determining the mechanical properties of products by a test for the rupture of the sample is proposed. This method allows you to explore the mechanical properties of the product without resorting to additional processing. It is also possible to study the mechanical properties, taking into account residual deformations, after the manufacture of the product. Tearing tests of ring samples is the most accurate and easiest method to determine the mechanical properties of a finished product, the design of which does not allow the use of standard methods of tensile testing of flat samples.

Основной отличительной чертой инженерного образования является наличие обширной практической базы знаний. Любой инженер технической специальности обязан иметь в своём арсенале багаж из большого количества теоретических методов, подкреплённых выполнением практических задач. Одним из средств пополнения такого багажа знаний являются лабораторные работы, которые выполняют студенты на протяжении своего обучения. В данной статье рассматривается возможность создания нового лабораторного комплекса для студентов 4 и 5 курсов, обучающихся по специальности «боеприпасы и взрыватели». Определение механических свойств изделий испытанием на разрыв кольцевых образцов может быть полезно будущим инженерам-технологам в сфере оборонной промышленности, для испытания, например, ведущих поясков артиллерийских снарядов, так как при выстреле ведущий пояс находится в состоянии сложного нагружения, и было бы легче, быстрее и удобнее изучать механические свойства уже готовых изделий. Испытание кольцевых образцов на разрыв состоит в том, что кольцо, вырезанное из изделия, или само кольцевое изделие не разрезается с последующим разгибом, как это принято по существующим техническим условиям [1], а непосредственно подвергаются испытанию.

Испытание кольцевого образца проводится на специальном реверсоре с помощью двух цилиндрических плашек. Реверсор – механическое устройство, которым оснащают испытательную машину для изменения нагружения растяжением на нагружение сжатием [2]. Метод испытания кольцевых образцов, по сравнению с испытанием плоских образцов, имеет ряд преимуществ.

1. Способствует равномерному спрямлению и растяжению стенок образца, что обеспечивает получение стабильных и достоверных характеристик механических свойств.

2. Не требует предварительного изготовления плоских образцов.

3. Позволяет определять механические свойства изделия малого размера и сложной формы, для которых изготовление плоских образцов является невозможным или нецелесообразным.

4. Установка образцов в реверсор является несложной, а их фиксация – надёжной.

5. Испытание кольцевых образцов позволяет определить не только предел прочности и общее удлинение, но и другие важнейшие характеристики механических свойств [3].

Таким образом, студент пополнит свой арсенал ещё одним не очень распространённым, но достаточно эффективным методом определения механических свойств изделия.

Лабораторная работа должна выполняться в следующем порядке.

Образцы, представляющие собой ведущий пояс 122 мм осколочно-фугасного снаряда шириной ( $b_0$ ), равной 18–20 мм, подвергаются опера-

ции спрямления стенок с помощью тех же цилиндрических плашек на том же реверсоре, которые предназначены для растяжения образца. Спрямление стенок заканчивается по визуальному наблюдению или по силоизмерительному устройству машины, исходя из его предела текучести.

Операция спрямления стенок необходима для создания так называемой рабочей области, которая впоследствии будет обработана фрезерованием для уменьшения площади её поперечного сечения, чтобы не допустить разрыва образца в области плашек, а также спрямление стенок позволяет нам рассматривать нагрузку не как окружное растяжение, а как плоское (по ГОСТу 1497-84), но в двух частях образца [3].

Диаметр плашек ( $d_{пл}$ ) принимается в пределах:

$$d_{пл} = (0,3...0,4)d_{вн},$$

где  $d_{вн}$  – внутренний диаметр кольца.

Это отношение принято в связи с необходимостью создать достаточно большую рабочую область растяжения, для получения максимально достоверных результатов. После операции спрямления стенок, спрямлённые участки образца подвергаются фрезерованию до ширины ( $b_0$ ) с целью образования расчётной (рабочей) части образца перед растяжением и предупреждения разрыва образца в области плашек [4]. Размеры образца после фрезерования и слесарной доводки показаны на *рис. 1*.

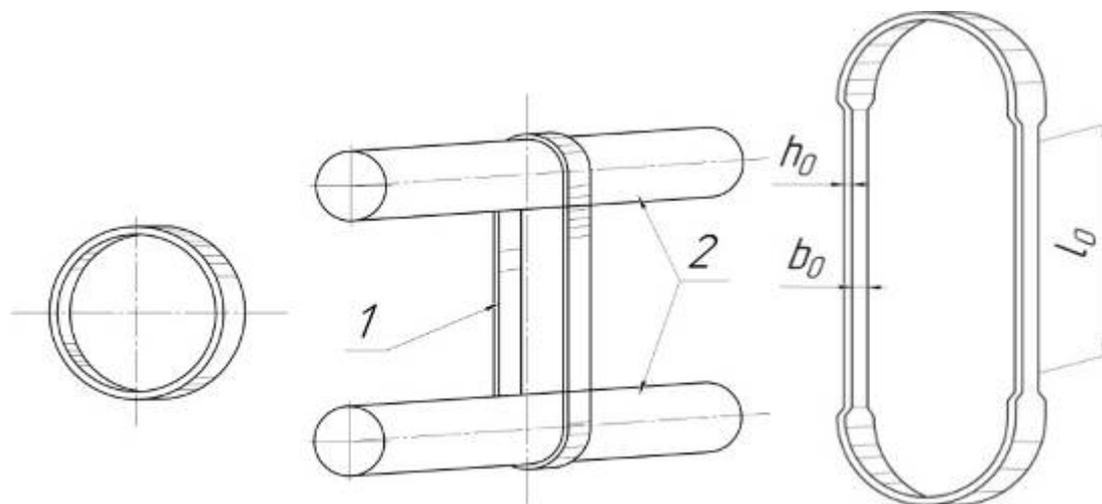


Рис. 1. Кольцевые образцы до и после спрямления и размеры рабочих участков образца после спрямления и фрезерования:

1 – образец; 2 – цилиндрические плашки

$$b_0 = b_0' - (2...3).мм$$

$$l_0 = (6...12)\sqrt{F_0}$$

$$F_0 = b_0 \times h_0$$

После фрезерования и осторожного снятия заусенцев надфилем, рабочие участки образцов замеряют по ширине и по толщине микрометром. Точность замера – 0,01 мм. Затем на каждую из двух рабочих участков образца наносятся риски на расстоянии, определяющем длину расчётной части. Непосредственное проведение испытания, вплоть до разрыва одного из рабочих участков, при этом фиксируется нагрузка, для определения предела прочности. Образец после разрыва подвергается замерам. Замеряются ширина и толщина в зоне устойчивого растяжения ( $b_y$  и  $h_y$ ) при помощи микрометра. Они устанавливаются в сечениях, расположенных между головкой и сечением разрыва, либо на явно выраженной шейке образца. Также измеряются толщина и ширина в зоне разрыва ( $b_p$  и  $h_p$ ). После проведения замеров образца производится определение механических свойств материала по формулам.

После проведения лабораторной работы, студентам предлагается составить отчёт, в котором отразить все полученные характеристики, описать ход работы и сделать выводы.

### Литература

1. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытания на растяжение. М.: Стандартиформ, 2008. 15 с.
2. Энциклопедический словарь по металлургии. М.: Интермет Инжиниринг / под ред. Н.П. Лякишева, 2000.
3. *Свердлов М.И.* Элементы теории процесса испытания на разрыв кольцевых образцов / Инженерные методы расчёта пластической обработки металлов, Таллин, 1971.
4. ГОСТ 25.603-82 Расчёты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на растяжение кольцевых образцов при нормальной, повышенной и пониженной температурах. М.: Стандартиформ, 2005. 10 с.

### References

1. State Standard 1497-84. Metals. Tensile Test Methods. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 15 p. (In Rus.)
2. Encyclopedic Dictionary of Metallurgy. Moscow, Intermet Engineering Publ. / ed. N.P. Lyakisheva, 2000. (In Rus.)
3. *Sverdlov M.I.* Elementy teorii protsessya ispytaniya na razryv kol'tsevykh obraztsov / Inzhenernyye metody raschota plasticheskoy obrabotki metallov [Elements of the theory of the process of tensile testing of ring samples / Engineering methods for calculating the plastic processing of metals]. Tallin, 1971. (In Rus.)
4. State Standard 25.603-82 Calculations and strength tests. Methods of mechanical testing of composite materials with a polymer matrix (composites). Tensile test method for ring specimens at normal, elevated and reduced temperatures. Moscow, Standartinform Publ., 2005. 10 p. (In Rus.).

# ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ ЭЛКОНИТОВ

**К.К. Маевский**

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия  
konstantinm@hydro.nsc.ru

**Ключевые слова:** уравнение состояния, ударная адиабата, термодинамическое равенство, металлические композиты, элконит.

**Аннотация.** Представлены результаты численных экспериментов по моделированию ударно-волнового нагружения семейства металлических композитов – элконитов, которые представляют собой спеченные тугоплавкие материалы (W, WC или Mo), пропитанные легкоплавким металлом (Ag или Cu) с помощью термодинамически равновесной модели ТЕС (thermodynamic equilibrium components). Модель позволяет учитывать возможность наличия полиморфного фазового перехода при ударно-волновом воздействии рассматриваемых материалов, что существенно для достоверного моделирования термодинамических параметров как чистых веществ, так и смесей на их основе. Интерес к исследованиям сжимаемости таких смесей связан как с возможностью создания материалов с необходимыми свойствами, так и со свойствами самих материалов. Получено хорошее согласие этих модельных расчетов с данными разных авторов, которые определяются на основе эксперимента. Модель позволяет описать динамические нагружения сплошных и пористых сплавов различных составов, состоящих из W, WC или Mo, в сочетании Ag или Cu, таких как Cu–W, Ag–W, Cu–WC, Ag–W. Полученные результаты позволяют в перспективе целенаправленно создавать необходимые условия для синтеза новых материалов. Данная модель позволяет осуществлять целенаправленный выбор составов смесей и соотношений их компонентов с целью получения заданных характеристик при ударно-волновом нагружении сплошных и пористых материалов и смесей.

## NUMERICAL INVESTIGATION SHOCK-WAVE LOADING OF ELKONITE

**K. Maevskii**

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian  
Academy of Sciences, Russian Federatio  
konstantinm@hydro.nsc.ru

**Keywords:** Equation of state, shock adiabat, thermodynamic equation, metals composites, elkonite.

**Abstract.** The results of numerical experiments on modeling shock-wave loading of metal composites – elkonites, which are sintered refractory materials (W, WC or Mo) impregnated with fusible metal (Ag or Cu) 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 materials, which is essential for reliable modeling of thermodynamic parameters of both pure substances and mix-

tures based on them. Interest in the research of compressibility of such mixtures is associated with the possibility of creating materials with the necessary properties, and with the properties of the materials themselves. The good agreement of these model calculations 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 W, WC or Mo, in combination with Ag or Cu, such as Cu-W, Ag-W, Cu-WC, Ag-W. The results allow in the future to purposefully create the necessary conditions for the synthesis of new materials. Targeted selection of compositions of mixtures and ratios of their components for obtaining the specified characteristics of solid and porous materials and mixtures under shock wave loading can be performed using this model.

Представлены результаты численных экспериментов по моделированию ударно-волнового нагружения семейства металлических композитов – элконитов, которые представляют собой спеченные тугоплавкие материалы (W, WC или Mo), пропитанные легкоплавким металлом (Ag или Cu) с помощью термодинамически равновесной модели ТЕС (thermodynamic equilibrium components). Модель позволяет достоверно описывать как сплошные, так и пористые сплавы и смеси, в том числе учитывать возможность наличие полиморфного фазового перехода компонентов при ударно-волновом воздействии рассматриваемых материалов. Интерес к исследованиям сжимаемости таких смесей связан как с возможностью создания материалов с необходимыми свойствами, так и со свойствами самих материалов. Модель позволяет описать динамические нагружения сплошных и пористых сплавов различных составов, состоящих из W, WC или Mo, в сочетании Ag или Cu, таких как Cu-W, Ag-W, Cu-WC, Ag-W.

При развитии метода ударно-волнового синтеза необходимо целенаправленно изменять термодинамические параметры для реализации необходимых условий создания материалов с заданными свойствами. Для этого проводятся исследования сжимаемость многокомпонентных смесей различных составов, при этом большой интерес вызывают группы металлических композиций, элементы которых состоят в основном из тугоплавких металлов вольфрама, молибдена и карбида вольфрама в сочетании с медью [1]. Комбинации этих элементов создают плотные твердые металлы с превосходной износостойкостью и прочностью при повышенных температурах в сочетании с хорошей тепловой и электрической проводимостью. Сплав меди и вольфрама сочетает в себе свойства обоих металлов, в результате чего материал получается термостойкий, устойчивый к абляции, с высокой тепло- и электропроводностью, легко обрабатывается. Он используется для изготовления двигателей и электрических устройств в авиационной и космической промышленности. Механические и физические свойства медного вольфрамового сплава варьируются в зависимости от состава, тепловая и электрическая проводимость увеличиваются с количеством меди, а твердость, прочность и сопротивление механическому износу увеличиваются с увеличением количества вольфрама или карбида вольфрама. Моделирование материалов с такими компонентами проводится для разви-

тия перспективного направления получение материалов с заданными свойствами.

Для описания термодинамических параметров сплавов и смесей при ударно-волновом воздействии используется модель ТЕС ударно-волнового нагружения с учетом наличия газа в порах [2, 3]. Данная модель позволяет 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 смеси при ударно-волновом нагружении находятся в термодинамическом равновесии, которое предполагает равенство скоростей, давлений и температур. Для расчета ударно-волнового воздействия на такие смеси 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 – сжатие  $\sigma$ . Получено достоверное описание имеющихся данных, при этом параметры, определенные для чистых материалов, позволяют описывать данные и для сплавов и смесей различных значений пористости с точностью эксперимента.

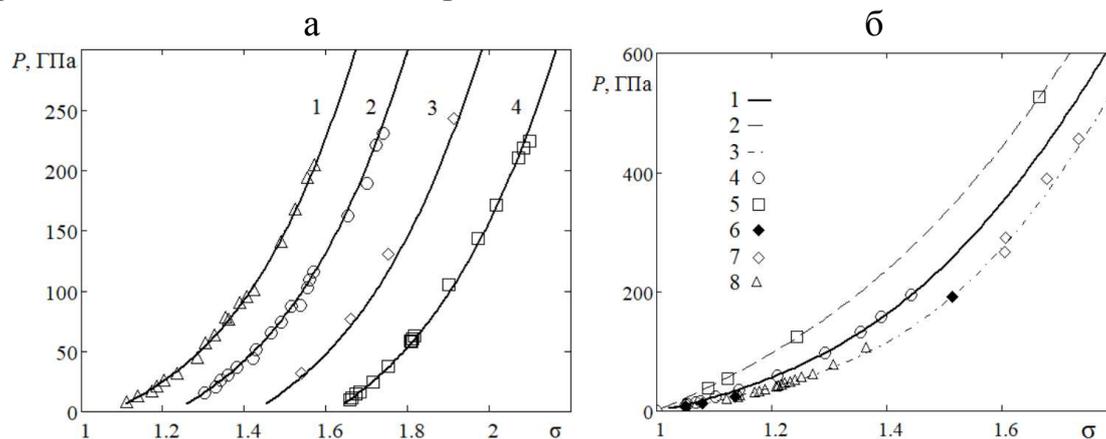


Рис. 1. Ударные адиабаты и данные экспериментов:

*а* – для смеси W и Cu: 1 –  $m=1.014$ , 2 –  $m=1.0195$ , 3 –  $m=1.022$ , 4 –  $m=1.068$  [4];  
*б* – для смеси TC10 WC(56)Cu(44) и ее компонентов: 1 – смесь, 2 – WC, 3 – Cu, TC10 – 4 [4], WC – 5, Cu – 6, 7, 8 [5]

Учет пористости в рамках рассматриваемой модели для смеси меди и вольфрама [4] позволил достоверно описать имеющиеся экспериментальные данные без существенных погрешностей для всех значений пористости. На правой части *рис. 1* представлены ударные адиабаты этой смеси следующих составов с указанием весовых долей и значений пористости  $m$ , определяемой как отношение плотности монолитного вещества к начальной плотности образца: Elkonite 2125C, W(25)Cu(75)  $m=1.014$ ; Elkonite 1W3, W(55)Cu(45),  $m=1.0195$ ; Elkonite 3W3, W(68)Cu(32),  $m=1.022$ , Elkonite 10W3, W(76)Cu(24),  $m=1.068$ . Для наглядности расчетные кривые

и данные, полученные на основании экспериментов, приведены со сдвигом 0.2 по значению сжатия.

Для смеси меди и карбида вольфрама (элконит TC10) с массовыми долями WC(56)Cu(44) [4] результаты моделирования и имеющиеся экспериментальные данные, показаны на *рис. 1, б*. Для сравнения дополнительно приведены расчеты для компонентов смеси. Такие же расчеты проведены для смеси серебра и карбида вольфрама (элконит – G-12) WC(40)Ag(60).

Получено хорошее согласие модельных расчетов с данными разных авторов, которые определяются на основе эксперимента, при этом отсутствует систематическое отклонение для расчетных данных с данными экспериментов, которое возникало при использовании других моделей. Данная модель позволяет осуществлять целенаправленный выбор составов смесей и соотношений их компонентов с целью получения заданных характеристик при ударно-волновом нагружении сплошных и пористых сплавов и смесей.

### Литература

1. High-Velocity Impact Phenomena / Ed. Kinslow R. Academic Press, New York, 1970.
2. Кинеловский С.А., Маевский К.К. Моделирование ударно-волнового нагружения высококомпонентных материалов, включающих висмут // ТВТ. 2016. Т. 54. Вып. 5. С. 716–723.
3. Маевский К.К., Кинеловский С.А. // Журнал технической физики. 2019. Т. 89. Вып. 8. С. 1158–1163.
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. and Fortov V.E. AIP Conf. Proc. **706**, 87 (2004)

### References

1. High-Velocity Impact Phenomena / Ed. Kinslow R. Academic Press, New York, 1970.
2. S.A. Kinelovskii and K.K. Maevskii High Temp. **54**, 675 (2016)
3. K.K. Maevskii and S.A. Kinelovskii Tech. Phys. **64**, 1090 (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. and Fortov V.E. AIP Conf. Proc. **706**, 87 (2004)

## РАЗРУШЕНИЕ ЗАСНЕЖЕННОГО ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭМУЛЬСИОННОЙ ВЗРЫВЧАТКИ

Ю.Н. Орлова

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

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

**Аннотация.** В работе приведены результаты полномасштабных экспериментов по подрыву речного льда эмульсионной взрывчаткой. Объектом исследования – 125-дневный речной лед. Было установлено, что после взрыва 4 кг эмульсионной взрывчатки во льду сформировалась 500-сантиметровая майна (полынья). Эмпирическими методами изучено состояние ледяного покрова после взрыва. Форма майны была близка к окружности, а ее кромка развитой. Осколки льда имели размеры 15 см.

## **SNOW COVERED ICE SHEET SUBJECTED TO 4 KG EMULSION EXPLOSIVES. UNDEX RESULTS 2020**

**Yu. Orlova**

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

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

**Abstract.** The paper presents the results of full-scale experiments on the blow up of river ice by emulsion explosives. Research object is a 125-day ice sheet. It was found that after the explosion of 4 kg of emulsion explosives in ice sheet, a 500-cm-ice-hole was formed. Ice-hole was similar to the circle, and its edge was smoothing. Ice response after the blow up has been studied by empirical methods. After the explosion, ice fragments, usually has a size of 15 cm. The results are predictable and correspond to last year's.

В настоящее время исследование поведения льда имеет принципиальное значение для развития северных территорий нашей страны, увеличения добычи природных ископаемых в районах вечной мерзлоты, создания защит элементов летательных аппаратов от частиц космического мусора. Весенние ледяные заторы на сибирских реках, длина которых иногда достигает 150 км, требует поиска новых решений. Известно, что начиная с 2013 года в соответствии с задачей поставленной президентом РФ, возобновляется постоянное присутствие России в Арктике, а Северный морской путь формулируется как «исторически сложившийся национальной единой транспортной коммуникацией России в Арктике». Исходя из вышеупомянутого, необходимо углубить знания в области механики разрушения льда для создания новых математических моделей его разрушения при динамических нагрузках [1].

В настоящей работе, в соответствии с целями и задачами из [1] эмпирическими методами исследуется поведение заснеженного ледяного покрова (используется терминология 1974 года) при взрыве эмульсионной взрывчатки в воде подо льдом. Заснеженный ледяной покров средней толщины (около 70 см) является объектом постоянных исследований с 2013 года. Возраст льда около 125 дней, его толщина – 65 см. На льду присутствовал 20-сантиметровый слой снега. Глубина воды подо льдом – 10 метров. Предмет исследования – состояние льда после подрыва 4 кг эмульсионной

взрывчатки, а именно: диаметр полыньи (майны) во льду, состояние ее кромки, морфология разрушения и т.п. ВВ – эмульсионная взрывчатка Эмуласт АС-ФП 90 массой 4 кг (3.25 кг ТНТ эквивалент). В момент детонации взрывчатка располагалась параллельно ледяному покрову без воздушного зазора.

Полномасштабные натурные эксперименты были проведены совместно с ООО «КузбасСпецВзрыв» (Кемерово) и мобильной лаборатории «Взрывное разрушение природных материалов». Основной акцент был поставлен на состояние кромки льда, диаметр/форма майны во льду и морфологию разрушения. Помимо необходимого углубления знаний в этой области, эксперименты должны играть роль количественных тестов для апробации численных методов и математических моделей [2, 3].

На *рис. 1* показана майна (полынья) полученная после подрыва одного эмульсионного заряда ВВ (фото сделано через 15 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, эпицентр которой был в месте закладки ВВ. Приблизительный диаметр майны составляет около 500 см (точность измерения составила 5 см). Кромка льда была ровной и редко имела ступенчатую форму.



Рис. 1. Результаты UNDEX-эксперимента 2020.  
Взрыв – ООО КузбасСпецВзрыв. Фото получено через 15 мин после взрыва

Таким образом, проведенные полномасштабные эксперименты позволили выявить основные особенности процесса разрушения льда. Все отмеченные закономерности будут полезны при численном моделировании.

После взрыва 4-килограммовой эмульсионной взрывчатки во льду образовалась майна. Она имела форму близкую к окружности и диаметр около 500 см. Кромка льда была развитая, но иногда имела ступенчатую форму. Внутри майны были осколки, в основном, небольших размеров (до 15 см), иногда присутствовали остатки снега.

### Литература

1. Орлова Ю.Н. Комплексное теоретико-экспериментальное исследование поведения льда при ударных и взрывных нагрузках: автореф. ... дис. канд. физ.-мат. наук. Томск, 2014. 26 с.
2. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Разрушение льда при ударных и взрывных нагрузках. Численное моделирование. Эксперимент // Труды ТГУ. Серия физико-математическая. Томск: Изд-во Том. ун-та, Т. 303. 2019. С. 9–23.
3. Бирюков В.А., Миряха В.А., Петров И.Б. Анализ зависимости глобальной нагрузки от механических параметров льда при взаимодействии ледяного поля с конструкцией // Доклады академии наук, 2017. Т. 474, No 6. С. 696–699.

### References

1. Orlova Yu.N. Kompleksnoye teoreticheskoye i eksperimental'noye issledovaniye povedeniya l'da pri udarnykh i vzryvnykh nagruzkakh / Ph.D. thesis, Tomsk State University, 2014 (in Rus.)
2. Orlov MYu, Glazyrin V and Orlov Yu.N. (2019) Ice destruction at shock and impact loading. Numerical modelling and experiment // *Works of Tomsk State University/Physics and Mathematical Series*. Vol. 303. Pp. 9–23 (in Rus.).
3. Biryukov V.A., Petrov I.B., Miryakha V.A. Analysis of the dependence of the global load on the mechanical parameters of ice under interaction between an ice field and construction Doklady Physics. 2017. Vol. 62(6). Pp. 328–331.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГОФРИРОВАННОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СЕТКИ В ПРОТИВОМЕТЕОРНЫХ ЭКРАНАХ

С.В. Пашков<sup>1\*</sup>, Ю.Ф. Христенко<sup>1</sup>, Д.Б. Добрица<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина, г. Химки, Россия  
s300@ngs.ru

**Ключевые слова:** противометеорная защита, сеточные экраны, гофрированная сетка, высокоскоростной удар.

**Аннотация.** Микрометеорные и техногенные частицы диаметром порядка до нескольких мм имеют наиболее высокую плотность потоков на околоземной орбите, поэтому являются основным фактором, определяющим требования к стойкости защитных экранов космических аппаратов. С помощью численного моделирования и экспериментов по высокоскоростному пробитию, в работе исследуется стойкость запатентованно-

го авторами гофрированного сеточного экрана. Проводится экспериментальное сравнение стойкости гофрированного сеточного экрана и обычного сеточного экрана. Повышенные, по сравнению с обычными сеточными экранами равной удельной массы, защитные свойства предложенной конструкции проверены экспериментально и подтверждены результатами численного моделирования.

## PROTECTIVE PROPERTIES OF CORRUGATED MESH ANTI-METEOR SHIELDS

S. Pashkov<sup>1,\*</sup>, Yu. Khristenko<sup>1</sup>, D. Dobritsa<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Lavochkin Research and Production Association, Khimki, Moscow oblast, Russia

\* s300@ngs.ru

**Keywords:** Anti-meteor protection, mesh protective shield, pleated mesh, high-speed impact.

**Abstract.** Micrometeor and technogenic debris with a diameter of up to several mm have the highest flux density in earth orbit, so they are the main factor determining the requirements for the protective screens of spacecraft. With the use of numerical simulation and experiments on high-speed penetration, the effectiveness of the proposed and patented protective anti-meteoroid shield in the form of pleated steel mesh was investigated. An experimental comparison of the protective properties of a pleated mesh screen and a simple mesh screen is performed. The protective properties of the proposed design have been experimentally verified and confirmed by the results of numerical simulation.

Повышение эффективности противометеорной защиты связано с оптимизацией ее массы, поскольку перетяжеление конструкции космического аппарата, как правило, недопустимо из-за массовых ограничений, закладываемых при его проектировке. В настоящее время для эффективного решения задачи защиты космических аппаратов от метеорно-техногенных воздействий применяются различные виды защитных экранов, в том числе в виде металлических сеток или их комбинации с другими материалами [1]. Проводятся исследования стойкости сеточных экранов, а также структур, обеспечивающих преимущественно наклонное соударение (например, в виде ячеистого контейнера), как экспериментальными методами, с помощью испытаний высокоскоростного воздействия на легкогазовых баллистических установках, так и путем численного моделирования высокоскоростных взаимодействий [2–4]. В работе, на примере численных расчетов и экспериментальных данных, демонстрируются повышенные защитные свойства противометеорной защиты в виде экрана из гофрированной металлической сетки.

Концепция запатентованного авторами защитного экрана в виде гофрированной металлической сетки [5], объединяет достоинства использования сеточных экранов и наклонных поверхностей. Для исследования стойкости

гофрированных сеточных экранов к воздействию высокоскоростных частиц проведено комплексное теоретико-экспериментальное исследование. В работе [2] в лагранжевой 3D-постановке рассматривается процесс высокоскоростного взаимодействия наклонной преграды в виде тканой сетки из нержавеющей стали с компактным ударником в виде алюминиевого шарика, соответствующим по плотности и размеру характерным метеорным частицам, обладающим способностью пробить защитный экран. Предложенный подход к численному моделированию позволяет описать специфические особенности поведения сеточных экранов при высокоскоростных воздействиях под наклоном. Для сравнения рассматривается взаимодействие ударника по нормали с сеточным экраном, приведенная (по направлению удара) удельная масса которого идентична наклонному воздействию.

В опытах численного моделирования диаметр алюминиевого ударника составлял 1.7 мм, скорость удара 5 км/с. При следующих выбранных базовых размерах стальной сетки: шаг  $a_0 = 0.5$  мм, диаметр проволоки  $d_0 = 0.32$  мм, эквивалентность удельной массы при использовании наклонного экрана (под углом  $45^\circ$  к направлению удара) достигалась двумя способами: увеличением шага сетки в  $\sqrt{2}$  раз ( $a_0/\cos\phi$ ,  $d_0$ ) или уменьшением диаметра проволоки в  $2^{1/4}$  раза ( $a_0$ ,  $d_0\sqrt{\cos\phi}$ ).

Для материала ударника и экрана использовалась модель упругопластической сплошной среды. Определяющие соотношения брались в форме Прандтля–Рейсса при условии пластичности Губера–Мизеса, уравнения состояния – в форме Ми–Грюнайзена. Для описания разрушения использовался метод раздвоения разностной сетки по узлам в сочетании с критерием разрушения по максимальным пластическим деформациям. При взаимодействии осколков и для контактных поверхностей использовалось условие идеального скольжения и непротекания по нормали.



Рис. 1. Защитный экран из двух слоёв гофрированной сетки и преграда-свидетель после взаимодействия с ударником

Результаты численного моделирования [2] подтверждают существенно более высокую степень дробления ударника на гофрированных сеточных экранах по сравнению с обычными сеточными экранами при идентичной удельной массе. Предлагаемая методика численного моделирования может применяться в дальнейшем для исследования стойкости многослойных преград с включением гофрированных сеток в качестве слоев.

Эксперименты по высокоскоростному пробитию обычного двойного сеточного экрана из сетки разного типоразмера, выполненных на легкогазовой пушке в НИИ ПММ привели к сквозному пробитию преграды-свидетеля. Аналогичные эксперименты для двойного экрана из гофрированной сетки (см. *рис. 1*) подтвердили его высокие защитные свойства, преграда-свидетель осталась целой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-10264).

### Литература

1. *Christiansen E.L., Kerr J.H.* Mesh Double-Bumper Shield: A low-weight alternative for spacecraft meteoroid and orbital debris protection // *International Journal of Impact Engineering*. 1993. Vol. 14. Pp. 169–180.

2. *Добрица Д.Б., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф.* Исследование эффективности сеточных гофрированных экранов для защиты космических аппаратов от воздействия метеорно-техногенных частиц, *Космические исследования*, 58(2) (2020). С. 131–137.

3. *Xiaotian Zhang, Tao Liu, Xiaogang Li, & Guanghui Jia J.* Hypervelocity impact performance of aluminum egg-box panel enhanced Whipple shield // *Acta Astronautica*. 2016. Vol. 119. Pp. 48–59. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.10.013>

4. *Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н.* Разрушение льда при ударных и взрывных нагрузках. Численное моделирование. Эксперимент // *Труды ТГУ. Серия физико-математическая*. Томск: Изд-во Том. ун-та, Т. 303. 2019. С. 9–23.

5. *Добрица Д.Б., Герасимов А.В., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф.* Экран для защиты космического аппарата от высокоскоростного ударного воздействия частиц космической среды. Патент на изобретение RU 2623782, 29.06.2017. Заявка № 2016107557 от 02.03.2016.

### References

1. *Christiansen E.L., Kerr J.H.* Mesh Double-Bumper Shield: A low-weight alternative for spacecraft meteoroid and orbital debris protection // *International Journal of Impact Engineering*, 1993. Vol. 14. Pp. 169–180.

2. *Dobritsa, D.B., Pashkov, S.V., and Khristenko, Yu.F.* Study of the efficiency of corrugated mesh shields for spacecraft protection against meteoroids and manmade space debris. *Cosmic Research*, 2020, Vol. 58. No. 2. Pp. 105–110.

3. *Xiaotian Zhang, Tao Liu, Xiaogang Li, & Guanghui Jia J.* Hypervelocity impact performance of aluminum egg-box panel enhanced Whipple shield // *Acta Astronautica*, 2016. Vol. 119. Pp. 48–59, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.10.013>

4. *Orlov M.Yu., Glazyrin V.P. and Orlov Yu.N.* (2019) Ice destruction at shock and impact loading. Numerical modelling and experiment // *Works of Tomsk State University/ Physics and Mathematical Series*. Vol. 303. Pp. 9–23 (in Rus.)

5. Dobritsa, D.B., Gerasimov, A.V., Pashkov, S.V., Khristenko, Yu.F. Shield for the spacecraft protection from high-speed particles of the space environment. Patent for the invention RU 2623782, 29.06.2017. Request no. 2016107557, 02.03.2016.

## **ЭКСТРЕМАЛЬНОЕ РЕГУЛЯРНОЕ ОТРАЖЕНИЕ КОСЫХ СКАЧКОВ УПЛОТНЕНИЯ И БЕГУЩИХ УДАРНЫХ ВОЛН**

**Н.Б. Федосенко, М.В. Чернышов**

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»  
им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия  
mvcher@mail.ru

**Ключевые слова:** отражение ударной волны, экстремальные нагрузки, аналитическое решение.

**Аннотация.** Рассматривается регулярное отражение косого скачка уплотнения в сверхзвуковом потоке совершенного газа. Аналитически определены условия экстремума статического давления за точкой отражения скачка заданной интенсивности в зависимости от числа Маха набегающего потока. Полученные результаты применены к решению эквивалентной задачи об отражении бегущей ударной волны заданной интенсивности от наклонной преграды. Показано немонотонное изменение механической нагрузки на преграду в зависимости от угла ее наклона, аналитически определены углы наклона, соответствующие экстремумам давления за точкой отражения ударной волны.

## **EXTREME REGULAR REFLECTION OF AN OBLIQUE STATIONARY SHOCKS AND PROPAGATING SHOCK WAVES**

**N. Fedosenko, M. Chernyshov**

Baltic State Technical University “VOENMEH”, Russian Federation  
mvcher@mail.ru

**Keywords:** shock reflection, extreme loads, analytical solution.

**Abstract.** The regular reflection of the oblique shock in supersonic flow of perfect gas is considered. Conditions of extremum of the static pressure downstream the point of reflection of the shock with fixed strength, as a function of Mach number of the oncoming flow, are determined analytically. Obtained results are applied to the solution of the equivalent problem of the reflection of propagating shock wave with given strength from the inclined obstacle. Non-monotonic variation of the mechanical load on the obstacle surface, with its inclination angle change, is shown; the slope angles which correspond to pressure extrema behind the shock reflection point are determined analytically.

Регулярное отражение скачков уплотнения и бегущих ударных волн от твердой поверхности или плоскости симметрии газового течения известно,

начиная с XIX века. Например, в [1, 2] приведены некоторые численные, аналитические и экспериментальные методики исследования процессов, сопутствующих ударно-волновому нагружению. Аналитическое решение для параметров отраженного скачка или волны графически представимо на плоскости ударных поляр. Хорошо изучены условия существования регулярного отражения и критерии перехода к нерегулярному (маховскому) как в установившихся, так и в нестационарных течениях. Если значение показателя адиабаты газа в установившемся течении известно и фиксировано, то свойства отраженного скачка уплотнения являются функциями числа Маха потока перед падающим скачком и одного из параметров этого скачка (например, его интенсивности или амплитуды).

Зависимости, определяющие интенсивность отраженного скачка или его амплитуду, монотонны относительно интенсивности (амплитуды) падающего скачка: при усилении падающего возмущения отраженный скачок также усиливается. В данной работе аналитически показано, что параметры отраженного скачка являются (при фиксированных параметрах падающего) немонотонными функциями числа Маха потока; определены условия возникновения экстремумов давления за отраженным скачком.

Практическая ценность полученных аналитических решений определяется эквивалентными задачами о косом отражении бегущих ударных (в частности, взрывных) волн. Изменение числа Маха потока в задаче о стационарном отражении скачка соответствует изменению угла раствора клина в задаче о нестационарном отражении бегущей волны той же интенсивности. Из немонотонного изменения давления за отраженным скачком уплотнения следует немонотонная зависимость механической нагрузки за отраженной ударной волной от угла наклона преграды.

Параметры падающих скачков, обеспечивающих минимум статического давления за отраженным скачком, описываются кубическим уравнением в переменных «интенсивность скачка – число Маха набегающего потока» [3, 4]. Аналогичное уравнение аналитически определяет углы наклона преграды, при которых минимально статическое давление за точкой регулярного отражения бегущей ударной волны заданной амплитуды. Эти оптимальные углы наклона отражающей поверхности существуют при всех теоретически возможных параметрах падающей волны. При этом оптимальное отражение ударной волны отличается как от нормального отражения, так и от предельного случая перехода от регулярного отражения к маховскому. Расчеты показывают, что геометрическая оптимизация взаимодействия ударных (взрывных) волн с преградами позволяет существенно уменьшить механические нагрузки на элементы конструкций [5].

Теоретические результаты данной работы (условия экстремума механических нагрузок за отраженными скачками и ударными волнами) могут быть использованы при практической реализации многих взрывных технологий: в задачах обеспечения взрывобезопасности, взрывного разрушения

строительных конструкций, ударно-волновой разделки металлоконструкций и резки металлов, а также в авиационном и ракетном двигателестроении, сверхзвуковой аэродинамике и во многих других областях техники.

### Литература

1. Физика взрыва: монография: в 2 т. / под ред. Л.П. Орленко. 3-е изд. перераб. М.: Физматлит. 2002. Т. 1. 832 с.
2. *Бараиков В.Н., Герасимов А.В., Глазырин В.П. и др.* Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. 572 с.
3. *Чернышов М.В., Савелова К.Э., Федосенко Н.Б.* Экстремальное регулярное отражение косых скачков уплотнения и бегущих ударных волн // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. 2019. Вып. 3–4. С 96–104.
4. *Chernyshov M., Tyapko A.* Optimal regular reflection of shock and blast waves // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 245. Paper No. 12005. 8 p.
5. *Chernyshov M.V., Tolpegin O.A.* Optimal regular reflection of oblique shocks // Acta Astronautica. 2019. Vol. 163. Pp. 225–231.

### References

1. Explosion Physics, 3rd ed, edited by L. Orlenko (FizMatLit, Moscow, 2004), Vol. 1. Pp. 832.
2. *Teoreticheskiye i eksperimental'nyye issledovaniya vysokoskorostnogo vzaimodeystviya tel*, edited by A. Gerasimov (Tomsk State University Press, Tomsk, 2007). 572 p.
3. *Chernyshov M.V., Savelova K.E., Fedosenko N.B.* The extreme regular reflection of oblique steady and propagating shocks // Military Engineering. Series 16. Counter-Terrorism Technical Devices. 2019. Issue 3–4. Pp. 96–104.
4. *Chernyshov M., Tyapko A.* Optimal regular reflection of shock and blast waves // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 245. Paper No. 12005. 8 p.
5. *Chernyshov M.V., Tolpegin O.A.* Optimal regular reflection of oblique shocks // Acta Astronautica. 2019. Vol. 163. Pp. 225–231.



## **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 contin- uum 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



# ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПОТЕРЬ НА ТРЕНИЕ В СОПЛАХ РДТТ

**К.Л. Алигасанова, Р.Ю. Бургомистренко**

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

**Ключевые слова:** сопло, потери удельного импульса на трение, математическое моделирование, метод Годунова, программа расчета.

**Аннотация.** Разработан программный комплекс, который позволяет определять потери на трение в соплах ракетных двигателей. Методика расчета реализована на основе инженерного метода Глушко для турбулентного пограничного слоя. Параметры в ядре потока определяются с помощью метода Годунова с использованием точного решения задачи Римана. Проведены тестовые параметрические исследования зависимостей потерь удельного импульса тяги для радиусно-параболического и радиусно-конического сопел от свойств продуктов сгорания, типа сопла и параметров теплообмена. Реализованный программный комплекс позволяет проводить расчет для разных типов сопел с выбранной геометрией при определенных начальных и граничных условиях. Графический интерфейс позволяет визуализировать контур сопла, строить графики зависимостей параметров течения идеального газа по длине сопла, разработан с использованием технологии WPF (Windows Presentation Foundation). Верификация программы проведена путем сравнения с известными решениями.

## COMPUTER PROGRAM TO CALCULATE FRICTION LOSSES IN SPRM NOZZLES

**K. Aligasanova, R. Burgomistrenko**

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

**Keywords:** nozzle, loss of specific momentum on friction, mathematical modeling, Godunov method, calculation program.

**Abstract.** A software package has been developed that allows to determine losses on friction in the nozzles of rocket engines. The calculation method is based on the engineering method of Glushko for the turbulent border layer. The parameters in the core of the stream are determined by Godunov's method, using an accurate solution to the Riman problem. Test parametric studies of dependences of specific pulse of thrust for radius-parabolic and radius-conic nozzles from the properties of combustion products, type of nozzle and heat exchange parameters have been carried out. The implemented software complex allows you to calculate for different types of nozzles with selected geometry under certain initial and boundary conditions. The graphical interface allows you to visualize the nozzle contour, build graphs of the dependences of the ideal gas flow parameters along the nozzle length, and was developed using the WPF (Windows Presentation Foundation) technology. Verification of the program was carried out by comparison with known solutions.

Математическое моделирование течений в газодинамических трактах ракетных двигателей проводят с целью определения локальных параметров потока и интегральных характеристик, таких как тяга, удельный импульс, потери удельного импульса тяги, процессов тепломассообмена. Их определение является основной задачей на этапе теоретической проработки проектируемых изделий, в том числе с использованием перспективных топлив.

Одной из составляющих потерь удельного импульса тяги являются потери на трение. Потери на трение связаны с сопротивлением трения при обтекании профиля сопла и, как следствие, изменением давления вдоль стенки сопла [1]. Данное изменение происходит из-за отеснения линий тока от стенки сопла пограничным слоем. Это изменение можно компенсировать за счет исправления контура сопла на толщину вытеснения. Поэтому при расчете удельного импульса тяги его нужно уменьшить на величину сопротивления трения [2].

Цель настоящей работы заключается в разработке методики и инженерной программы расчета газодинамических характеристик течения и потерь импульса на трение в проектируемых соплах.

С точки зрения инженерной методики для определения основных параметров одномерного течения вязкого газа предпочтительным считается выполнение расчета в два этапа с выделением в движущемся потоке двух областей – потенциального ядра и пограничного слоя. Такой подход позволяет существенно упростить расчет, поскольку оказывается возможным в ядре потока пренебречь влиянием сил вязкости. Для определения потерь на трение при этом требуется рассчитать пограничный слой вдоль внутренней поверхности стенки сопла. Параметры на внешней границе пограничного слоя в этом случае приравниваются параметрам идеального газа в ядре потока [3].

В качестве физико-математической модели для описания невязкого ядра потока рассматриваются уравнения Эйлера, описывающие параметры течения идеального газа в интегральной форме для законов сохранения массы, импульса и энергии. Для замыкания системы уравнений привлекается уравнение состояния в калорической форме.

Численная методика расчета ядра потока в сопле реализована с использованием схемы Годунова, которая позволяет получить параметры в центрах расчетных ячеек, для определения которых необходимо знать потоки через грани расчетной ячейки. Метод Годунова [4] реализован с учетом определения потоков на границах ячеек разностной сетки с использованием точного решения задачи Римана. Для получения точного решения задачи Римана требуется решение нелинейного уравнения. Для этого используется метод Ньютона, в качестве начального приближения используется линеаризованное приближение.

Расчет потерь удельного импульса на трение проводится по инженерной методике [2], основанной на расчете толщины потери импульса для турбулентного пограничного слоя. Соотношение позволяет определить безразмерную величину потерь импульса в зависимости от локальных значений скорости ядра потока в сечении и параметра теплообмена со стенкой сопла и термодинамических свойств продуктов сгорания.

Методика расчета реализована в виде программного комплекса, графический интерфейс которого разработан с использованием технологии WPF (Windows Presentation Foundation). Пользовательский интерфейс позволяет задавать исходные данные (геометрия, параметры газа), начальные и граничные условия и анализировать результаты расчета в графической форме.

С использованием разработанной программы проведены численные исследования по определению потерь удельного импульса тяги для радиусно-параболического и радиусно-конического сопел. Варьируемыми параметрами являются безразмерная длина сверхзвуковой части, степень расширения и показатель адиабаты. По результатам расчета строится диаграмма зависимости потерь импульса на трение в сверхзвуковой части радиусно-конического сопла от степени расширения при различных показателях адиабаты и безразмерной длиной сверхзвуковой части равной 5 и 10. Из диаграммы делаем вывод, что при фиксированной длине сопла с увеличением радиуса выходного сечения величина потерь импульса уменьшается, это связано с тем, что плотность газа вблизи стенок падает.

В ходе исследования также получены диаграммы зависимости потерь на трение в сверхзвуковой части сопла от длины сверхзвуковой части сопла и относительного радиуса выходного сечения сопла. Результаты расчетов для тестовых сопел хорошо согласуются с результатами работы [2].

## Литература

1. *Добровольский М.В.* Жидкостные ракетные двигатели / М.В. Добровольский. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 474 с.
2. *Глушко В.П.* Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания / В.П. Глушко. М.: ВИНТИ, 1971. 263 с.
3. *Алемасов В.Е.* Теория ракетных двигателей / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин. М.: Машиностроение, 1989. 462 с.
4. *Годунов С.К., Забродин А.В.* Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 395 с.
5. *Костюшин К.В., Шуварики В.А.* Сравнение схем типа «MUSCL» для расчета течений идеального газа в соплах Лаваля // Вестн. Том. гос. ун-та. Матем. и мех., 2018, No 54. С. 79–87.

## References

1. *Dobrovolsky M.V.* Liquid rocket engines / M.V. Dobrovolsky. M.: MSTU im. N.E. Bauman, 2016.474 s.

2. *Glushko V.P.* Thermodynamic and thermophysical properties of combustion products / V.P. Glushko. M.: VINITI, 1971. 263 s.
3. *Alemasov V.E.* Theory of rocket engines / V.E. Alemasov, A.F. Dregalin, A.P. Silence. M.: Mechanical Engineering, 1989. 446 s.
4. *Godunov S.K., Zabrodin A.V.* Numerical solution of multidimensional problems of gas dynamics. M.: Nauka, 1976. 395 s.
5. *Kostyushin K.V., Shuvarikov V.A.* Comparison of MUSCL-type circuits for calculating ideal gas flows in Laval nozzles // Tomsk State University Journal. Tomsk state un-that. Mat. Ex., 2018, No 54. S. 79–87.

## ТРЕХМЕРНЫЕ СВОБОДНЫЕ МАЛЫЕ КОЛЕБАНИЯ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ В СОСУДАХ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

**И.В. Бобер, А.В. Мерзляков**

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

**Ключевые слова:** малые колебания, идеальная жидкость, метод разделения переменных.

**Аннотация.** В работе проводится моделирование процессов трехмерных малых колебаний идеальной жидкости в ограниченных сосудах. Рассматривается прямоугольный сосуд и цилиндрический сосуд. Решение осуществляется методом разделения переменных. В результате получается форма свободной поверхности жидкости в разные моменты времени, а также изменение этой формы в течение времени. Полученные результаты могут быть использованы для контроля процессов, происходящих в емкостях при перевозке больших объемах жидкости.

## THREE-DIMENSIONAL FREE SMALL VIBRATIONS OF AN IDEAL FLUID IN VESSELS OF VARIOUS SHAPES

**I. Bober, A. Merzlyakov**

National Research Tomsk State University; Russian Federation  
ignatbober@gmail.com

**Keywords:** Small vibrations, perfect fluid, variable separation method.

**Abstract.** The paper simulates the processes of three-dimensional small vibrations of an ideal fluid in confined vessels. A rectangular vessel and a cylindrical vessel are considered. The solution is carried out by the method of separation of variables. The result is the shape of the free surface of the liquid at different points in time, as well as a change in this form over time. The results can be used to control the processes occurring in containers during transportation of large volumes of liquid.

Изучение колебаний жидкости очень актуально в наше время. Примерами служит перевозка бензина в цистернах. При движении по дороге могут начаться колебания. Если эти колебания будут слишком сильные, машина может перевернуться. В бетоновозах может возникнуть подобная ситуация. Один из важных примеров проявления колебаний жидкости являются жидкостные ракетные двигатели. Там дело обстоит гораздо серьезнее. Объем топлива уже оценивается не в килограммах, а в тоннах. Если колебания жидкости усилятся, то ракета может наклониться или даже может взорваться. Колебания, возникающие в емкостях с жидкостью, надо гасить, для этого необходимо знать механизм возникновения и развития этих колебаний.

При определенных условиях колеблющуюся жидкость можно считать идеальной (отсутствие вязкости и теплопроводности). Идеальная жидкость изучается легче, чем реальная. Поэтому при решении большого числа инженерных задач можно обойтись моделью идеальной жидкости. Реальная жидкость очень близка по свойствам к идеальной в том случае, когда она занимает большой объем и имеет малую вязкость.

В предлагаемой работе рассматриваются трехмерные свободные малые колебания идеальной жидкости в сосудах различной формы.

При описании движения идеальной несжимаемой жидкости используются уравнения Эйлера: уравнение неразрывности и уравнение движения. Движение идеальной жидкости, как показано многочисленными выводами и доказательствами, является потенциальным. Это означает, что вектор скорости жидкости представляется градиентом некой скалярной функции, которая называется потенциал скорости. Если это выражение подставить в уравнение неразрывности, то оно сведется к уравнению Лапласа, для определения потенциала скорости идеальной жидкости.

Решение задачи сводится к решению уравнения Лапласа.

Граничными условиями для него будут следующие:

- 1) на твердой стенке ставится условие непротекания;
- 2) на свободной поверхности ставится условие Коши–Лагранжа.

В случае, когда в сосуде жидкость совершает малые колебания, мы можем интеграл Коши–Лагранжа упростить: убрать квадрат вектора скорости, так как, если колебания маленькие, смещение жидкости мало и, как следствие, и производная по времени от смещения, т.е. скорость тоже будет маленькой. Если это величина малая, то квадратом этой малой величины пренебрегают. Внешней массовой силой будет являться сила тяжести. Потенциал её равен произведению ускорения свободного падения на величину отклонения точки жидкости от равновесного положения. Давление считается постоянным, поэтому соответствующее слагаемое может войти в выражение для потенциала. Правую часть выражения можно задать равную нулю. В результате этого интеграл Коши–Лагранжа очень сильно упрощает свою форму.

Предлагаемая работа посвящена решению задачи о малых трехмерных колебаниях идеальной жидкости в ограниченном сосуде под действием силы тяжести через решение уравнения Лапласа для потенциала скорости. Поставленная задача решается в трехмерной постановке. В рамках решения этой задачи жидкость занимает либо емкость в форме прямоугольного параллелепипеда, либо объем в форме цилиндра. Ее боковые стенки вертикальны, а дно горизонтально. В случае прямоугольной емкости движение жидкости целесообразно изучать в декартовой системе координат, а в случае цилиндрической емкости – в цилиндрической системе координат.

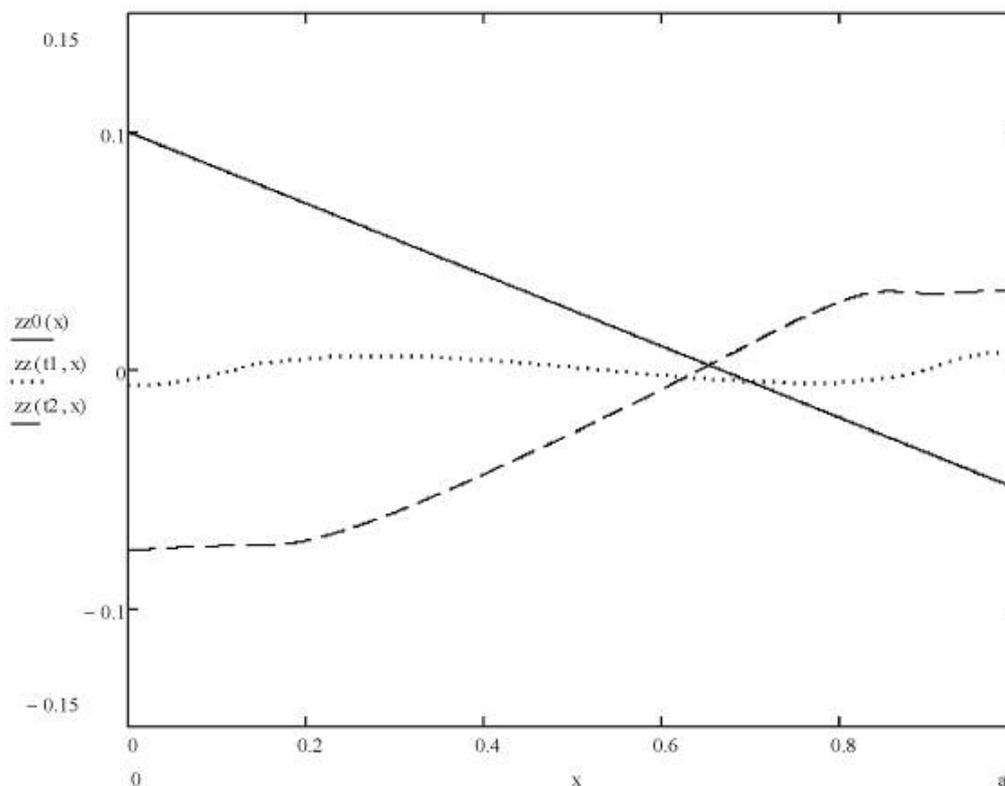


Рис. 1. Форма осесимметричной свободной поверхности жидкости в цилиндрическом сосуде: начальная (сплошная линия) и в моменты времени 0.25 с (пунктирная линия) и 0.5 с (штриховая линия)

Задача о малых колебаниях идеальной жидкости в прямоугольном сосуде решалась методом разделения переменных. Декартова система координат ориентировалась по ребрам сосуда: оси  $x$  и  $y$  – по сторонам основания сосуда, ось  $z$  – по вертикальному ребру. Собственными функциями задачи Штурма–Лиувилля в данном случае являются косинусы, зависимость для формы свободной поверхности получается на основании решения дифференциального уравнения, получающегося из преобразованного интеграла Коши–Лагранжа. Начальная форма свободной поверхности задавалась в виде наклонной плоскости, начальная скорость точек свободной поверхности задавалась равной нулю. При выполнении этой работы рассмат-

ривались колебания жидкости в прямоугольном сосуде со следующими размерами: ширина – 1 м, длина – 2 м, глубина – 1 м. Максимальное отклонение начальной формы свободной поверхности от равновесного положения составило 10 см.

Было получено графическое представление изменения формы свободной поверхности с течением времени.

Задача о малых осесимметричных колебаниях идеальной жидкости в цилиндрическом сосуде также решалась методом разделения переменных. Ось  $z$  цилиндрической системы координат совпадала с осью симметрии сосуда. Собственными функциями задачи Штурма–Лиувилля в данном случае являются функции Бесселя нулевого порядка, зависимость для формы свободной поверхности получается на основании решения дифференциального уравнения, получающегося из преобразованного интеграла Коши–Лагранжа. Начальная форма свободной поверхности задавалась в виде конуса очень малой высоты, начальная скорость точек свободной поверхности задавалась равной нулю. При выполнении этой работы рассматривались колебания жидкости в цилиндрическом сосуде со следующими размерами: радиус – 1 м, глубина – 1 м. Максимальное отклонение начальной свободной поверхности от равновесного положения составило 10 см.

Было получено графическое представление изменения формы свободной поверхности с течением времени. На *рис. 1* представлены образующие поверхности в различные моменты времени.

Таким образом, получено аналитическое решение задачи о малых колебаниях идеальной жидкости в линейном приближении путем решения уравнения Лапласа. В качестве иллюстрации метода построена форма свободной поверхности жидкости в разные моменты времени для обеих решаемых задач.

## Литература

1. *Кочин Н.Е.* Теоретическая гидромеханика / Н.Е. Кочин, И.А. Кибель, Н.В. Розе. М.: ГИФМЛ, 1963. Ч. 1. 584 с.
2. *Тихонов А.Н.* Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. М.: Наука, 1977. 742 с.
3. *Богоряд И.Б.* Введение в динамику сосудов с жидкостью / И.Б. Богоряд, И.А. Дружинин, Г.З. Дружинина, Э.Е. Либин. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1977. 143 с.
4. *Пожалостин А.А.* Свободные колебания жидкости в жестком круговом цилиндрическом сосуде // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника, 1963. №3. С. 25–32.
5. *Сретенский Л.Н.* Теория волновых движений жидкости. М.: Наука, 1977. 816 с.

## References

1. *Kochin N.E., Kibel I.A., Roze N.V.* Theoretical Fluid Mechanics, 1963. 584 p.
2. *Tikhonov A. N., Samarskii A. A.* Equations of mathematical physics. Moscow, Nauka publ., 1977. 742 p.

3. *Bogoryad I. B., Druzhinin I. A., Druzhinina G. Z., Libin E. E.* Introduction to the dynamics of vessels with a liquid. Tomsk. TSU publ., 1977, 143 p.

4. *Pozhalostin A. A.* Free oscillations of a liquid in a rigid circular cylindrical vessel, *Izvestia vishih uchebnykh zavedenii. Aviacionnaya tehnika*, 1963, no 3. Pp. 25–32.

5. *Sretenskii L. N.* Theory of wave motions of a fluid, Moscow, Nauka Publishing House, 1977, 816 p.

## ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ ЛОКАЛЬНО-ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОГО ОБЪЕМА КОМПОЗИТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА

**А.В. Ветрова, Ю.Н. Сидоренко**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
aniuta-vetrova@mail.ru

**Ключевые слова:** композит, эффективные свойства, локальная представительность, корреляция.

**Аннотация.** Рассматривается проблема оценки эффективных механических свойств композиционных материалов. Решение данной задачи может быть получено путем исследования представительной выборки локальных свойств материала. Значения локальных свойств могут определяться по результатам моделирования поведения объемов материала, обладающих свойством локальной представительности. В работе предлагается методика определения размеров локально-представительных объемов композита, основанная на анализе корреляционных связей между параметрами его структуры армирования. В основе методики лежит принцип локальности/формирования механических свойств композита. Результаты работы показывают, что вид корреляционной связи зависит от типа армирования. Также показано, что предложенная методика позволяет находить размеры локально-представительных объемов для любого типа армирования композита.

## ESTIMATION OF THE SIZE OF A LOCALLY REPRESENTATIVE COMPOSITE VOLUME USING CORRELATION ANALYSIS METHODS

**A. Vetrova, Yu. Sidorenko**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
aniuta-vetrova@mail.ru

**Keywords:** composite, effective properties, local representativeness, correlation.

**Abstract.** The problem of evaluating the effective mechanical properties of composite materials is considered. The solution to this problem can be obtained by studying a representative sample of the local properties of the material. The values of local properties can be determined by modeling the behavior of volumes of material with the property of local repre-

sentativeness. The paper proposes a methodology for determining the size of locally representative volumes of a composite, based on an analysis of the correlation between the parameters of its reinforcement structure. The methodology is based on the principle of locality / formation of the mechanical properties of the composite. The results of the work show that the type of correlation depends on the type of reinforcement. It is also shown that the proposed method allows one to find the sizes of locally representative volumes for any type of composite reinforcement.

Одной из основных задач механики композиционных материалов является оценка эффективных свойств композита на основе данных о механических свойствах его компонентов и параметрах структуры армирования. Такая задача часто решается путем компьютерного моделирования поведения некоторого объема материала при специальном образе заданных условиях внешнего воздействия. При этом величина моделируемого объема должна быть достаточно большой с тем, чтобы полученные результаты моделирования могли быть отнесены именно к материалу, а не к отдельно взятому объему, характеризующемуся уникальной конфигурацией образующих его элементов армирования. Подобные объемы принято называть «представительными элементами объема». Примеры решения подобных задач можно найти в работах [1–3].

**Цели и задачи исследования.** Следует отметить, что при проведении подобных исследований особое внимание должно уделяться обоснованию выбора того или иного объема материала в качестве представительного. В некоторых случаях, например, для регулярно армированных материалов, выбор представительного объема может быть сделан вполне определенным образом – размеры такого объема должны быть кратны размерам ячейки периодичности структуры армирования. В других случаях, как, например, для хаотически армированных материалов, выбор размеров представительного объема представляет собой отдельную специфическую задачу исследования композита.

Как показано в работе [4], моделирование представительного объема композита с целью определения эффективных механических характеристик материала может быть заменено исследованием статистически представительной выборки его локальных механических свойств. Процедуру определения локальных механических свойств композита в случайно выбранных точках можно рассматривать как последовательность повторных независимых экспериментов, проводимых для определения частных реализаций некоторой случайной величины (той или иной механической характеристики). Известно, что в том случае, когда случайный характер наблюдаемой величины обусловлен совместным влиянием ряда независимых неконтролируемых факторов, совокупность наблюдаемых значений подчиняется нормальному (гауссовому) распределению. Таким образом, исследование выборки локальных свойств дает возможность оценивать не толь-

ко средние значения тех или иных механических характеристик материала, но и их отклонения от средних значений.

**Методология решения задачи.** Оценка локальных свойств, в свою очередь, требует определения размеров объемов материала, обладающих свойством представительности именно в отношении его локальных свойств. В связи с этим представляется полезным использование понятия локально-представительного элемента объема композита. В данной работе обсуждается подход к выбору размеров локально-представительных объемов композита, основанный на анализе корреляционных связей между параметрами его структуры армирования.

Решение задачи получено в двумерной постановке. Для описания структуры армирования материала используется идеализированная геометрическая модель плоского сечения представительного объема композита, которая представляет собой ограниченную плоскую фигуру, заполненную элементами, имитирующими включения. Полагается, что все включения имеют идеальную круговую форму. Методика построения геометрической модели позволяет задавать требуемые значения объемного содержания армирующих элементов ( $C$ ), параметры распределения размеров армирующих элементов  $C_d(d)$  и некоторые другие характеристики.

Методика оценки размеров локально-представительного размера объема композита основывается на принципе локальности, согласно которому корреляционные связи между различными параметрами сохраняются лишь на небольших расстояниях. В данной работе исследуется зависимость корреляционной связи между локальными значениями объемного содержания армирующих элементов композита от размеров локальных объемов материала. Для установления характера данной связи для каждого размера формируется выборка локальных объемов, расположение которых в пределах представительного объема материала выбирается случайным образом. Для построенной таким образом выборки формируется выборка смежных объемов путем сдвига исходной выборки. Корреляционная связь между построенными выборками характеризуется коэффициентом корреляции объемных содержаний армирующих элементов в смежных локальных объемах модельной структуры композита  $R$ :

$$R = \frac{\sum C_1 C_2 - \frac{\sum C_1 \times \sum C_2}{n}}{\sqrt{\left[ \sum C_1^2 - \frac{(\sum C_1)^2}{n} \right] \times \left[ \sum C_2^2 - \frac{(\sum C_2)^2}{n} \right]}}$$

Здесь  $C_1, C_2$  – выборки локальных значений объемного содержания армирующих частиц ( $C$ ) при заданном размере локальных объемов материала.

Изложенная выше методика исследования корреляционных связей была апробирована на модельных структурах армирования с существенно раз-

ными типами размещения армирующих элементов в пределах представительного объема – регулярным с ячейкой периодичности в форме квадрата и хаотическим. Объемное содержание армирующих элементов для обоих типов армирования принималось одинаковым и равным 30%.

**Результаты исследования.** Полученные корреляционные функции оказались существенно разными. Для материала с регулярным армированием корреляционная функция характеризуется пилообразной формой, причем локальные экстремумы функции практически точно соответствуют размерам локальных объемов, кратным размеру ячейки периодичности. Для хаотически армированного материала корреляционная функция характеризуется почти монотонным убыванием с ростом размеров локальных объемов. Кроме того, отличительной чертой корреляционной функции хаотически армированного материала является наличие двух ярковыраженных участков. На первом участке, соответствующем области малых значений моделируемых объемов, наблюдается быстрое убывание корреляционной функции с ростом величины объема. На втором участке имеет место более медленное немонотонное убывание корреляционной функции с ростом размеров локальных объемов. Размеры локальных объемов, в интервале которых происходит изменение характера поведения корреляционной функции, могут быть приняты в качестве размеров локально-представительных объемов.

**Выводы.** Как показывают полученные результаты, предложенная методика, основанная на методах корреляционного анализа, позволяет находить размеры локально-представительных объемов для любого типа армирования композита.

### Литература

1. Development of an RVE and its stiffness predictions based on mathematical homogenization theory for short fibre composites / K.P. Babu, P.M. Mohite, C.S. Upadhyay // *International Journal of Solids and Structures*. 2018. Vol. 130–131, № 1. Pp. 80–104.
2. Aspects of computational homogenization in magneto-mechanics: Boundary conditions, RVE size and microstructure composition / R. Zabihyan, J. Mergheim, A. Javili, P. Steinmann // *International Journal of Solids and Structures*. 2018. Vol. 130–131, № 1. Pp. 105–121.
3. Белов Д.А. Метод "локальных гетерогенизаций" для восстановления микронапряжений в композитах / Д.А. Белов, А.И. Боровков // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2008. №6. С. 44–50.
4. Советова Ю.В., Сидоренко Ю.Н., Скрипняк В.А. Многоуровневый подход к определению эффективных свойств композита с учетом повреждаемости // *Физ. мезомех.* 2013. Т. 16. № 5. С. 59–65

### References

1. Development of an RVE and its stiffness predictions based on mathematical homogenization theory for short fibre composites / K.P. Babu, P.M. Mohite, C.S. Upadhyay. Vol. 130–131, 2018. Pp. 80–104.

2. Aspects of computational homogenization in magneto-mechanics: Boundary conditions, RVE size and microstructure composition / R. Zabihyan, J. Mergheim, A. Javili, P. Steinmann. Vol. 130–131, 2018. Pp. 105–121.

3. *Belov D.A.* The method of "local heterogenization" for the restoration of microstresses in composites Text. / YES. Belov, A.I. Borovkov // Scientific and Technical Journal of St. Petersburg State Polytechnical University. Vol. 6, 2008. Pp. 44–50.

4. *Sovetova Yu.V., Sidorenko Yu.N., Skripnyak V.A.* A multilevel approach to determining the effective properties of a composite taking into account damageability / Physical mesomechanics. Vol. 16, 2013. Pp. 59–65.

## РАСЧЕТ УЧАСТКА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОТОКА ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ

**Д.Н. Гарбузов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
dmitrij.garbuzov.98@mail.ru

**Ключевые слова:** участок стабилизации, вязкая жидкость, стационарное течение, процедура SIMPLE, метод контрольных объемов.

**Аннотация.** В работе рассматривается стационарное течение вязкой жидкости в осесимметричной трубе в изотермических условиях. Математическая постановка задачи включает уравнения Навье–Стокса и уравнение неразрывности, записанные в безразмерном виде в цилиндрической системе координат. Вязкие свойства жидкости описываются реологической моделью Ньютона. Для решения поставленной задачи используется метод контрольных (конечных) объёмов и корректирующая процедура SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations). В результате проведённых расчётов получены характерные распределения скорости и давления. Построены зависимости длины участка гидродинамической стабилизации от числа Рейнольдса.

## CALCULATION OF A CALMING LENGTH OF A VISCOUS FLUID FLOW IN A PIPE

**D. Garbuzov**

National research Tomsk State University, Russian Federation  
dmitrij.garbuzov.98@mail.ru

**Keywords:** calming length, viscous fluid, stationary flow, SIMPLE algorithm, control volume method.

**Abstract.** This paper deals with a stationary flow of a viscous fluid in an axisymmetric pipe under isothermal conditions. Mathematical formulation of the problem includes the dimensionless Navier-Stokes and continuity equations written in a cylindrical coordinate system. The viscous properties of the fluid are described by Newton's rheological model. To solve the problem, the method of control (finite) volumes and the SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) algorithm are used. As a result of the calculations, the

velocity and pressure distributions are obtained. The dependences of the calming length on the Reynolds number are plotted.

В рамках современного этапа развития промышленности, например, пищевой, металлургической, нефтегазовой, химической и машиностроительной, течения вязкой жидкости в осесимметричных трубах является актуальной темой для исследований, результаты которых важны не только с научной, но и с практической точки зрения. Информация о кинематических и динамических характеристиках течения вязких жидкостей необходима при конструировании многих технических элементов. Известно, что не во всех случаях удаётся получить точное аналитическое решение задачи о рассматриваемом течении. Это обусловлено наличием нелинейных дифференциальных уравнений в математической постановке задачи. Для их решения используют численные методы, которые совместно с экспериментальными данными позволяют с определенной точностью получить основные характеристики течения вязкой жидкости.

В работе рассматривается стационарное течение вязкой несжимаемой жидкости в осесимметричной трубе в изотермических условиях. В качестве реологического закона используется закон Ньютона. Основу математической постановки задачи составляет система, состоящая из уравнений Навье–Стокса и уравнения неразрывности, записанных в безразмерном виде в цилиндрической системе координат. Для получения численного решения задачи введенную систему уравнений необходимо дополнить соответствующими граничными условиями. Жидкость, подаваемая в трубу, характеризуется однородным профилем скорости, что определяет граничное условие во входном сечении. На выходе выполняется мягкие граничные условия. На стенках трубы используется условие прилипания, на оси – условие симметрии. Для решения поставленной задачи используется метод контрольных (конечных) объёмов и корректирующая процедура SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations).

Суть данной процедуры заключается в следующей последовательности действий: задается приближенное поле давления, решаются уравнения количества движения, решаются уравнения для поправки давления, рассчитывается истинное давление, на основе полученных поправок скорости вычисляется поле скорости. Для записи дискретных аналогов исходных дифференциальных уравнений в области течения строится расчетная сетка, которая, в соответствии с используемым методом, разбивается на конечное число контрольных объёмов так, что каждая узловая точка располагается в одном контрольном объеме. Далее проводится процедура интегрирования полученных уравнений в дискретном виде по выделенным контрольным объемам. Для решения поставленной задачи необходимо задать такое поле давления, которое обеспечит соответствие найденных полей скорости уравнению неразрывности. В результате выполненных расчетов получено

характерное распределение скорости и давления для течения вязкой несжимаемой жидкости в осесимметричной трубе. На основе этих данных построены зависимости длины участка гидродинамической стабилизации от безразмерного параметра Рейнольдса. Показано качественное и количественное совпадение результатов с результатами аналогичных исследований других авторов.

### Литература

1. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. М.: Наука. 1973. 847 с.
2. *Патанкар С.В.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С.В. Патанкар. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
3. *Янков В.И., Боярченко В.И., Перадчук В.П., Глот И.О., Шакиров Н.В.* Переработка волокнообразующих полимеров. Основы и течение полимеров в каналах. Москва; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2008. 264 с.
4. *Бартеньев О.В.* Современный Фортран. М.: ДИАЛОГ–МИФИ, 2000. 449 с.

### References

1. *Loitsyansky L.G.* Mechanics of liquid and gas / L.G. loitsyansky. M.: Nauka. 1973. 847 p.
2. *Patankar S.V.* Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 152 p.
3. *Yankov V.I., Boyarchenko V.I., Pervadchuk V.P., Glot I.O., Shakirov N.V.* Processing of fiber-forming polymers. Bases and structure of polymers in channels. Moscow; Izhevsk: SIC "Regular and chaotic dynamics", Institute of computer research, 2008. 264 p.
4. *Bartenev O.V.* Modern Fortran. Moscow: DIALOG–MEPHI, 2000. 449 p.

## МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

**М.Н. Данилов, П.П. Бардаев**

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)  
ООО «Бриз», Россия  
danilov@sibstrin.ru

**Ключевые слова:** структурно-неоднородные среды, бетон, тензор деформации Коши–Грина, тензодатчик деформаций, экстензометр.

**Аннотация.** Работа посвящена проблеме математического описания и измерения деформаций структурно-неоднородных сред при экспериментальном изучении процессов деформирования и разрушения материалов типа бетона. Для решения большинства инженерных задач требуется знать величины макродеформаций – деформаций, усредненных по некоторой области пространства, описываемых тензором Коши–Грина. Любой датчик деформаций измеряет усредненные деформации, однако усреднение часто

выполняется некорректно, так как не учитывается структурная неоднородность материала. Предложен способ измерения деформации поверхности конструкций из структурно-неоднородных материалов типа бетона, позволяющий проводить измерения при условии, что вид напряженно-деформированного состояния в месте замера деформации заранее неизвестен и меняется с течением времени. Корректная процедура усреднения деформаций обеспечивает адекватность результатов измерения и обеспечивает применимость способа при наличии неоднородностей различных типов – включений, трещин и других особенностей структуры материала. Способ может быть использован как основа для создания экстензометров специального типа.

## STRAIN MEASUREMENT METHOD OF HETEROGENEOUS MATERIALS

**M. Danilov, P. Bardaev**

Novosibirsk State University of materials Architecture and Civil engineering (Sibstrin),  
Russian Federation  
“Breez” Company  
danilov@sibstrin.ru

**Keywords:** inhomogeneous media, heterogeneous media, homogenization, concrete, Cauchy–Green strain tensor, strain gauge, extensometer.

**Abstract.** The work is devoted to the problem of mathematical description and measurement of deformations of structurally inhomogeneous media in the experimental study of the processes of deformation and fracture of materials such as concrete. To solve most engineering problems, it is necessary to know the magnitudes of macrostrains – strains averaged over a certain area of space described by the Cauchy–Green tensor. Any strain gauge measures averaged strains, however, averaging is often performed incorrectly, since the structural heterogeneity of the material is not taken into account. A method is proposed for measuring the surface deformation of structures made of structurally heterogeneous materials such as concrete, which makes it possible to carry out measurements provided that the form of the stress-strain state at the place of measurement of deformation is unknown in advance and changes over time. The correct deformation averaging procedure ensures the adequacy of the measurement results and ensures the applicability of the method in the presence of heterogeneities of various types - inclusions, cracks and other features of the material structure. The method can be used as the basis for creating special type extensometers.

Открытой научной проблемой является математическое описание деформаций структурно-неоднородной среды. При размере области интереса меньшем, либо равным характерному размеру неоднородности (микромасштабный уровень [1]), описание деформации производится с учетом геометрии структуры. В случае, когда размер области интереса превышает характерный размер неоднородности (макромасштабный уровень), описание деформации среды производится без учета геометрии структуры. Деформация усредняется по некоторой области пространства, являющейся, по сути, представительным элементом объема материала (минимальный

объем, который можно наделить осредненными механическими свойствами макрообъема). Однако для хрупких разупрочняющихся сред представительного элемента объема не существует.

Для описания деформации классической сплошной среды используется, например, тензор деформации Коши–Грина. Однако в случае нарушения сплошности среды (образования трещин), либо в случае структурно-неоднородной среды (граница раздела фаз) поля перемещений и деформаций становятся разрывными и, соответственно, недифференцируемыми по пространству. Поэтому при моделировании процессов деформирования дискретно-континуальных сред используются псевдодифференциальные операторы и интегральные операторы Фурье [2].

Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния конструкций из структурно неоднородных материалов осложнено тем, что поля напряжений и деформаций на поверхности конструкций существенно неоднородны. Большие градиенты деформаций, обусловленные неоднородностью структуры материала, являются главной проблемой при измерении деформаций.

В процессе деформирования происходит не только изменение величины деформаций, но и изменение вида напряженно-деформированного состояния (растяжение, сжатие, сдвиг). Большинство существующих средств измерения деформаций обеспечивают корректность результата измерения только при ориентации измерительного элемента в направлении деформации растяжения-сжатия, то есть вид напряженного состояния должен быть известен заранее. Однако часто невозможно предсказать, как будет меняться напряженно-деформированное состояние сооружения в процессе его эксплуатации, при этом необходимо вести мониторинг его состояния в течение длительного времени с использованием датчиков постоянного действия.

Для решения большинства инженерных задач требуется знать величины макродеформаций – деформаций, усредненных по некоторой области пространства, описываемых тензором Коши–Грина. Любой датчик деформаций измеряет усредненные деформации, однако усреднение часто выполняется некорректно. Таким образом, без учета структурной неоднородности материала невозможно создавать датчики, позволяющие с приемлемой погрешностью измерять деформации конструкций из структурно-неоднородных материалов.

Предлагается следующий способ измерения деформации поверхности конструкций из структурно-неоднородных материалов. В некоторой области интереса на поверхности конструкции выбирается точка, с которой будет ассоциироваться усредненная по некоторой области  $\Omega$  пространства деформация. Форма области  $\Omega$  принимается круглой; центр области совпадает с выбранной точкой. Граница  $\Gamma$  области  $\Omega$  имеет диаметр равный размеру представительного элемента объема материала. Выполняется дискре-

тизация границы  $\Gamma$  области  $\Omega$  – на границе выделяется конечное число точек, расположенных на равном удалении друг от друга, и выполняется измерение их перемещений.

Вычисление компонент тензора деформации Коши–Грина ( $\varepsilon_{11}$ ,  $\varepsilon_{12}$ ,  $\varepsilon_{21}$ ,  $\varepsilon_{22}$ ) выполняется по формулам [3, 4], аналогичным формулам для коэффициентов ряда Фурье:

$$\varepsilon_{11} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \varepsilon_n(\varphi) \cdot (3 - 4 \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\varphi)) \cdot d\varphi,$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \varepsilon_n(\varphi) \cdot (3 - 4 \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(\varphi)) \cdot d\varphi,$$

$$\varepsilon_{12} = \varepsilon_{21} = \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} \varepsilon_n(\varphi) \cdot \cos(\varphi) \cdot \sin(\varphi) \cdot d\varphi,$$

где  $\varepsilon_n(\varphi) = \frac{u_n(\varphi)}{R}$  – нормальная компонента вектора деформации;  $u_n$  – нормальная компонента вектора перемещения;  $R$  – радиус области  $\Omega$ ;  $\varphi$  – угол.

Предложенный способ измерения деформаций поверхности конструкций из структурно-неоднородных материалов обеспечивает адекватность результатов и может применяться при наличии неоднородностей различных типов – включений, трещин и других особенностей структуры материала. Способ может быть использован как основа для создания экстензометров специального типа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-31-00103.

### Литература

1. Панин В.Е. Основы физической мезомеханики // Физическая мезомеханика. 1998. № 1. С. 5–22.
2. Treves J.F. Introduction to Pseudodifferential and Fourier Integral Operators. New York, Springer, 1980, 299 p.
3. Danilov M.N., Bardaev P.P. Structural-phenomenological stress-strain model for concrete // Proceedings of the XXVI Conference on Numerical Methods for Solving Problems in the Theory of Elasticity and Plasticity (EPPS2019) (Russia, Tomsk, 24–28 Jun., 2019): EPJ Web of Conferences. – EPJ Publishing. 2019. No. 01014 (221). Pp. 1–15.
4. Bazant Z.P., Oh B.H. Microplane Model for Progressive Fracture of Concrete and Rock // Journal for Engineering Mechanics. 1985. Vol. 111. Pp. 559–582.

## References

1. *Panin V.E.* Foundations of physical mesomechanics // Physical mesomechanics. 1998. No. 1. Pp. 5–22.
2. *Treves J.F.* Introduction to Pseudodifferential and Fourier Integral Operators. New York, Springer, 1980, 299 p.
3. *Danilov M.N., Bardaev P.P.* Structural-phenomenological stress-strain model for concrete // Proceedings of the XXVI Conference on Numerical Methods for Solving Problems in the Theory of Elasticity and Plasticity (EPPS2019) (Russia, Tomsk, 24–28 Jun., 2019): EPJ Web of Conferences. – EPJ Publishing. 2019. No. 01014 (221). Pp. 1–15.
4. *Bazant Z.P., Oh B.H.* Microplane Model for Progressive Fracture of Concrete and Rock // Journal for Engineering Mechanics. 1985. Vol. 111. Pp. 559–582.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕЦЕНТРЕННОГО РАСТЯЖЕНИЯ КОМПАКТНОГО ОБРАЗЦА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ

Д.Б. Даутбаева<sup>1</sup>, В.В. Титков<sup>2</sup>, А.А. Козулин<sup>1,2</sup>

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

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

dtbv2018@gmail.com

**Ключевые слова:** численные методы, трещиностойкость, деформация, параметр разрушения, математическое моделирование, компактный образец.

**Аннотация.** В работе численными методами решена задача о внецентренном растяжении компактного образца с трещиной. Результаты численного моделирования предложено использовать при настройке и тестировании оригинального программного комплекса для измерения деформации материалов оптическими методами. В итоге программными средствами получены значения параметров разрушения, совпадающие с экспериментальными данными. Предложенная методика тестирования позволила избежать проблем с определением погрешности от качества расчёта оптического потока при верификации.

## MODELING OF AN ECCENTRIC STRETCH OF A COMPACT SPECIMEN TO DETERMINE THE PARAMETERS OF FRACTURE RESISTANCE

D. Dautbayeva<sup>1</sup>, V. Titkov<sup>2</sup>, A. Kozulin<sup>1,2</sup>

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

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

dtbv2018@gmail.com

**Keywords:** numerical methods, fracture resistance, deformation, fracture parameter, numerical simulation, compact sample.

**Abstract.** The problem of eccentric tension of a compact specimen with a crack is solved by numerical methods. The results of numerical modeling are proposed to be used when setting up and testing the original software for measuring deformation of materials by optical methods. As a result, the software obtained the values of fracture parameters that coincide with the experimental data. The proposed method of testing has allowed to avoid problems with determination of the error from the quality of the optical flow calculation during verification.

В настоящее время существуют различные методы использования оптической регистрации деформации и разрушения [1]. Аппаратные комплексы, использующие цифровые технологии корреляции оптических изображений основаны на фиксации изменений в некоторой статической области, положение которой в процессе проведения эксперимента неизменно. Одним из перспективных направлений при создании подобных комплексов является развитие алгоритмов детектирования растущих трещин из оптических изображений с изменением области наблюдения в реальном времени [2, 3]. Дополнительно, по полученным изображениям требуется определять изменения параметров трещиностойкости материала конструкции для прогнозирования оставшегося ресурса в условиях эксплуатации [4, 5].

Целью работы являлась разработка методики верификации программного алгоритма, подготовленного для анализа оптических изображений, определения напряженно-деформированного состояния и параметров трещиностойкости материалов.

Для выполнения поставленной цели проведен вычислительный эксперимент по внецентренному растяжению компактного образца, с предварительно наведенной трещиной, повторяющий условия натурального эксперимента. Численное моделирование проводилось с использованием подходов механики сплошных сред и теории механики разрушения. Задача решалась методом конечных элементов в плосконапряженном приближении в лагранжевой постановке. При описании механического поведения материала использовалась полилинейная аппроксимация упругопластического течения с изотропным упрочнением алюминиевого сплава Д16. Используемые экспериментальные деформационные диаграммы получены авторами при одноосном растяжении плоских образцов из рассматриваемого сплава.

Итогом вычислительного эксперимента являются значения параметров, характеризующих трещиностойкость материала, поля напряжений и деформаций в виде отдельных цифровые массивов, содержащих компоненты соответствующих величин каждого расчетного узла для обработки специализированными программными комплексами.

Алгоритм нахождения параметров разрушения при обработке изображений основан на слежении за перемещениями массивов реперных точек в области раскрытия трещины. В качестве идеального примера для верификации созданного алгоритма предложено применить в роли исследуемого поля точек узлы сеточной модели и их перемещения, полученные в резуль-

тате численного решения задачи о внецентренном растяжении компактного образца с трещиной.

В результате проведенной настройки алгоритма программными методами рассчитаны изменения значения  $J$ -интеграла и коэффициента интенсивности напряжений  $K_{Ic}$  в зависимости от приложенной нагрузки. Полученные значения с удовлетворительной точностью совпадают с экспериментальными результатами.

Преимущество предложенного метода верификации созданного алгоритма и настройки оптимальной дискретизации векторных полей искомых величин состоит в независимости решения от качества обработки оптического потока, что позволяет сфокусировать работу по отладке аппаратного комплекса только на математических методах и программном коде.

### Литература

1. *Gonzalez R.C., Woods R.E.* Digital Image Processing. Upper Saddle River, USA: Prentice Hall. 2002. 793 p.

2. *Panin S.V., Chemezov V.O., Lyubutin P.S., Titkov V.V.* Algorithm of fatigue crack detection and determination of its tip position in optical images // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2017. Vol. 53. № 3. Pp. 237–244.

3. *Sunder R., Biakov A., Eremin A., Panin S.* Synergy of crack closure, near-tip residual stress and crack-tip blunting in crack growth under periodic overloads – A fractographic study // International Journal of Fatigue. 2016. 93(1). Pp. 18–29.

4. *Степанова Л.В.* Уточненный расчет напряженно-деформированного состояния у вершины трещины в условиях циклического нагружения в среде с поврежденностью // Вестник. СамГУ. Естественно-научная серия. 2011. 2(83). Pp. 105–115.

5. *Тутков В.В., Панин С.В., Ерёмин А.В., Любутин П.С., Козулин А.А.* Практическое применение алгоритм расчета  $J$ -интеграла по данным определения оптического потока при механических испытаниях материалов // Международный междисциплинарный симпозиум "Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций". Тезисы докладов International Workshop, Международной конференции и VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 50-летию основания института химии нефти. 2019. С. 490–491.

### References

1. *Gonzalez R.C., Woods R.E.* Digital Image Processing. Upper Saddle River, USA: Prentice Hall. 2002. 793 p.

2. *Panin S.V., Chemezov V.O., Lyubutin P.S., Titkov V.V.* Algorithm of fatigue crack detection and determination of its tip position in optical images // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2017. Vol. 53. № 3. Pp. 237–244.

3. *Sunder R., Biakov A., Eremin A., Panin S.* Synergy of crack closure, near-tip residual stress and crack-tip blunting in crack growth under periodic overloads – A fractographic study // International Journal of Fatigue. 2016. 93(1). Pp. 18–29.

4. *Stepanova, L.V.* Accurate calculation of the stress-strain state at a crack top under the cyclic loading conditions in the damaged medium // Vestnik. SamGU. Natural-scientific series (in Russian) // Vestnik. 2011. 2(83). Pp. 105–115.

5. *Titkov V.V., Panin S.V., Eryomin A.V., Lyubutin P.S., Kozulin A.A.* Practical Application of the Calculation Algorithm for J-Integral Based on Optical Flow Determination Data for Mechanical Testing of Materials // International Interdisciplinary Symposium "Hierarchical Materials: Development and Applications for New Technologies and Reliable Structures" Abstracts of the International Workshop, International Conference and VIII All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation devoted to the 50th Anniversary of the Institute of Chemistry of Petroleum. 2019. Pp. 490–491.

## **СОПРЯЖЕННАЯ ЗАДАЧА ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ, РАСПОЛОЖЕННОМ В ДЕФОРМИРУЕМОМ ТВЕРДОМ ТЕЛЕ**

**А.П. Жуков, С.В. Белов, С.В. Пономарев**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
zh@niipmm.tsu.ru

**Ключевые слова:** сопряженная задача, условия сопряжения, подвижная граница.

**Аннотация.** В данной работе представлен алгоритм решения сопряженной задачи для системы жидкость – деформируемое твердое тело. Сопряженная задача разделяется на подзадачи, которые соответствуют компонентам сопряженной системы. Для решения подзадач используются независимые программные модули, рассматриваемые как «черные ящики». Программные модули связаны условиями сопряжения, которые реализуются в виде процедуры обмена данными. Границы области, занимаемой жидкостью, рассматриваются как дискретно подвижные. В течение шага интегрирования по времени они неподвижны, перед началом следующего шага по времени их положение корректируется. Результаты численных расчетов с применением данного алгоритма хорошо согласуются с аналитическими решениями и экспериментами.

## **CONJUGATE PROBLEM FOR FLUID FLOW IN A CHANNEL LOCATED IN A DEFORMABLE SOLID**

**A. Zhukov, S. Belov, S. Ponomarev**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
zh@niipmm.tsu.ru

**Keywords:** conjugate problem, conjugate conditions, moving boundary.

**Abstract.** Conjugate problem for fluid flow in a channel located in a deformable solid. This research describes the numerical conjugate problem solution algorithm for a fluid-deformable body system. It is based on respective subtasks according to physical principals. To solve these subtasks, independent “black box” program modules are used. These modules are connected by conjugate conditions. Fluid phase domain boundary interface is discrete movable i.e. it is not movable on the integration time step, but its position is adjusted on the next time step.

Задачи, в которых рассматривается взаимодействие потока жидкости или газа с деформируемым твердым телом относятся к типу сопряженных задач [1]. При этом существуют, по крайней мере, две области пространства, заполненные различными физическими средами: первая – газом или жидкостью; вторая – твердым деформируемым материалом. Эти среды взаимодействуют на общей границе, что математически формулируется в виде условий сопряжения, представляющие условия неразрывности скоростей, сил, температур, тепловых потоков и т.д. При этом граница раздела сред может перемещаться и деформироваться, что должно учитываться при постановке задачи.

При решении сопряженной задачи основной проблемой является расчет поля течения жидкости с учетом движения границ расчетной области. В современных подходах к решению задач течения в областях с подвижными границами учет движения границ происходит на уровне собственно численного метода. В связи с этим можно отметить получившие большое распространение ALE (Arbitrary Lagrangian–Eulerian) методы, использующие комбинацию описаний Лагранжа и Эйлера [2]. Однако большинство численных методов, применяемых при расчете полей течений, развивались в предположении неподвижности границ (Эйлерово описание) и, на основе этих методов было разработано немало успешно работающих вычислительных программ. Их использование для решения задач с подвижными границами возможно, если предположить, что за малый промежуток времени  $dt$  изменением формы подвижной границы можно пренебречь, а движение границы учитывать через постановку граничных условий в виде эквивалентного вдува газа или жидкости.

Для определения напряженно-деформированного состояния твердой фазы используется Лагранжево описание, которое учитывает движение границы расчетной области естественным образом.

Таким образом, сопряженная задача разделяется на подзадачи, связанные между собой условиями сопряжения. Отдельные подзадачи решаются с использованием существующих вычислительных программ. Такие вычислительные модули рассматриваются как «черные ящики», на входы которых подаются данные о геометрии и структуре пространственных сеток, физико-механических характеристиках фаз, начальных и граничных условиях в момент времени  $t$ , а на выходе получают результаты, описывающие состояния фаз в момент времени  $t+dt$ . Важно, что в программном модуле для жидкой фазы используется подход Эйлера. Условия сопряжения реализуются в виде процедуры обмена данными между программными модулями.

Если движение границы твердой фазы является непрерывным, то граница жидкой фазы рассматривается как дискретно подвижная. Это означает, что на отдельном временном шаге положение границы фиксировано, а ее движение заменяет эквивалентный вдув жидкости с границы. Пусть при

этом в жидкую область втекает дополнительная масса жидкости, что приводит к нарушению законов сохранения. Новое положение границы жидкой области определяется по результатам расчетов геометрии твердого тела и условиям сопряжения. Переход в новое положение происходит скачком, без промежуточных состояний. При этом баланс массы в жидкой области восстанавливается, так как избыточная масса жидкости оказывается за пределами области.

После корректировки положения границы выполняется корректировка положения внутренних узлов сетки, покрывающей область занимаемой жидкостью, для исключения чрезмерного искажения сетки. При ограниченных перемещениях твердого тела корректировка положения узлов выполняется на основе решения эллиптических уравнений. При больших перемещениях необходимы перестроение сетки. После этого решение задачи интерполируется со старой сетки (момент времени  $t$ ) на новую сетку (момент времени  $t+dt$ ).

Частным случаем сопряженной задачи можно считать задачу о взаимодействии жидкости или газа с недеформируемым твердым телом, которое движется по заданному закону. В этом случае отпадает необходимость в определении напряженно-деформированного состояния твердого тела.

Для проверки работоспособности изложенного выше подхода к решению сопряженных задач решались следующие тестовые задачи:

- сжатие газа в цилиндре движущимся поршнем;
- течение вязкой жидкости в плоском канале с подвижной стенкой [3, 4];
- гидроудар в длинной трубе круглого сечения [5].

В первой задаче выполнялась проверка закона сохранения массы. Во второй – преобладали вязкие эффекты. Кроме того, две первых задачи являлись задачами с подвижными границами, для которых заданы законы движения. В третьем случае сопряженная задача решалась в полном объеме.

Полученные результаты численных расчетов показали удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными и результатами аналитических расчетов.

### Литература

1. *Kumar M., Kuo K.K.* Effect of deformation on flame spreading and combustion in propellant cracks // *AIAA Journal*, 1981. Vol. 19, No.12. Pp. 1580–1589.
2. *Engel M., Griebel M.* Flow simulation on moving boundary-fitted grids and application to fluid-structure interaction problems // *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 2006. Vol. 50, No. 4. Pp. 437-468.
3. *Ralph M.E., Pedley T.J.* Flow in a channel with a moving indentation // *J. Fluid Mech.* 1988. Vol. 190. Pp. 87–112.
4. *Tony W.H. Sheu, Y.H. Chen* Numerical study of flow field induced by a locomotive fish in the moving meshes // *Int. J. Numer. Meth. Engrg.* 2007. Vol. 69. Pp. 2247–2263.
5. *Вильнер Я.М., Ковалев Я.Т., Некрасов Б.Б.* Справочное пособие по гидравлике,

гидромашинам и гидроприводам / под ред. Б.Б. Некрасова. Минск: Выш. шк., 1976, 416 с.

### References

1. *Kumar M., Kuo K.K.* Effect of deformation on flame spreading and combustion in propellant cracks // *AIAA Journal*, 1981, Vol. 19, No.12. Pp. 1580–1589.
2. *Engel M., Griebel M.* Flow simulation on moving boundary-fitted grids and application to fluid-structure interaction problems // *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 2006. Vol. 50, No. 4. Pp. 437-468.
3. *Ralph M.E., Pedley T.J.* Flow in a channel with a moving indentation // *J. Fluid Mech.* 1988. Vol. 190. Pp. 87–112.
4. *Tony W.H. Sheu Y.H. Chen* Numerical study of flow field induced by a locomotive fish in the moving meshes // *Int. J. Numer. Meth. Engrg.* 2007. Vol. 69. Pp. 2247–2263.
5. *Vil'ner Y.M., Kovalev Y.T. and Nekrasov B.B.* 1976 Spravochnoe posobie po gidravlike, gidromashinam i gidroprivodam / ed B B Nekrasov (Minsk: Vyshejsh. shkola). 416 p. (in Rus.).

## РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБЛАЧНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ БПЛА САМОЛЕТНОГО ТИПА

**А.М. Кагенов, К.В. Костюшин, С.А. Орлов, Н.О. Костюшина,  
С.А. Проханов**

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

**Ключевые слова:** OpenFOAM, газовая динамика, CFD, БПЛА.

**Аннотация.** В этой статье приведены результаты разработки облачной системы для проведения многопараметрических аэродинамических расчетов БПЛА. Разработанная платформа состоит из следующих функциональных частей: клиент – обеспечивает доступ к вычислительному облаку и позволяет в интерактивном режиме подготавливать задачу, отправлять подготовленные данные на вычислительный кластер, получать и визуализировать результаты расчетов; вычислительное облако – предоставляется на время решения задачи и обеспечивает взаимодействие с клиентами посредством открытого API, и управляет вычислительным процессом. Вычислительный процесс платформы основан на использовании открытых технологий пакета OpenFOAM, адаптированного для решения задач аэродинамики [1]. Проведены параметрические исследования внешнего обтекания БПЛА при скоростях набегающего потока 20, 25, 30 м/с с углами атаки 0–30 градусов. Платформа обеспечивает возможность проводить вычислительные эксперименты без необходимости установки специализированного аппаратного и программного обеспечения на рабочем месте конечного потребителя, что позволяет изолировать пользователя от технических деталей вычислительного процесса, а гибкое масштабирование ресурсов позволяет уменьшить время, требуемое на проведение вычислительных экспериментов.

# DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF AN AUTOMATED CLOUD SYSTEM FOR AERODYNAMIC CALCULATIONS OF AIRCRAFT-TYPE UAVS

**A. Kagenov, K. Kostyushin, S. Orlov, N. Kostyushina,  
S. Prokhanov**

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

**Keywords:** OpenFOAM, gas dynamics, CFD, UAV.

**Abstract.** In this paper presents the results of the development of a cloud system for multi-parameter aerodynamic calculations of UAVs. The developed platform consists of the following functional parts: client - provides access to the computing cloud, and allows you to interactively prepare a task, send prepared data to a computing cluster, receive and visualize calculation results; computing cloud - is provided for the duration of the solution of the problem and provides interaction with clients through an open API, and controls the computing process. The computing process of the platform is based on the use of open technologies of the OpenFOAM package adapted for solving aerodynamic problems [1]. Parametric studies of the external flow around the UAV at free-stream speeds of 20, 25, 30 m/s with angles of attack of 0-30 degrees were carried out. The platform provides the ability to conduct computational experiments without the need to install specialized hardware and software at the workplace of the end user, which allows you to isolate the user from the technical details of the computing process, and flexible scaling of resources reduces the time required for computational experiments.

Беспилотная авиация является одной из наиболее быстро развивающихся направлений в авиационной промышленности, поскольку она предоставляет широкий спектр возможностей для гражданского применения. Аэрофотосъемка, объективный контроль за объектами в труднодоступной местности, доставка малогабаритных грузов, борьба с лесными пожарами, экстренная медицина является лишь малой частью широчайшего круга приложений, в которых используются беспилотные летательные аппараты. В области аэродинамического проектирования основная задача состоит в определении оптимальной геометрии БПЛА, доставляющей минимум полного сопротивления аппарата с учетом многочисленных ограничений различного типа и характера на оптимальное решение. Разработка БПЛА делится на этап эскизного проектирования и этап детальной проработке конечного изделия. При эскизном проектировании, как правило, используются программные комплексы, позволяющие быстро проводить аэродинамические расчеты с использованием приближенных методик расчетов. Наиболее популярные на данный момент являются программы FwDesign, XFRL5, SailCut, XFOIL, Surfplan, Profili и т.д. При детальной проработке конечного изделия проводится CFD анализ трехмерной модели. На этом этапе используются CFD пакеты: Ansys, COMSOL Multiphysics, STAR-

CCM+, XFlow, OpenFOAM и т.д. Проведение параметрических исследований с использованием CFD программ является трудоемкой задачей, так как необходимо варьировать большое количество параметров: угол атаки, скорость набегающего потока, турбулентность, различные конфигурации БПЛА и т.д.

Целью работы является разработка облачной системы для проведения параметрических аэродинамических расчетов БПЛА самолетного типа.

Рассматривается задача внешнего обтекания летающего крыла с разными углами атаки. Для математического описания физической постановки задачи используются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса в несжимаемой постановке [2–3]. Численная реализация физико-математической модели основана на использовании метода контрольного объема [4], реализованного в пакете OpenFOAM.

Для автоматизации проведения расчетов разработана облачная платформа, состоящая из следующих функциональных частей:

1. *Веб Клиент* обеспечивает доступ к вычислительному облаку и позволяет в интерактивном режиме подготавливать задачу, отправлять подготовленные данные на вычислительный кластер, получать и визуализировать результаты расчетов.

2. *Веб Сервер* обрабатывает запросы клиента, принимает на вход трехмерные модели в виде STL файлов и параметры для проведения расчетов. Хранит пользовательские данные в БД. Формирует кейсы решателя. Ставит в очередь задачи (Task Manager Server), возвращает статус задач и результаты расчетов.

3. *Task Manager Server* – планировщик задач, использует доступные свободные ресурсы вычислительного кластера.

4. *Computer Cluster* обеспечивает проведение параллельных расчетов с использованием высокопроизводительных вычислительных систем Суперкомпьютера СКИФ Cyberia.

С использованием разработанной системы проведены параметрические расчеты для БПЛА (*рис. 1*). Рассмотрены скорости набегающего потока 20, 25, 30 м/с с углами атаки 0–30 градусов с шагом 1. Расчетная сетка генерировалась SnappyHexMesh, число расчетных ячеек составляло 1.5 млн. На *рис. 1, а* показана подъемная сила и на *рис. 1, б* – сила сопротивления в зависимости от угла атаки для рассмотренных скоростей набегающего потока.

Видно, что для скорости 30 м/с при отрицательных углах атаки подъемная сила меньше, а при положительных углах – больше, по сравнению с расчетами для скорости набегающего потока 20 м/с. Наименьшая сила сопротивления находится в диапазоне 0–3 градусов угла атаки. Видно, что с увеличением скорости воздушного потока от 20 до 30 м/с в диапазоне 0–3 градуса сила сопротивления увеличивается вдвое. Максимальное аэродинамическое качество достигается при угле атаки 5 градусов и составляет 12–14, наихудшее при отрицательных углах атаки. При углах атаки более

5 градусов происходит снижение аэродинамического качества до 10. Для угла атаки 5 градусов подъемная сила составляет 47 Н для скорости воздушного потока 20 м/с, 74 Н – 25 м/с, 106 Н – 30 м/с.

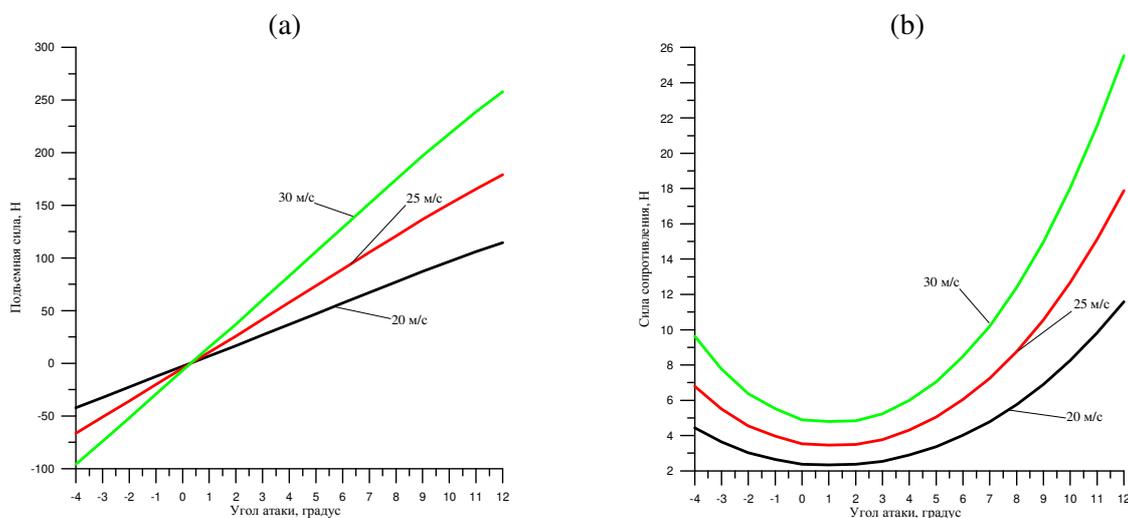


Рис. 1. Подъемная сила (а), сила сопротивления (б)

Статья написана в рамках научного проекта № 8.2.31.2019, выполненного при поддержке Программы повышения конкурентоспособности ТГУ.

### Литература

1. OpenFOAM. URL: <http://openfoam.org> (дата обращения: 01.11.2019).
2. Wilcox D.C. Turbulence Modeling for CFD – California: DCW Industries, Inc, 1993. 460 p.
3. Куликовский А.Г. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений / А.Г. Куликовский, Н.В. Погорелов, А.Ю. Семенов. М.: Физматлит, 2001. С. 656.
4. Moukalled F. The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics / F. Moukalled, L. Mangani, M. Darwish – Springer International Publishing Switzerland, 2016. 791 p.

### References

1. OpenFOAM. – URL: <http://openfoam.org> (accessed: November 1, 2019).
2. Wilcox D.C. Turbulence Modeling for CFD. California: DCW Industries, Inc, 1993. 460 p.
3. Kulikovskiy A.G. Mathematical problems of the numerical solution of hyperbolic systems of equations / A.G. Kulikovskiy., N.V. Pogorelov, A.Yu. Semenov. M.: Fizmatlit, 2001. S. 656.
4. Moukalled F. The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics / F. Moukalled, L. Mangani, M. Darwish – Springer International Publishing Switzerland, 2016. 791 p.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ С НАКЛОННЫМИ ПРЕГРАДАМИ

**В.А. Котоногов, А.М. Кагенов, К.В. Костюшин, К.Л. Алигасанова**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
kotonogov@niipmm.tsu.ru

**Ключевые слова:** математическое моделирование, импактная сверхзвуковая струя, OpenFOAM.

**Аннотация:** Рассмотрено взаимодействие одиночной сверхзвуковой струи с числом Маха  $M = 4$  на срезе сопла с плоской наклонной и горизонтально расположенной преградами. Рассмотрен автоколебательный режим для плоской горизонтальной преграды. Проведено параметрическое численное исследование с изменением угла наклона преграды от 0 до 20 градусов. Показана детально ударно-волновая структура струй. Получено, что с увеличением угла наклона преграды (выше 5 градусов) автоколебательный режим не наблюдается.

## MATHEMATICAL MODELING OF INTERACTION A SUPERSONIC PLUME WITH OBLIQUE OBSTACLES

**V. Kotonogov, A. Kagenov, K. Kostyushin, K. Aligasanova**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
kotonogov@niipmm.tsu.ru

**Keywords:** mathematical modeling, impact supersonic plume, OpenFOAM.

**Abstract:** The interaction of a single supersonic plume with a Mach number  $M = 4$  at the nozzle exit with a flat oblique and horizontally located obstacles is considered. A self-oscillating mode for a flat horizontal barrier is considered. A parametric numerical study with a change in the angle of inclination of the obstacle from 0 to 20 degrees was carried out. The shock-wave structure of the plumes is shown. It was found that with an increase in the angle of inclination of the obstacle (above 5 degrees), the self-oscillation mode is not observed.

В настоящее время для исследования других планет используются космические аппараты, роверы и спутники. Для доставки космических аппаратов в основном применяются двигательные установки, сопла которых при посадке направлены к поверхности. При взаимодействии сверхзвуковых струй с преградами возникает сложная нестационарная ударно-волновая газодинамическая картина. Исследованиям взаимодействия сверхзвуковых струй с преградами посвящён ряд экспериментальных и теоретических работ, большинство работ посвящено взаимодействию сверхзвуковых струй с числами Маха на срезе сопла  $M < 3$  с плоскими горизонтальными и наклонными преградами.

Целью данной работы является математическое моделирование взаимодействия одиночной сверхзвуковой струи с числом Маха на срезе сопла  $M = 4$  с плоской преградой при различных её углах наклона.

В данной статье рассматривается задача взаимодействия одиночной сверхзвуковой струи с преградами. Расстояние от среза сопла до преграды составляет 0.308 м, угол наклона преграды варьируется от 0 до 20 градусов. Для рассматриваемого расстояния от среза сопла до преграды и для горизонтальной поверхности (угол 0 градусов) реализуется автоколебательный режим. Параметрические исследования проведены для следующих параметров: на входе критического сечения сопла задавалось полное давление – 105 атмосфер, и полная температура – 300 К, скорость потока газа равна скорости звука, температура окружающей среды – 300 К, давление окружающей среды – 1 атмосфера.

Для математического описания физической постановки задачи используются уравнения Навье–Стокса, осредненные по Фавру, для замыкания системы уравнений использовались уравнение состояния идеального газа и уравнения модели турбулентности Ментера SST. Для реализации физико-математической модели и проведения численных исследований применялось программное обеспечение с открытым исходным кодом OpenFOAM [1]. В качестве решателя использовался *dbnsTurbFoam*. Численный метод реализован на методе конечных объемов, потоки через границы ячеек находились из точного решения задачи Римана, для интегрирования по времени используется 4-шаговый метод Рунге–Кутты второго порядка точности. Численные исследования выполнены с использованием суперкомпьютера Томского государственного университета СКИФ Cyberia.

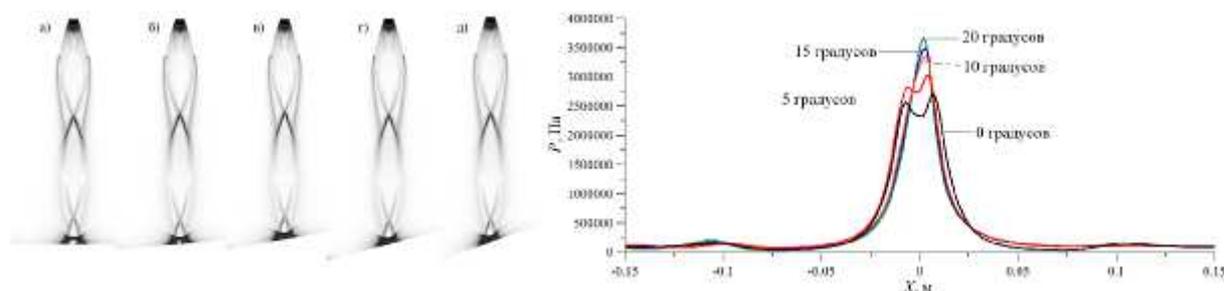


Рис. 1. Слева – градиент плотности, *a* – 0 градусов; *b* – 5 градусов; *в* – 10 градусов; *г* – 15 градусов; *д* – 20 градусов.  
Справа – распределение давления газа вдоль преграды

На *рис. 1*, слева показана ударно-волновая структура струи (градиент плотности) для рассматриваемых углов наклона преграды. Для горизонтальной преграды (*рис. 1, a*) видно, что преграда располагается на начале третьей «бочки» струи. Аналогичное наблюдается и для преград с углами наклона 5–20 градусов.

На *рис. 1*, справа, приведены распределения давления газа вдоль преграды. Для горизонтальной преграды и преграды с углом 5 градусов наблюдаются два максимума давления. При увеличении угла наклона плоской преграды от 10 до 20 градусов, левый максимум давления пропадает, а избыточное давление правого максимума возрастает с 3 до 3.7 МПа. Кроме того, увеличение угла наклона плоской преграды приводит к переходу автоколебательного режима к стационарному.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Томской области в рамках научного проекта 19-41-703005.

### Литература

1. *Кагенов А.М., Еремин И.В., Глазунов А.А., Тырышкин И.М.* Применение пакета OpenFOAM для расчета течений газа в соплах и струях // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56. № 9/3. С. 66–68.
2. *Кудимов Н.Ф., Сафронов А.В., Третьякова О.Н.* Результаты экспериментальных исследований взаимодействия многоблочных сверхзвуковых турбулентных струй с преградой // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. № 69. С. 1–11.
3. *Кудимов Н.Ф., Сафронов А.В., Третьякова О.Н.* Численное моделирование взаимодействия многоблочных сверхзвуковых турбулентных струй с преградой // Известия высших учебных заведений Физика. 2013. № 70. С. 1–14.
4. *Запрыгаев В.И., Солотчин А.В., Кавун И.Н., Яровский Д.А.* Натекание сверхзвуковой недорасширенной струи на преграды различной проницаемости // Прикладная механика и техническая физика. 2011. Т. 52. № 5. С. 60–67.

### References

1. *Kagenov A.M., Eremin I.V., Glazunov A.A., Tyryshkin I.M.* Application of the OpenFOAM package for calculating gas flows in nozzles and jets // News of higher educational institutions. Physics. 2013. Vol. 56. No. 9/3. Pp. 66–68. (Rus.).
2. *Kudimov N.F., Safronov A.V., Tretyakova O.N.* The results of experimental studies of the interaction of multiblock supersonic turbulent jets with an obstacle // News of higher educational institutions. Physics. 2013. No. 69. Pp. 1–11. (Rus.).
3. *Kudimov N.F., Safronov A.V., Tretyakova O.N.* Numerical simulation of the interaction of multiblock supersonic turbulent jets with an obstacle // News of higher educational institutions. Physics. 2013. No. 70. Pp. 1–14. (Rus.).
4. *Zapryagaev V.I., Solotchin A.V., Kavun I.N., Yarovsky D.A.* Leakage of a supersonic underexpanded jet onto barriers of various permeabilities // Applied Mechanics and Technical Physics. 2011. V. 52. No. 5. Pp. 60–67. (Rus.)

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ ЛЕГКИХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

**А.Г. Кушнарёв, Д.А. Серебряков, Н.И. Кахидзе**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
kushnarev97@gmail.com

**Ключевые слова:** пластическая деформация, разрушение, механические свойства, прокат, моделирование.

**Аннотация.** Приведены результаты исследований напряженно-деформированного состояния алюминиевых заготовок при обработке прокаткой при теплой деформации, полученные с использованием численного моделирования методом конечных элементов. Оценка полученных результатов показала, что распределение напряжений по всей области образца происходит равномерно. При неоптимальных режимах обработки в начальной области образца образуется концентратор растягивающих напряжений, которые при достижении критических величин приводят к появлению и росту магистральной трещины. Численное моделирование также показало эффективность выбранного метода обработки до состояния листового проката с получением повышенных физико-механических свойств в алюминиевом сплаве.

## NUMERICAL SIMULATION OF LONGITUDINAL ROLLING PROCESS OF LIGHT ALUMINUM ALLOYS

**A. Kushnaryov, D. Serebryakov, N. Kakhidze**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
kushnarev97@gmail.com

**Keywords:** plastic deformation, fracture, mechanical properties, rolling, numerical simulation.

**Abstract.** In the current work, plastic deformations were simulated according to the longitudinal rolling scheme during which prismatic samples of aluminum alloy 1550 were processed. A study of the physico-mechanical properties by numerical simulation by the finite element method was carried out. Evaluation of the results showed that the distribution of stresses throughout the region of the sample occurs uniformly. A stress concentrator is formed in the initial region of the sample, which subsequently leads to the appearance and growth of a main crack. Numerical simulation also showed the effectiveness of the selected processing method for obtaining enhanced physical and mechanical properties in an aluminum alloy.

Обработка прокаткой в цилиндрических валках основана на реализации пластической деформации при производстве плоского или листового проката. При этом пластическая деформация металлических заготовок осуществляется между приводными рабочими валками, установленными непосредственно в осевом направлении, перпендикулярном направлению прокатки. Представляет интерес создания высокопрочного листового про-

ката алюминиевых сплавов. Схема прокатки в цилиндрических валках представлена *рис. 1*.

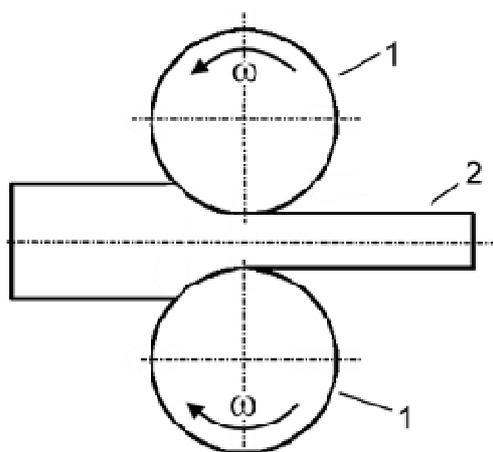


Рис. 1. Схема трехвалковой радиально-сдвиговой прокатки и прокатки в цилиндрических валках: 1 – валки; 2 – заготовка

Для успешной реализации поставленной в работе задачи необходимо чтобы пластичность используемых сплавов была достаточной для возможности материала претерпевать большие степени деформаций без образования дефектов и разрушения при минимально допустимых температурах. Варьирование параметров экспериментальных режимов для достижения оптимального уровня приводит к увеличению количества повторов с неудовлетворительными результатами эксперимента. Что не только ведет к удорожанию исследований, но и увеличивает временной интервал от постановки задачи до достижения требуемых результатов. Поэтому перед проведением натурных экспериментов прибегают к помощи численного моделирования.

Цель данного исследования заключалась в создании прогностической физико-математической модели, адекватно описывающей напряженно-деформируемое состояние и разрушение легких алюминиевых сплавов в процессе продольной прокатки. Проверка результатов моделирования и изучение структуры и свойств полученных горячекатаных полуфабрикатов.

Материалом для исследования выбран легкий алюминий-магниевый сплав 1560, он является самым прочным сплавом из термически неупрочняемых сплавов, обладает хорошими свойствами в сварных конструкциях и хорошей коррозионной стойкостью [1]. Имеет высокую пластичность и способность к формовке в отожженном состоянии. Сплавы этой системы можно упрочнять холодной деформацией. Благодаря холодной деформации повышаются такие свойства, как предел текучести и временное сопротивление. Однако при низких температурах обработки увеличивается вероятность получения дефектной структуры или разрушения заготовки [2].

Для исследования механического поведения заготовок при динамических воздействиях применялась дискретно-континуальная модель, учитывающая влияние на сопротивление пластическому течению скоростей

деформации и температур [3, 4]. Для описания упругопластического поведения материала и разрушения использовались многопараметрические модели Джонсона–Кука, которые широко используются в научных и инженерных расчетах благодаря стабильному численному алгоритму, и быстрому времени анализа, а также возможности учета скоростного и температурного отклика. Параметры моделей Джонсона–Кука определялись из экспериментальных данных по высокоскоростному нагружению образцов используемого сплава при обработке кривых напряжения–деформации.

Моделировали прокатку призматических образцов размерами: длина – 50 мм; высота – 10 мм; ширина – 10 мм. Диаметр валков равен 80 мм. Скорость вращения валков – 24 об/мин. За один проход прокатки реализовывалось обжатие до 4 %. Температура прокатки равная 300 °С для данного режима выбиралась из условий сохранения целостности после обработки.

Результаты, полученные в ходе численного моделирования, показывают, что остаточная деформация, распределяется равномерно по большей области всего образца по этим значениям напряжений, можно судить о степени деформации образцов проката. В передней части заготовки возникает большой градиент нормальных растягивающих напряжений, который пытается разделить образец пополам относительно главной оси в плоскости проката. При температурах обработки ниже 300 °С в зоне концентрации напряжений активируется механизм разрушения, высокие значения растягивающих напряжений приводят к появлению магистральной трещины вдоль всего образца.

Созданная математическая модель может быть использована для изучения процессов упрочнения изделий проката из исследуемого класса материалов.

### Литература

1. Горбунов Ю. А. Применение изделий из алюминиевых сплавов при изготовлении и ремонте наземного и водного транспорта в Российской Федерации. Технология легких сплавов. 1 (2015). 87–92.

2. Михайловская А.В., Рязанцева М.А., Головин И.С., Портной В.К. Влияние микродобавок магния и цинка в алюминии на разупрочнение при нагреве холоднокатаных листов // Физика металлов и металловедение. 2012. № 8. С. 837–845.

3. Скрипняк Е.Г., Скрипняк Н.В., Козулин А.А., Скрипняк В.А. Моделирование влияния наноструктурированного поверхностного слоя на механическое поведение алюминиевых и магниевых сплавов при динамических воздействиях // Известия высших учебных заведений. Физика. 2010. Т. 53. № 12–2. С. 235–242.

4. Некрасова В.С., Козулин А.А., Сухоярский М.А., Скрипняк Н.В. Численное решение задачи определения деформации и разрушения легких листовых сплавов при динамических испытаниях // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики Сер. Серия физико-математическая. 2012. С. 119–122.

### References

1. Gorbunov Yu.A., Application of products from aluminum alloys in the manufacture and repair of land and water transport in the Russian Federation, Light alloy technology. 1 (2015). 87–92.

2. *Mikhailovskaya A.V., Ryazantseva M.A., Golovin I.S., Tailor V.K.* The effect of microadditives of magnesium and zinc in aluminum on softening during heating of cold-rolled sheets // *Physics of Metals and Metallurgy*. 2012. No 8. S. 837–845.

3. *Skripnyak EG, Skripnyak N.V., Kozulin A.A., Skripnyak V.A.* Modeling the influence of a nanostructured surface layer on the mechanical behavior of aluminum and magnesium alloys under dynamic effects // *News of higher educational institutions. Physics*. 2010. Vol. 53. No. 12–2. S. 235–242.

4. *Nekrasova V.S., Kozulin A.A., Sukhoyarsky M.A., Skripnyak N.V.* Numerical solution of the problem of determining the deformation and fracture of light sheet alloys during dynamic tests // *Works of Tomsk State University / Ser. Physics and Mathematics Series*. Vol. 2012. Pp. 119–122.

## РАСЧЕТ ТЕЧЕНИЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА ЧЕРЕЗ ПРОТОЧНУЮ ЧАСТЬ ОСЕВЫХ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ

**А.И. Лубышева, А.В. Поташев, Е.В. Поташева**

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия  
pot\_andrey@mail.ru

**Ключевые слова:** проточная часть турбомашин, дозвуковой поток газа.

**Аннотация.** Проектирование турбомашин различного назначения требует проведения расчета течения жидкости или газа через их неподвижные и вращающиеся элементы. Одним из подходов решения этой проблемы является использование хорошо себя зарекомендовавшей классической квазитрехмерной модели. В работе представлены результаты расчетов течения через проточную часть центробежных компрессоров с помощью разработанного программного комплекса, проводящего расчеты с учетом взаимовлияния решений двух двумерных задач друг на друга для сжимаемого газа.

## CALCULATION OF GAS FLOW THROUGH THE FLOW OF AXIAL TURBO-COMPRESSORS

**A. Lubysheva<sup>1</sup>, A. Potashev<sup>2</sup>, E. Potasheva<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Kazan (Volga region) Federal University, Russian Federation

<sup>2</sup>Kazan Cooperative Institute (branch) of the Russian University of Cooperation, Russian Federation  
pot\_andrey@mail.ru

**Keywords:** lowing part of turbomachines; subsonic gas flow.

**Abstract:** The design of turbomachines for various purposes requires the calculation of the flow of liquid or gas through their fixed and rotating elements. One approach to solving this problem is to use the well-established classical quasi-three-dimensional model. The report presents the results of calculations of the flow through the flow part of centrifugal compressors using a developed software package that performs calculations taking into account the

mutual influence of the solutions of two two-dimensional problems on each other for a compressible gas.

Проектирование турбомашин различного назначения требует проведения расчета течения жидкости или газа через их неподвижные и вращающиеся элементы. Одним из подходов решения этой проблемы является использование хорошо себя зарекомендовавшей классической квазитрехмерной модели [1–2].

В работе [3] эта модель получила свое продвижение за счет учета сжимаемости газа в задаче расчета осредненного осесимметричного потока. В силу особенностей метода решения первой двумерной задачи учет сжимаемости среды по сравнению с несжимаемым потоком приводит к необходимости организации итерационного процесса определения плотности газа в проточной части. В этой связи была разработана единая методика расчета осредненного осесимметричного потока, как несжимаемой жидкости, так и газа.

В составленной программе предусмотрена передача данных из первой двумерной задачи во вторую (расчет течения через решетки профилей на осесимметричной поверхности тока). Также реализовано решение указанной задачи и учет ее обратного влияния на исходные данные первой. Таким образом, полностью построена методика расчета течения газа через проточную часть турбомшины с учетом взаимного влияния решений двух двумерных задач друг на друга.

Кроме того, в программу введен учет вязкости осредненного потока в рамках модели пограничного слоя и реализован расчет потерь энергии. Основой для этого послужил учет вязкости при расчете осесимметричного потока по модели пограничного слоя. Для этого был произведен расчет потерь полного давления в проточной части за счет вязкого трения потока по ограничивающим осесимметричным поверхностям (основной и покрывной диски).

В монографии [4] приведена формула расчета потерь полного давления  $p'$  в прямой решетке профилей

$$p' = \rho V_{2\infty}^2 \frac{\delta_2^{**}}{t \cos \beta_{2\infty}},$$

где  $V_{2\infty}$  – величина скорости на бесконечности за решеткой;  $t$  – шаг решетки;  $\beta_{2\infty}$  – угол между вектором  $\vec{V}_{2\infty}$  и перпендикуляром к фронту решетки.

Для случая течения жидкости между двумя осесимметричными поверхностями формулу можно переписать в виде

$$p' = \rho_2 c_2^2 \frac{S^{**}}{S_0}, \quad (1)$$

где  $S_0$  – площадь поперечного сечения между ограничивающими поверхностями;  $S^{**}$  – площадь сечения, «занятая» толщиной потери импульса пограничного слоя;  $\rho_2$  – плотность на выходе из турбомшины;  $c_2$  – величина абсолютной скорости на выходе из турбомшины.

На этой основе были выполнены расчеты, демонстрирующие работу составленного программного комплекса. Представленные результаты демонстрируют полный расчет течения в двухступенчатой проточной части.

В примере проведен расчет двухступенчатой проточной части, состоящей из четырех безлопаточных (два входных участка и два безлопаточных диффузора с поворотными каналами) и трех лопаточных участков (два рабочих колеса и один обратный направляющий аппарат).

На *рис. 1* показаны формы лопаток рабочих колес (лопатки одинаковые) и обратного направляющего аппарата (ОНА) (лопатки рабочих колес показаны зеленым цветом, а лопатки ОНА – синим), а на *рис. 2* – форма проточной части.

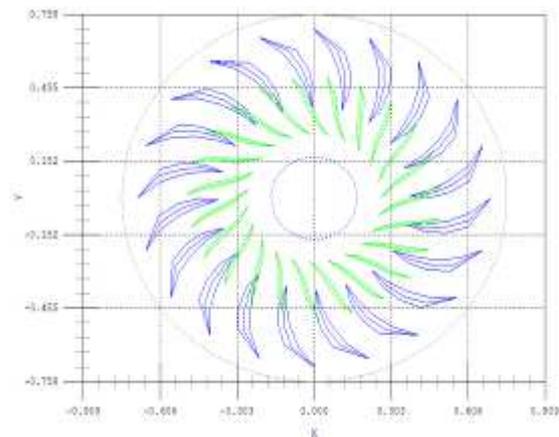


Рис. 1. Форма лопаток

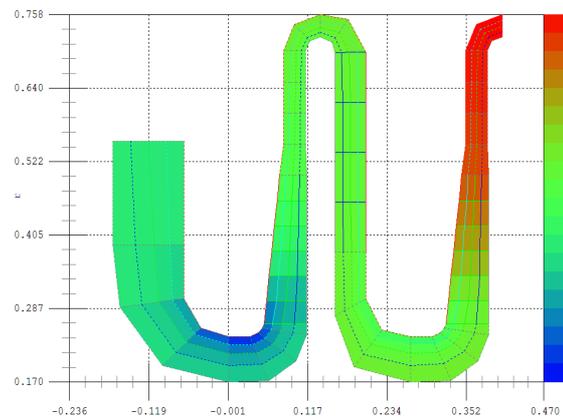
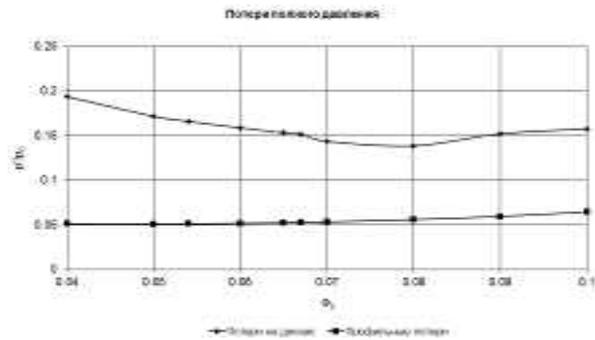


Рис. 2. Форма проточной части

Расчеты проводились при различных значениях коэффициента расхода  $\Phi_0$ . Учет взаимовлияния решений двумерных задач друг на друга требовал от четырех до семи итераций в зависимости от  $\Phi_0$ . Некоторые из результатов для  $\Phi_0 = 0.09$  показаны на *рис. 2*, где изображены формы рассчитанных осесимметричных поверхностей тока и поле давлений в проточной части.

Рис. 3. Зависимость потерь полного давления от коэффициента расхода



Учет вязкости в осредненном осесимметричном потоке позволил также рассчитать по формуле (1) зависимость потерь полного давления  $p'$  от коэффициента расхода  $\Phi_0$  (рис. 3).

Таким образом, разработаны методика и программа, которые обеспечивают расчет течения через проточную часть центробежных компрессоров, включая как безлопаточные, так и лопаточные неподвижные и вращающиеся элементы. Учет взаимовлияния решений двух двумерных задач друг на друга дает возможность существенно повысить точность результатов, так как приводит к более точному расчету осредненного осесимметричного потока и, как следствие, к более точному определению значений коэффициента потерь, а следовательно, и КПД.

В результате продемонстрированы возможности инструмента проектирования, пригодного для проведения многовариантных расчетов с существенно меньшими затратами машинного времени по сравнению с конечно-разностными методами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Республики Татарстан в рамках научного проекта № 18-41-160026.

### Литература

1. Степанов Г.Ю. Гидродинамика решеток турбомашин. М.: Физматгиз. 1962. 512 с.
2. Этинберг И.Э., Раухман Б.С. Гидродинамика гидравлических турбин. Л.: Машиностроение. 1978. 280 с.
3. Поташев А.В., Поташева Е.В. Учет сжимаемости осредненного осесимметричного потока в проточной части турбомашин // Компрессорная техника и пневматика. 2017, № 6. С. 4–8.
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука. 1987. 840 с.

### References

1. Stepanov G.Yu. Hidrodinamika reshetok turbomashin. Moscow: Fizmatgiz. 1962. 512 p. (Rus.)
2. Etinberg I.E., Raikhman B.S. Hidrodinamika gidravlicheskih turbin. Leningrad: Mashinostroyeniye. 1978. 280 p. (Rus.).

3. Potashev A.V., Potasheva E.V. Uchet szhimayemosti osrednennogo osesimmetrichnogo potoka v protochnoy chasti turbomashin. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*. 2017. No. 6. Pp. 4–8 (Rus.).

4. Loitsyansky L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza*. Moscow: Nauka. 1987. 840 p. (Rus.).

## РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК В СОПЛОВОМ БЛОКЕ И КАМЕРЕ СГОРАНИЯ РДТТ

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

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

**Ключевые слова:** камера сгорания РДТТ, закон скорости горения, сопло Лаваля, метод Годунова.

**Аннотация.** Разработан программный комплекс для расчета рабочих характеристик в камере сгорания РДТТ и параметров течения газа в сопловом блоке РД. Реализация расчета рабочих характеристик в камере сгорания РДТТ основывается на разработанной методике с использованием уравнения Бори в каждый момент времени работы двигателя в зависимости от изменения поверхности горения заряда. На основе метода Годунова производится расчет параметров течения газа в сопловом блоке РД. Программный комплекс написан на языке C# с использованием технологии WPF. Пользовательский интерфейс позволяет формировать входные данные, проводить расчеты и иллюстрировать результаты в табличном и графическом видах.

## DEVELOPMENT OF COMPUTER PROGRAM FOR CALCULATING THE FLOWS OF COMBUSTION PRODUCTS IN NOZZLES USING THE GODUNOV'S SCHEME

**M. Sereda, A. Chervakova, K. Kostyushin**

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

**Keywords:** the combustion chamber of the rocket engine solid fuel, the law of the burning rate, a Laval nozzle, Godunov method.

**Abstract.** A software package has been developed for calculating operating characteristics in the combustion chamber of solid-fuel rocket engines and parameters of gas flow in the nozzle block of a rocket engine. The implementation of the calculation of performance characteristics in the combustion chamber of solid-fuel rocket engines is based on the developed method using the Bori equation at each time of engine operation, depending on the change in the charge combustion the burning surface. The calculation of gas flow parameters in the nozzle block is based on the Godunov method. The software package is written in C# using WPF

technology. The user interface allows you to generate input data, perform calculations, and illustrate results in tabular and graphical form.

Важными задачами при разработке РДТТ являются расчет рабочих характеристик в камере сгорания и параметров течения газа в сопловом блоке. Исследуемые параметры позволяют судить о целесообразности использования той или иной геометрической формы заряда твёрдого топлива, химических характеристик топлива, конфигурации используемого сопла, рассчитывать тягово-энергетические характеристики исследуемого ракетного двигателя.

Целью данной работы было создание доступного пользователю программного комплекса, позволяющего в короткие сроки рассчитывать основные характеристики РД.

Конфигурация заряда для РДТТ подбирается исходя из требуемого закона горения для проектируемого двигателя. Также немаловажную роль при получении закона горения играет марка используемого топлива [1]. Для расчета внутрикамерных характеристик в инженерной практике, как правило, используется стационарное уравнение Бори (1), позволяющее определить кривую давления, скорость горения твёрдого топлива и массовый приход с поверхности горения. Такой расчет проводится в приближении осреднения давления в объеме камеры сгорания РД.

$$P_i(\tau_i) = \left( \frac{S_i u_1 \rho_m}{AF_{кр}} \right)^{\frac{1}{1-\nu}}. \quad (1)$$

Процесс горения твердого топлива описывается степенным законом горения

$$u = u_1 P_i^\nu.$$

Расчет локальных и интегральных характеристик в сопловом блоке РДТТ может проводиться как с использованием газодинамических функций, так и с помощью методов, основанных на решении полных уравнений Эйлера:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial \rho u}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho u^2 + p)}{\partial x} = p, \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + \frac{\partial (\varepsilon + p)u}{\partial x} = 0 \end{cases}$$

Для получения решения систему требуется дополнить уравнением состояния идеального газа:

$$p = (k - 1)\rho\varepsilon.$$

Одним из самых надежных и хорошо апробированных методов для решения таких уравнений является метод Годунова [2]. Метод основан на определении потоков через грани расчетных ячеек с использованием точного или приближенного метода решения задачи о распаде произвольного разрыва. Одной из методик нахождения параметров на разрывах является приближенный метод Роу [3, 4]. Основным положительным фактором использования этого метода является сравнительно высокая скорость расчета.

В целях изучения рабочих процессов в РДТТ реализована описанная методика расчета и создан программный комплекс «Rocket calculation», позволяющий проводить расчеты рабочих характеристик в камере сгорания и параметров течения в сопловом блоке. Реализована возможность ввода и вывода входных и выходных данных пользователем с помощью гибкого графического интерфейса. Вывод данных производится в основное окно программы в виде таблицы значений рассчитываемых параметров и их графиков, также доступна возможность сохранения данных из таблицы в текстовый файл.

В результате данной работы проведены расчеты рабочих характеристик в камере сгорания РДТТ и параметров течения газа в сопловом блоке. Выполнен анализ кривой давления основного режима работы двигателя в зависимости от вида топлива и геометрии заряда. Получены параметры секундного массового расхода и тяги РД в период горения основного заряда ТТ.

### Литература

1. *Алемасов В.Е.* Теория ракетных двигателей: учебник для студентов высших технических учебных заведений / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегаллин, А.П. Тишин. М.: Машиностроение, 1989. 464 с.
2. *Годунов С.К.* Численное решение многомерных задач газовой динамики: учеб. пособие / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов и др.; под ред. С.К. Годунова. М.: Наука, 1976. 400 с.
3. *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics: A Practical Introduction* Eleuterio F. Toro. Berlin: Springer, 2009. 479 p.
4. *Железнякова А.Л.* Анализ эффективности современных численных схем решения задачи о распаде произвольного разрыва в рамках метода расщепления по физическим процессам для расчета гиперзвуковых течений / А.Л. Железнякова // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т. 15, № 5. С. 1–22.
5. *Костюшин К.В., Шуваригов В.А.* Сравнение схем типа "MUSCL" для расчета течений идеального газа в соплах Лавала // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2018. № 54. С. 79–87.

## References

1. *Alemasov V.E.* Theory of rocket engines: the textbook for students of higher technical educational establishments / V.E. Alemasov, A.F. Dregalin, A.P. Tishin; ed. by V.P. Glushko. M.: Mechanical Engineering, 1980. 533 p.
2. *Godunov S.K.* Numerical solution of multidimensional problems of gas dynamics: textbook / S.K. Godunov, A.V. Zabrodin, M.Ya. Ivanov, etc.; ed. By S.K. Godunov. Moscow: Nauka, 1976. 400 p.
3. Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics: A Practical Introduction Eleuterio F. Toro. Berlin: Springer, 2009. 479 p.
4. *Zheleznyakova A.L.* Analysis of the efficiency of modern numerical schemes for solving the problem of the decay of an arbitrary gap in the framework of the splitting method for physical processes for calculating hypersonic flows / A.L. Zheleznyakova / Physical and chemical kinetics in gas dynamics. 2014. Vol. 15, no. 5. Pp. 1–22.
5. *Kostyushin V.K., Starikov V.A.* Comparison of schemes such as "MUSCLE" for calculating ideal gas flows in Laval nozzles // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta: Matematika i mehanika*. 2018. Vol. 54. Pp. 79–87.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НОРМАЛЬНОГО ПРОБИТИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН ПУЛЕЙ 57-Н-181

**Т.В. Фазылов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
talgat505@gmail.com

**Ключевые слова:** численное моделирование, пробитие, разрушение, пуля, преграда.

**Аннотация.** В работе проведены численные исследования процесса взаимодействия металлического ударника (пуля 57-Н-181) с многослойными стальными пластинами при 315 м/с. Поведение материалов описывается сложной моделью механики сплошных сред на основе фундаментальных законов сохранения. Основным инструментом исследования – модифицированный численный лагранжев метод Г.Р. Джонсона. Выявлены основные закономерности процесса разрушения, включая время зарождения первых очагов разрушения, время пробития, деформация ударника, запреградная скорость ударника и т.п. Установлено, что наибольшей ударной стойкостью обладает трехслойная преграда, однако после процесса взаимодействия имело место сильная осевая деформация ее слоев.

# NUMERICAL MODELING OF RESPONSE MULTI LAYERED METAL PLATES IMPACTED BY 57-H-181 BULLET

**T. Fazylov**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
talgat505@gmail.com

**Keywords:** post-penetration analysis, destruction, bullet, target.

**Abstract.** The response of targets, including Single, Double and three-layer plates impacted by steel impactors at a velocity of 315 m/s, was studied. Projectile is a well-known 57-H-181 bullet. The behavior of materials is described by a complex model of continuum mechanics based on the fundamental laws of conservation of mass, momentum, and energy. The main research tool is the modified numerical Lagrangian method of Johnson G.R. The main similarity perforation of targets, including the time of nucleation of the first foci of destruction, the time of penetration, projectile's deformation, the residual projectile velocity, etc. were revealed. Obviously, the three-layer target had the highest impact resistance, however, its layers were severely deformed.

Постоянное совершенствование средств кинетического воздействия на защищаемые объекты заставляет разработчиков искать новые пути по повышению ударной стойкости. Одним из наиболее тривиальных способов является добавление «усиливающего» слоя к уже имеющемуся «основному» слою защитной конструкции. Однако расположить «дополнительный» слой можно как с лицевой поверхности, так и с тыльной, а современные технологии порошковой металлургии позволяют скрепить эти слои различным способом [1, 2]. В данном аспекте математическое моделирование выступает наиболее эффективным инструментом по выявлению основных механизмов и закономерностей процесса разрушения твердых тел при динамических нагрузках.

В работе было численно смоделирован процесс взаимодействия ударника с многослойными металлическими преградами при дозвуковых скоростях. Одной из задач являлось модификация конечно-элементной модели [3] и добавление еще одного усиливающего (третьего) слоя при нормальном пробитии оболочечным ударником. Были выявлены основные механизмы и закономерности процесса разрушения, включая время пробития, диаметр пробоины в пластинах, относительное укорочение ударника и т.п.

Для описания поведения материала использована упругопластическая пористая среда с учетом свойств прочности, сжимаемости, ударно-волновых явлений и фрагментарного разрушения. Модель основана на макроскопическом феноменологическом подходе механики сплошных сред и фундаментальных законов сохранения. В рамках детерминированного подхода реализована концепция совместного образования отрывных и сдвиговых разрушений. Упруго-пластическое поведение материалов

описывается уравнениями Прандтля – Рейса, уравнение состояния взято в баротропной форме из [1]. Для апробации численного метода и математической модели проводились тестовые расчеты. Полученные результаты сравнивались с известными аналитическими решениями (Ренкина – Гюгонио) и экспериментальными данными [4].

Серия вычислительных экспериментов состояла из трех вариантов расчетов. В первом варианте – однослойная пластина, во втором – двухслойная, в третьем – трехслойная пластина без воздушного зазора между слоями. Металлическая пластина была размерами в сечении (85×1) мм. Ударник – пуля 9 мм (57-Н-181) от ПМ-9. Начальная скорость – 315 м/с. Расчеты проведены в 2D осесимметричном случае на некоммерческом программном комплексе [5].

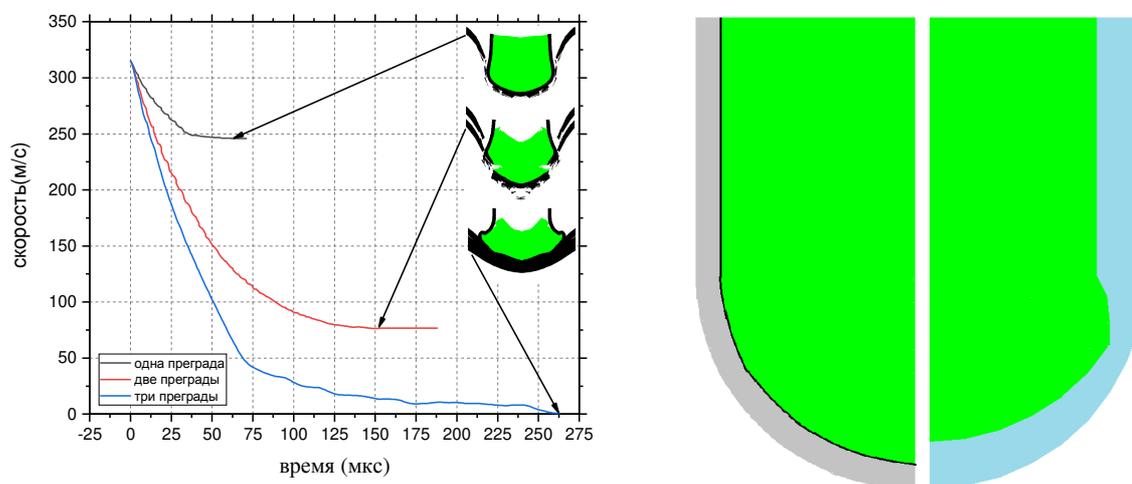


Рис. 1. Результаты моделирования: зависимость запреградной скорости от времени, и конечная элементная модель пули после/до модификации

На рис. 1 временная зависимость скорости ударника для трех вариантов расчетов. В левой части рисунка показана модифицированная конечно-элементная модель пули, которая отличается наличием контактной поверхности между свинцовым «сердечником» и оболочкой. Контактная поверхность выделена черным цветом.

Видно, что в первых двух случаях произошло сквозное пробитие, в которых запреградная скорость была равна 240 и 73 м/с, соответственно. В третьем случае сквозного пробития не произошло за 260 мкс, но ударник был сильно деформирован. Графики имели вид гиперболической функции с участками «быстрого» и «медленного» снижения скорости.

Таким образом, установлено, что наличие третьего слоя придало преграде большую ударную стойкость, однако в этом случае было сильное

деформирование ударника и «вытягивание» всех слоев в направлении движения ударника.

Работа была выполнена в рамках Программы повышения конкурентоспособности ТГУ на 2013-2020 годы.

### Литература

1. Глазырин В.П., Орлов Ю.Н. Моделирование процесса пробития преград комбинированными ударниками // Вычислительные технологии. 2002. Т. 7. Ч. 2. Спецвыпуск. С. 144–153.

2. E.A. Flores-Johnson, M. Saleh, L. Edwards Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile // International Journal of Impact Engineering 38 (2011). 1022–1032.

3. Фазылов, Т.В., Пристай А.М. Исследование процесса пробития стальных пластин ударником с оживальной головной части при низких скоростях (315 м/с) / Наука. Промышленность. Оборона. Труды XX Всероссийской научно-технической конференции. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. С. 209–213.

4. Бараишков В.Н., Герасимов А.В., Глазырин В.П. и др. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. 572 с

5. Орлов Ю.Н., Глазырин В.П., Орлов М.Ю. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010610911 от 28.01.2010 «Удар-ОС1. Ударно-волновое нагружение конструкций. Осесимметричная задача»

### References

1. Glazyrin V.P., Orlov Yu.N. Modeling the process of breaking through barriers with combined impactors // Computational technologies. 2002. Vol. 7(2). Special issue. Pp. 144–153.

2. E.A. Flores-Johnson, M. Saleh, L. Edwards Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile // International Journal of Impact Engineering 38 (2011). 1022–1032

3. Fazylov, T.V., Pristay A.M. Investigation of the process of breaking through steel plates with projectile at low velocity) Proceedings of the XX All-Russian Scientific and Technical Conference. Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2019. S. 209–213.

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

5. Orlov Yu.N., Glazyrin V.P., Orlov M.Yu. Certificate on state registration of a computer program No. 2010610911 of January 28, 2010 “Udar-OS1. Shock-wave loading of structures. Axisymmetric problem”.

# РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЙ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В СОПЛАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СХЕМЫ С.К. ГОДУНОВА

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

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

**Ключевые слова:** сопло Лаваля, разрывные течения, схема С.К. Годунова, задача Римана, метод Роу.

**Аннотация.** Разработан программный комплекс, позволяющий проводить расчеты локальных и интегральных параметров течения газа в сопловом блоке ракетного двигателя с учетом противодействия на срезе сопла. Алгоритм расчета основан на использовании схемы С.К. Годунова. Задача Римана решается с использованием приближенного метода Роу. Проведены тестовые расчеты течений продуктов сгорания в радиусно-конических соплах, исследован период выхода сопла на рабочий режим в зависимости от противодействия.

## DEVELOPMENT OF A PROGRAM FOR CALCULATING THE FLOWS OF COMBUSTION PRODUCTS IN NOZZLES USING THE GODUNOV'S SCHEME

**A. Chervakova, M. Sereda, K. Kostyushin**

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

**Keywords:** Laval nozzle, discontinuous flows, Godunov scheme, Riemann problem, Roe scheme.

**Abstract.** A software package has been developed that allows calculations of local and integral parameters of the gas flow in the nozzle of a rocket engine, taking into account the back pressure on the nozzle section. The calculation algorithm is based on the use of S. K. Godunov scheme. The Riemann problem is solved using the approximate Rou method. Test calculations of flows of combustion products in radius-conical nozzles are carried out, the period of nozzle output to the operating mode depending on the backpressure is investigated.

Газодинамические процессы в соплах ракетных двигателей играют важную роль. Одной из целей проведения исследований течений в соплах ракетных двигателей является определение параметров потока для задач профилирования, расчета потерь тяги, тепло- и массообмена и др. К решению задачи нахождения параметров течения продуктов сгорания в сопловых блоках ракетных двигателей имеется несколько подходов. Например, расчет потока в сопле Лаваля, основанный на использовании газодинамических функций [1, 2]. Однако данная методика неприменима к расчету

сложных разрывных течений газа, включающих скачки уплотнения, зоны разрежения и контактные разрывы, не позволяет исследовать период выхода соплового блока на рабочий режим. Наилучшим методом с точки зрения точности и надежности при сквозном расчете сложных разрывных течений газа является метод С.К. Годунова.

Целью данной работы является разработка программного комплекса, позволяющего проводить расчеты параметров течения продуктов сгорания в сопловом блоке ракетного двигателя, с учетом противодействия окружающей среды с использованием схемы С.К. Годунова.

В начальный момент времени давление, скорость и температура продуктов сгорания во всей расчетной области приняты постоянными. В качестве граничного условия на входе в сопло выступает условие постоянства энтропии  $S$  и энтальпии  $H$ . На выходе из сопла при  $M > 1$  не ставятся граничные условия, при  $M < 1$  фиксируется заданное давление.

Для численного решения уравнений Эйлера применялась схема С.К. Годунова первого порядка точности [3]. Вычисление значений параметров газа на границах смежных ячеек реализуется с помощью приближенного метода Роу [4].

В результате данной работы, для реализации расчета одномерных течений продуктов сгорания в сопловых блоках ракетных двигателей, был разработан программный комплекс с графическим интерфейсом «*Flow Calculation*». Данный программный комплекс позволяет задавать произвольную геометрию расчетных областей, задавать начальные и граничные условия, проводить расчеты течений продуктов сгорания методом Годунова, визуализировать контур исследуемого сопла, визуализировать и сохранять результаты расчетов. Программный комплекс разработан с помощью методологии объектно-ориентированного программирования на языке программирования C#. Пользовательский интерфейс программного комплекса разработан с помощью программной модели WPF с использованием языка разметки XAML. Проведены тестовые расчеты параметров течения одномерного газового потока в радиусно-коническом сопле с разными значениями противодействия. При увеличении противодействия временной период выхода сопла на рабочий режим и установление локальных и интегральных газодинамических параметров увеличивается.

Верификация результатов расчета проведена путем сравнения с [1] и [2].

### Литература

- 1 Иров Ю.Д., Кейль Э.В., Маслов Б.Н. и др. Газодинамические функции. М.: Машиностроение, 1965. 398 с.
- 2 Червакова А.В., Костюшин К.В., Серeda М.С. Разработка инженерного приложения для расчета основных параметров течения газа в сопле Лавалья с учетом противодействия // Материалы VIII Всероссийской молодежной научной конференции «Акту-

альные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2018» / под ред. М.Ю. Орлова. Томск: Изд-во «Красное знамя», 2019. С. 114–117.

3 Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов и др.; под ред. С.К. Годунова. М.: Наука, 1976. 400 с.

4 Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics: A Practical Introduction Eleuterio F. Toro. Berlin: Springer, 2009. 479 p.

### References

1 Irov Yu.D., Keil E.V., Maslov B.N., etc. Gas-dynamic functions. М.: Mashinostroenie, 1965. 398 p.

2 Chervakova A.V., Kostyushin K.V., Sereda M.S. Development of an engineering application for calculating the main parameters of the gas flow in the Laval nozzle taking into account the backpressure // Proceedings of the VIII All-Russian Scientific Conference «Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics – 2018»; ed. M. Yu. Orlov. Tomsk: Publishing "Krasnoe znamya", 2019. Pp. 114–117.

3 Numerical solution of multidimensional problems of gas dynamics / S.K. Godunov, A.V. Zabrodin, M.Ya. Ivanov etc.; ed. S.K. Godunov. М.: Nauka, 1976. 400 p.

4 Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics: A Practical Introduction Eleuterio F. Toro. Berlin: Springer, 2009. 479 p.

## РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ПОКРЫТИЯ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Д.В. Янов<sup>1,2</sup>, С.А. Зелепугин<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Россия  
yanov.dima97@mail.ru

**Ключевые слова:** дорожная одежда, коэффициент запаса прочности, метод конечных элементов.

**Аннотация.** Данная работа посвящена использованию метода конечных элементов для расчета нежесткой четырехслойной дорожной одежды на прочность при действии заданной статической нагрузки. Предложенная методика расчета дорожной одежды позволяет оценить максимальные перемещения и коэффициент запаса прочности для асфальтобетонного покрытия. В результате расчетов выявлено расположение максимальных вертикальных перемещений и рассмотрены особенности деформирования дорожной одежды. Коэффициент запаса прочности в области действия заданной нагрузки не превышает критических значений и составляет  $3 \div 12$ .

# EVALUATION OF THE PAVEMENT STRENGTH USING THE FINITE ELEMENT METHOD

D. Yanov<sup>1,2</sup>, S. Zelepugin<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS, Russian Federation

**Keywords:** pavement, load factor, finite elements method.

**Abstract.** This work is devoted to the use of the finite element method for calculating the strength of the non-rigid four-layer pavement subjected to static load. The proposed technics for calculating pavement can evaluate the maximum displacement and the strength factor for asphalt concrete pavement. The calculations revealed the location of the maximum vertical displacements and the features of the pavement deformation. The strength factor for a given load does not exceed critical values and is  $3 \div 12$ .

При проектировании дорожной одежды (ДО) используют СНиП и ОДН Российской Федерации, в которых изложены основы строительства автодорог и аналитические методы расчета ДО на прочность, сдвигоустойчивость, влагостойкость [1]. Такой подход позволяет достаточно просто оценить экономические затраты, но имеет ряд недостатков, одним из которых является ограниченная вариативность конфигураций дорожной одежды. Современные вычислительные средства дают возможность проводить детальный анализ конструкции дорожной одежды по физико-механическим параметрам, выбирать оптимальную схему расположения слоев и материалов. Отдельно стоит обратить внимание на проблему расчета покрытия на прочность, т.к. в этой области возникают сжимающие и растягивающие напряжения при упругом прогибе, которые могут приводить к появлению магистральных трещин и образованию дорожной колеи [2]. Из этих соображений поставлена цель – применить метод конечных элементов для расчета вертикальных перемещений и коэффициента запаса прочности для покрытия дорожной одежды.

Постановка задачи соответствует плоскодеформированному состоянию, поэтому рассматривается поперечное сечение дорожной одежды, на поверхность которого приложена статическая нагрузка, в качестве которой рассматривается танк Т-90 с резиновыми накладками на гусеницах. Расчет узловых сил в области приложения нагрузки производился по следующей формуле (1):

$$F = \frac{Mgl}{2Ln} \quad (1)$$

где  $M$  - масса танка, равная 46.5 т;  $g$  - ускорение свободного падения,  $9.8 \text{ м/с}^2$ ;  $l$  - расчетная длина конечного элемента, 1 м;  $L$  - длина гусеницы танка, 4.26 м;  $n$  - число узлов, на которые действует приведенная нагрузка  $Q$ . Дорожная одежда состоит из 4 слоев: 1) асфальтобетон плотный,  $h = 5 \text{ см}$ ; 2) асфальтобетон высокопористый,  $h = 5 \text{ см}$ ; 3) гравийная смесь,  $h = 50 \text{ см}$ ; 4) супесь пылеватая,  $h = 80 \text{ см}$ , где  $h$  - толщина слоя [1].

Для численных расчетов применялась специально разработанная вычислительная программа, написанная на C++ и основанная на методе конечных элементов [3, 4].

Расчет вертикальных перемещений для асфальтобетона плотного и пористого показал, что максимальный прогиб наблюдается в области контакта правой гусеницы (ближе к обочине) с покрытием ДО. Это связано с тем, что правая гусеница находится близко к откосу и обочине, модуль упругости которых в 13 раз меньше модуля упругости асфальтобетонного покрытия [5]. Поля вертикальных перемещений для левой гусеницы распределены более равномерно по всей поверхности ДО.

Для анализа несущей способности покрытия и основания дорожной одежды используется коэффициент запаса прочности (КЗП):  $k = \sigma_b / \sigma$ , где  $\sigma_b$  – предельно допустимое значение рассматриваемой величины,  $\sigma$  – напряжения, вычисляемые по выбранному критерию. При оценке прочности покрытия автодороги необходимо учитывать, что материал подвергается сжимающим напряжениям, поэтому  $\sigma_b$  – критическое напряжение при сжатии. В качестве  $\sigma$  рассматривается интенсивность напряжений по Мизесу.

Расчеты показывают, что в области контакта гусениц танка  $k_n$  составляет  $3 \div 12$ . Между гусеницами танка КЗП в среднем возрастает до 15. В правой части автодороги КЗП покрытия возрастает до 120 и выше вследствие несимметричности нагрузки.

Таким образом, создан расчетный комплекс для проектирования дорожной одежды, основанный на методе конечных элементов в упругой постановке. Проведен численный расчет покрытия автодороги на заданную статическую нагрузку. Определены поля вертикальных перемещений во всех слоях дорожной одежды, а также рассчитан коэффициент запаса прочности для асфальтобетона плотного и пористого. Согласно полученным данным покрытие автодороги сохраняет несущую способность.

## Литература

1. ОДН 218.046-01 Проектирование нежестких дорожных одежд. М.: Информавтодор, 2001, 146 с.
2. Колесников Г.Н., Гаврилов Т.А. Моделирование условий появления низкотемпературных трещин в асфальтобетонном слое автомобильной дороги // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика, 2018, № 56. С. 57–66. DOI: 10.17223/19988621/56/5.

3. Янов Д.В., Пашков С.В., Зелепугин С.А. Разработка программного комплекса для проектирования автомобильных дорожных одежд // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики (ФППСМ-2018): сб. тр. X Всероссийской научной конференции, 3–5 сентября 2018 года, г. Томск. Томск: Томский государственный университет, 2018. С. 145–147.

4. Попов А.А. Программное обеспечение для решения задач механики деформируемого твердого тела // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2019. Т. 19, № 5. С. 939–946. DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-939-946.

5. Yanov D.V., Zelepugin S.A. Road pavement design using the finite element method // Journal of Physics: Conference Series, 2019. Vol. 1214, 012024. DOI: 10.1088/1742-6596/1214/1/012024.

## References

1. Road design standards ODN 218.046-01. Moscow: Informavtodor. 2001. 146 p.

2. Kolesnikov G.N., Gavrilov T.A. Simulation of the conditions for a low-temperature crack appearance in the asphalt concrete layer of a road // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics], 2018, no. 56. Pp. 57–66. DOI: 10.17223/19988621/56/5.

3. Judycki J. A new viscoelastic method of calculation of low-temperature thermal stresses in asphalt layers of pavements // International Journal of Pavement Engineering, 2018, Vol. 9. Iss. 1. P. 24–36. DOI: 10.1080/10298436.2016.1199883.

4. Popov A.A. Software for deformable solid mechanics // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2019, Vol. 19, no. 5. Pp. 939-946. DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-939-946.

5. Yanov D.V., Zelepugin S.A. Road pavement design using the finite element method // Journal of Physics: Conference Series, 2019. Vol. 1214, 012024. DOI: 10.1088/1742-6596/1214/1/012024.

## 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**



# ТРЕХМЕРНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ С ВНУТРЕННИМ ПОВОРОТОМ. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

**Л.Р. Ахметшин**

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия  
Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
akhmetshin.lr@gmail.com

**Ключевые слова:** механические метаматериалы, хиральная структура, деформация, упругие свойства, численное моделирование.

**Аннотация.** Рационально разработанные искусственные материалы обеспечивают механические свойства, недоступные обычным материалам. При одноосном силовом нагружении образца из классического материала его поворот равен нулю. Дополнительную вращательную степень свободы возможно реализовать в механических метаматериалах, элементарная ячейка которых обладает хиральной структурой. В работе построена численная модель стержня из тетрахиального метаматериала. Методом численного моделирования изучено влияние параметра элементарной ячейки метаматериала на его упругий отклик при одноосном нагружении.

## THREE-DIMENSIONAL MECHANICAL METAMATERIALS WITH INTERNAL ROTATION. A NUMERICAL STUDY

**L. Akhmetshin**

Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Russian Federation  
National Research Tomsk State University, Russian Federation  
akhmetshin.lr@gmail.com

**Keywords:** mechanical metamaterials, chiral structure, deformation, elastic properties, numerical modeling.

**Abstract.** Rationally designed artificial materials provide mechanical properties that are not available to conventional materials. Uniaxial force loading of an ordinary material specimen never results in its rotation. An additional rotational degree of freedom can be realized in mechanical metamaterials which unit cell has a chiral structure. Here, a numerical model of a rod made of a tetrachiral metamaterial is constructed. We studied the effect of parameter of the metamaterial unit cell on its elastic response in uniaxial loading using numerical simulation methods. The unit cell parameter that influences the metamaterial twist angle was determined.

Метаматериалы представляют собой новый, бурно развивающийся в последние десятилетия класс материалов, необычные свойства которых определяются не их химическим составом, а специальным образом организованной структурой. Главным образом это направление получило свое развитие от прогрессирующей технологии 3D печати [1]. Рационально раз-

работанные искусственные композиционные материалы, создаваемые с микро- и даже наноуровня, открыли дверь в мир механических метаматериалов, свойства которых ранее были недоступны. Одним из примеров таких необычных свойств является появление вращательной степени свободы при деформировании метаматериалов с хиральной структурой [2]. Перспектива применения трехмерных метаматериалов с вращательной степенью свободы заключается в возможности преобразования продольной упругой волны, распространяющейся в таком материале, в поперечную. Наряду с функционально-градиентными материалами не исключена возможность использовать метаматериалы в качестве материалов ударостойких защит [3]. В случае статического одноосного нагружения возможен поворот стержня. В обычных материалах это не может быть реализовано, поскольку обычное упругое твердое тело не может поворачиваться вдоль своей оси при приложенной нормальной силовой нагрузке (например, растяжение или сжатие).

Целью работы является исследование механического поведения стержня метаматериала с хиральной структурой при одноосном нагружении.

На основе данных статьи [2] в программном комплексе ANSYS была построена твердотельная численная модель трёхмерной хиральной микроструктурированной ячейки механического метаматериала с вращательной степенью свободы. За основу была взята двухмерная лево-тетрахирализованная структура [4]. Элементарная ячейка имеет четырехкратную симметрию вращения при вращении вокруг трех главных кубических осей. Математическая постановка задачи деформирования метаматериала принята в рамках линейной теории упругости.

Проведенный статический численный анализ методом конечных элементов показал, что при одноосном сжатии происходит закручивание ячейки на незначительный угол вдоль оси приложенной силы (рис. 1).

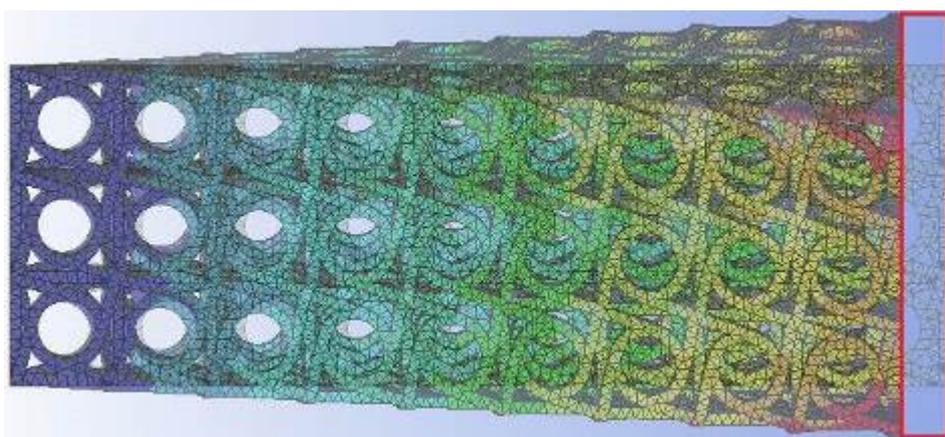


Рис. 1. Поворот метаматериала при одноосном нагружении

При уменьшении внутреннего радиуса кольца  $r$  метаматериала угол поворота уменьшается, это закономерно, так как удельный объем метамате-

риала увеличивается, заполняя больше пространства сплошным телом. Значения  $r$  изменялись от 12,5 до 0 мм с равным шагом 2,5 мм. После достижения  $r = 4,5$  мм поведение метаматериала практически не меняется.

Для более полного изучения свойств этого тетрахирального метаматериала необходимо изучить влияние других параметров его элементарной ячейки на особенности его деформации при одноосном нагружении.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект Ш.23.2.12.

### Литература/ References

1. *Kweun J.M., Lee H.J., Oh J.H., Seung H.M., Kim Y.Y.* Transmodal Fabry-Pérot Resonance: Theory and Realization with Elastic Metamaterials // *Phys. Rev. Lett.* 2017. 118. Pp. 205901-1–205901-6.
2. *Frenzel T., Kadic M., Wegener M.* Three-Dimensional Mechanical Metamaterials with a Twist // *Science.* 2017. 358(6366). Pp. 1072–1074.
3. *Orlov M., Orlov Y., Orlova Y., Glazyrin V.* Investigation of the behaviour of functionally graded materials under impact loads // *EPJ Web of Conferences.* 2018. Vol. 183. 01049 (DYMAT 2018).
4. *Fu M.-H., Zheng B.B., Li W.-H.* A novel chiral three-dimensional material with negative Poisson's ratio and the equivalent elastic parameters // *Composite Structures.* 2017. 176. Pp. 442–448.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ И МИКРОЧАСТИЦ ДИБОРИД ТИТАНА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВА АМГ<sub>5</sub>

**В.Д. Валихов, А.П. Хрусталёв, А.Б. Ворожцов, И.А. Жуков**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
valihov.snobls@gmail.com

**Ключевые слова:** сплав, алюминий, магний, наночастицы, микрочастицы.

**Аннотация.** Исследовано влияние наноразмерного оксида алюминия и микроразмерного диборида титана на структуру и механические свойства алюмо-магниевого сплава АМГ<sub>5</sub>. Показано, что введение наноксида алюминия и микроразмерного диборида титана приводит к измельчению среднего размера зерна и увеличивает твёрдость. Установлено, что выбранные технологические приёмы позволяют сохранить исходную структуру наночастиц при введении в расплав, о чём свидетельствуют полученные результаты и показатели плотности.

# INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF ALUMINUM OXIDE NANOPARTICLES AND TITANIUM DIBORIDE MICROPARTICLES ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF AMГ-5 ALLOY

V. Valikhov, A. Khrustalyov, I. Zhukov, A. Vorozhtsov

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

**Keywords:** alloy, aluminum, magnesium, nanoparticles, microparticles.

**Abstract.** Research on the effect of nanoparticles and microparticles on the structure and properties of various alloys has been conducted by scientists for more than one year. This article examined the effect of alumina nanoparticles and titanium diboride microparticles on the 1550 aluminum alloy. The particles were introduced using modern melt processing methods, such as ultrasonic and vibration processing. It is shown that the introduction of nano alumina and microsize titanium diboride leads to grinding of the average grain size and increases hardness.

Технический прогресс ставит перед производителями компонентов летательных устройств, наземного транспорта и космических аппаратов всё новые задачи по поиску материалов, которые будут удовлетворять более жёсткими условиями эксплуатации, но в то же время достаточно экономичными. При создании металлокомпози́тов в качестве матрицы выгодно применять алюминиевые сплавы ввиду очевидных сравнительных преимуществ: хорошие литейные свойства, высокая коррозионная стойкость, низкая стоимость, и др.

Целью данной работы было изучение влияния наночастиц оксида алюминия и микрочастиц диборида титана на структуру и свойства сплава АМГ<sub>5</sub>.

Наночастицы оксида алюминия были получены методом электрического взрыва проводника, имеют правильную сферическую форму и средний размер, равный 36 нм. Микрочастицы диборида титана были получены методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и их средний размер составил 0.7 мкм.

Исследуемый алюминиевый сплав нарезали на части и расплавляли в графитовом тигле и выдерживали при температуре 740 °С в течение 30 минут. Далее в расплав вводили подготовленные лигатуры и для более равномерного распределения частиц в объеме расплава проводили механическое перемешивание миксером в течение 1 минуты. Окончательную обработку с целью дегазации расплава проводили под воздействием ультразвука при температуре расплава 740 °С в течение 1 мин.

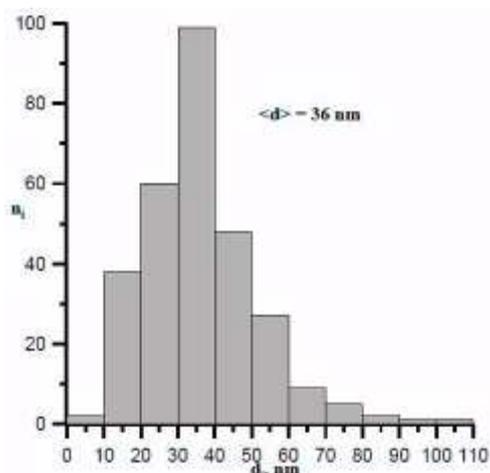


Рис. 1. Распределение частиц нанопорошка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  по размерам

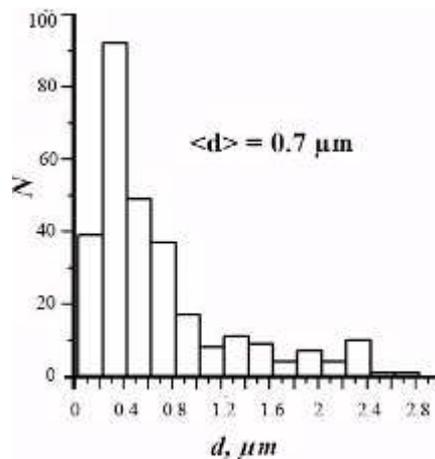


Рис. 2. Гистограмма распределения керамических частиц  $\text{TiB}_2$  по размерам

В результате исследования было установлено, что средний размер зерна сплава АМГ<sub>5</sub> уменьшился с 185 до 166 мкм, значение твёрдости по шкале Бриннеля незначительно изменилось с 70 до 68 НВ, а значение микротвёрдости по шкале Виккерса увеличилось с 52 до 76 НВ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации (МК-506.2019.8).

### Литература

1. Хрусталёв А.П. и др. Структура и механические свойства композиционных материалов на основе магния, упрочненных наночастицами нитрида алюминия // Известия высших учебных заведений. Физика. 2016. Т. 59, №. 12. С. 176–178.
2. Kaftelen H., Öveçoğlu M.L. Microstructural characterization and wear properties of ultra-dispersed nanodiamond (UDD) reinforced Al matrix composites fabricated by ball-milling and sintering // Journal of composite materials. 2012. Vol. 46. Is. 13. Pp. 1521–1534.
3. Калинина Н.Е., Кавац О.А., Калинин В.Т. Повышение технологических свойств литейных алюминиевых сплавов при модифицировании нанодисперсными частицами // Авиационно-космическая техника и технология. 2010. №. 4. С. 17–20.

### References

1. Khrustalyov A.P. et al. Structure and mechanical properties of magnesium-based composite materials hardened by aluminum nitride nanoparticles // Physics. 2016. Vol. 59. Is. 12. Pp. 176–178.
2. Kaftelen H., Öveçoğlu M.L. Microstructural characterization and wear properties of ultra-dispersed nanodiamond (UDD) reinforced Al matrix composites fabricated by ball-milling and sintering // Journal of composite materials. 2012. Vol. 46. Is. 13. Pp. 1521–1534.
3. Kalinina N.E., Kavats O.A., Kalinin V.T. Improving the technological properties of cast aluminum alloys when modified with nanodispersed particles // Aerospace Engineering and Technology. 2010. Vol. 4. Pp. 17–20.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕДОВЫХ ПЕРЕПРАВ УСИЛЕННЫХ АРМИРУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ В УСЛОВИЯХ ИЗГИБНО-ГРАВИТАЦИОННОГО РЕЗОНАНСА

**А.С. Васильев, В.Л. Земляк, В.М. Козин**

ФГБОУ ВО Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема, Россия  
Vasil-grunt@mail.ru

**Ключевые слова:** модуль упругости, напряженно-деформированное состояние, дифференциальное уравнение изгиба ледяной пластины.

**Аннотация.** Практический опыт показывает, что физико-механические свойства ледяного покрова, усиленного данными методами, могут сильно зависеть от различных внешних факторов. В связи с этим перспективным становится создания новых композиционных материалов повышенной прочности на основе льда путем внедрения в него армирующих элементов с различными физико-механическими свойствами. Для этой цели может быть использован относительно тонкий ледяной покров толщиной 0.3–0.4 м, в который внедрены армирующие каркасы из различных материалов, и вычислены модули упругости получившихся конструкций. Впоследствии эти модули упругости будут подставляться в дифференциальное уравнение изгиба ледяной пластины с целью определения напряженно-деформированного состояния (НДС) ледяного покрова.

## STUDY OF ICE CROSSINGS REINFORCED WITH REINFORCING ELEMENTS UNDER FLEXURAL-GRAVITY RESONANCE CONDITIONS

**A. Vasilyev, V. Zemlyak, V. Kozin**

Amur State University named after Sholom Aleichem, Russian Federation  
Vasil-grunt@mail.ru

**Keywords:** Modulus of elasticity, stress-strain state, differential equation for the bending of an ice plate.

**Abstract.** Practical experience shows that the physicomachanical properties of ice cover enhanced by these methods can strongly depend on various external factors. In this connection, the creation of new high-strength composite materials based on ice through the introduction of reinforcing elements with different physical and mechanical properties becomes promising. For this purpose, relatively thin ice cover with a thickness of 0.3–0.4 m can be used, in which reinforcing cages of various materials are embedded, and the elastic moduli of the resulting structures are calculated. Subsequently, these elastic moduli will be substituted into the differential equation for the bending of the ice plate, in order to determine the stress-strain state (SSS) of the ice cover.

В обширных районах Сибири, Крайнего Севера и Дальнего Востока, в болотистых и лесистых регионах Российской Федерации, в районах, кото-

рых зачастую не имеется мостов через многочисленные ручьи и реки, и в остальных труднопроходимых условиях местности основным вариантом грузоперевозки являются перевозки по зимникам и ледовым переправам [1]. В работе [2] при помощи методов механики сплошных сред изучен процесс разрушения ледяного покрова под действием продуктов детонации. Часто зимние автодороги используются для переправки грузов и оборудования на нефтегазодобывающие промыслы и месторождения, на которых ведется разведывательная деятельность [2, 3].

Целью работы является определение НДС ледяного покрова с момента начала его нагружения до полного разрушения. Задача решается путем использования известных математических зависимостей. Физико-механические свойства армированного ледяного покрова получены экспериментальным путем, при проведении автором проекта полунатурных модельных экспериментов в лаборатории ледотехники Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- сделать литературный обзор и изучить способы усиления ледовых переправ, выявить нерешенную проблему для исследования;
- изучить метод определения напряженно-деформированного состояния при движении по нему нагрузки, на основе дифференциального уравнения изгиба ледяной пластины;
- получить на основе модельных экспериментов физико-механические свойства льда, как чистого, так и усиленного армирующими каркасами.

В рамках выполненного исследования стоит сделать следующие выводы:

- выполненные экспериментальные исследования показали высокую перспективность использования методов поверхностного армирования для повышения несущей способности ледяного покрова;
- как показал предварительный модельный эксперимент, использование армирующих каркасов из стальной арматуры диаметром 6 мм приводит к увеличению величины нагрузки выдерживаемой образцом шириной 20 см от 1.6 до 4.2 раза в зависимости от схемы армирования;
- несущая способность от числа поперечных связей не изменялась;
- наиболее эффективно в составе ледовой балки работали каркасы с дополнительными продольными связями, особенно при их расположении в боковой плоскости вблизи поверхностей максимального растяжения и сжатия;
- предложенные схемы армирования можно использовать для льда значительно меньшей толщины (порядка 30–40 см) чем при традиционных методах создания переправ (80–100 см), что может существенно продлить срок их эксплуатации;

– данные расчетов достаточно хорошо согласуются с данными модельных экспериментов по величинам прогибов, что говорит о корректности использования предложенного алгоритма.

### Литература

1. Земляк В.Л., Курбацкий Д.А., Баурин Н.О. Лаборатория “Ледотехники” // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2013. Т. 12, № 1. С. 75–84.
2. Орлова Ю.Н. Исследование процесса подрыва заснеженного ледяного покрова эмульсионной взрывчаткой // Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» 26–28 ноября 2018 г.: Материалы конференции / под ред. М.Ю. Орлова. Томск: Изд-во «Красное знамя». 2019. С. 66–69.
3. Зувев В.А., Козин В.М. Использование судов на воздушной подушке для разрушения ледяного покрова. Владивосток: Изд-во ДВГУ, 1988. 215 с.
4. Никитин П.Е., Никитина М.П. Способ создания армированной ледовой переправы для широких водоемов / патент на изобретение РФ №2569694, опубл. 27.11.2015

### References

1. Zemlyak V.L., Kurbatsky D.A., Baurin N.O. Laboratory of Ice Engineering // Bulletin of the Amur State University named after Sholem Aleichem. 2013. Vol. 12, no. 1. S. 75–84.
2. Orlova Yu.N. Snow-covered ice subjected explosive loading. Under results'2019. // All-Russian Youth Scientific Conference "Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics", November 26–28, 2018: The conference proceedings / Ed. M.Yu. Orlov. Tomsk: "Izdatelstvo "Krasnoe znamya", 2019. Pp. 66–69.
3. Zuev V.A., Kozin V.M. The use of hovercraft to destroy ice cover. Vladivostok: FENU Publishing House, 1988. 215 s.
4. Nikitin P.E., Nikitina M.P. A method of creating a reinforced ice crossing for wide reservoirs, Patent for the invention of the Russian Federation No. 2569694, publ. 27.11.2015

## ВЛИЯНИЕ ВВЕДЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ В РАСПЛАВ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ НА СТРУКТУРУ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЧИСТОГО АЛЮМИНИЯ

Д.Б. Даутбаева, Н.И. Кахидзе

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
dtbv2018@gmail.com

**Ключевые слова:** алюминий, композиционный материал, наночастицы, микроструктура, механические свойства, твердость, электропроводность.

**Аннотация.** В работе проведен комплекс исследований физико-механических свойств образцов из технически чистого алюминия, упрочненного наночастицами ок-

сида алюминия, и подвергнутых деформационной обработке методом интенсивной пластической деформации по схеме равноканального углового прессования. Оценка полученных результатов после измерения микротвердости, предела текучести, прочности при одноосном растяжении и электропроводности показала повышение всех измеряемых величин в сплаве при одновременном снижении пластичности по мере увеличения количества повторений обработки, что является следствием измельчения его структуры в результате накопления пластической деформации. Результаты исследований показали эффективность выбранного метода обработки для получения повышенных физико-механических свойств в исследуемом алюминиевом сплаве. Деформационная обработка упрочненного сплава повышает величину его электропроводности.

## **EFFECT OF NANOPARTICLES INTRODUCTION INTO THE MELT WITH SUBSEQUENT DEFORMATION TREATMENT ON STRUCTURE AND PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF PURE ALUMINUM**

**D. Dautbayeva, N. Kakhidze**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
dtbv2018@gmail.com

**Keywords:** aluminium, composite material, nanoparticles, microstructure, mechanical properties, hardness, conductivity.

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

В отлитом состоянии алюминиевые сплавы обладают высокой пластичностью и низкими показателями прочности, что неприемлемо при использовании электротехнических изделий даже в нормальных условиях эксплуатации [1]. Поэтому для повышения физико-механических свойств алюминиевые сплавы подвергают дисперсному легированию введением частиц [2] или деформационной обработке [3], после чего в материале повышаются значения твердости, условного предела текучести, временного сопротивления и изменяется пластичность. В данной работе предложен подход изменения физико-механических свойств технически чистого алюминия введением малого количества тугоплавких частиц  $Al_2O_3$  и последующей деформационной обработке интенсивной пластической деформацией (ИПД) по схеме равноканального углового прессования (РКУП).

Основной целью данного исследования стало изучение влияния деформационной обработки на механические свойства и показатели электропроводности технически чистого алюминия, упрочненного наночастицами оксида алюминия.

Методом литья технически чистого алюминия марки А0 с одновременным воздействием ультразвукового поля на расплав [2] были получены цилиндрические отливки исследуемого сплава содержащие частицы оксида алюминия в концентрации 0.1 масс. %. Из центральной части отливок были вырезаны призматические заготовки для деформационной обработки и последующих исследований. Деформационную обработку проводили методом ИПД по схеме РКУП в оснастке для прессования легких сплавов [4].

Анализируя экспериментальные данные, можно сказать, что введение в сплав технически чистого алюминия наночастиц  $Al_2O_3$  в количестве 0.1 масс. % увеличивает прочностные свойства сплава и снижает его пластичность.

После обработки РКУП отмечается значительное повышение физико-механических свойств исследуемых материалов, как микротвердости предела текучести и временного сопротивления, так и электропроводности при значительном уменьшении предельных степеней деформации. Установлены зависимости изменения значений временного сопротивления и электропроводности от степени накопленной деформации. Причиной изменения свойств являются процессы рекристаллизации внутренней структуры материала. Наличие в алюминиевой матрице наночастиц и других примесных элементов является препятствием для свободного пробега электронов. Поэтому электропроводность упрочненного частицами сплава ниже. Однако отмечается улучшение электрофизических характеристик после деформационной обработки. Обработка ИПД одновременно с измельчением зерна способствует дроблению агломератов  $Al_2O_3$  и равномерному распределению частиц второй фазы в структуре алюминиевого сплава таким образом, что расстояние между частицами растёт, и они не мешают свободному пробегу электронов, увеличивая показатели IACS. Необходимым условием для этого является среднее расстояние между частицами, которое должно быть не меньше величины свободного пробега электронов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-38-20081.

### Литература

1. *Белый Д.И.* Алюминиевые сплавы для токопроводящих жил кабельных изделий // Кабели и провода. 2012. № 2 (332). С. 8–15.
2. *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 prop-

erties modified by  $Al_2O_3$  nanoparticles and ultrasonic treatment. *Metals*. 2019. Т. 9. № 11. С. 1199.

3. Козулин А.А., Жуков И.А., Промахов В.В., Ворожцов А.Б., Хрусталеv 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.

4. Козулин А.А., Красновеvкин В.А., Скрипняк В.В., Хандаев Б.В., Ли Ю.В. Механические свойства алюминий магниевых сплавов после интенсивной пластической деформации // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 888.

## References

1. Belyi D.I. Aluminum alloys for the conducting cores of the cable products // *Cables and wires*. 2012. № 2 (332). Pp. 8–15.

2. 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. № 11. Pp. 1199.

3. 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. Pp. 23–30.

4. Kozulin A.A.; Krasnovevkin V.A.; Skripnyak V.V.; Khandaev B.V.; Li Yu.V. Mechanical properties of the aluminum magnesium alloys after an intensive plastic deformation // Modern problems of science and education. 2013. Vol. 6. Pp. 888.

## НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПОЛЯРНО-СИММЕТРИЧНЫЕ МЕХАНОДИФФУЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИЗОТРОПНОМ СПЛОШНОМ ЦИЛИНДРЕ

**Н.А. Зверев, А.В. Земсков**

Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет) Россия  
nikolayzverev1995@gmail.com

**Ключевые слова:** механо-dиффузия, нестационарные задачи, функции Грина, сплошной цилиндр, сплошная среда.

**Аннотация.** В настоящей работе рассматривается одномерная нестационарная полярно-симметричная задача, состоящая в определении напряженно-деформированного состояния изотропного сплошного многокомпонентного цилиндра, находящегося под влиянием поверхностных упругодиффузионных возмущений. Для решения поставленной задачи используется метод функций Грина, согласно которому искомые функции представляются в интегральном виде как свертки поверхностных функций Грина зада-

чи механодиффузии с функциями, заданными в правых частях граничных условий. Для нахождения функций Грина применяются интегральные преобразование Лапласа по безразмерному времени и преобразование Ханкеля по радиальной координате. Обращение преобразования Лапласа осуществляется аналитически с помощью вычетов. Найденные функции Грина представлены в виде тригонометрических рядов по синусам и по косинусам.

## UNSTEADY POLAR-SYMMETRIC MECHANODIFFUSION PROCESSES IN AN ISOTROPIC CONTINUOUS CYLINDER

N. Zverev, A. Zemskov

Moscow Aviation Institute (National Research University), Russian Federation  
nikolayzverev1995@gmail.com

**Keywords:** Mechanodiffusion, non-stationary problems, Green's functions, continuous cylinder, continuous medium.

**Abstract.** In this paper, we consider a one-dimensional nonstationary polar-symmetric problem consisting in determining the stress-strain state of an isotropic continuous multicomponent cylinder under the influence of surface elastic-diffusion perturbations. To solve the problem, the Green function method is used, according to which the desired functions are represented in integral form as convolutions of the surface Green functions of the mechanodiffusion problem with the functions specified in the right-hand sides of the boundary conditions. To find the Green's functions, the Laplace integral transform over dimensionless time and the Hankel transform along the radial coordinate are used. The inversion of the Laplace transform is carried out analytically using residues. The found Green's functions are presented in the form of trigonometric series in sines and cosines.

В настоящее время достаточно широко исследуются механодиффузионные процессы в твердых телах, изучаются воздействия на такие тела поверхностными и объемными возмущениями. Для более точного описания воздействия данных нагрузок на конструкции и их отдельные элементы, задачи ставятся и решаются не только в прямоугольной декартовой системе координат, но и в криволинейных системах координат, наиболее подходящих под геометрию физических тел [1–4].

В настоящей работе рассматривается одномерная нестационарная полярно-симметричная задача, состоящая в определении напряженно-деформированного состояния изотропного сплошного многокомпонентного цилиндра, находящегося под влиянием поверхностных упругодиффузионных возмущений.

Математическая постановка задачи содержит связанную систему линейных однородных дифференциальных уравнений в частных производных с постоянными коэффициентами, а именно: уравнение движения сплошной среды и уравнения массопереноса, записанные в цилиндриче-

ской системе координат. Замыкают математическую постановку задачи краевые условия и принятые нулевыми начальными условиями.

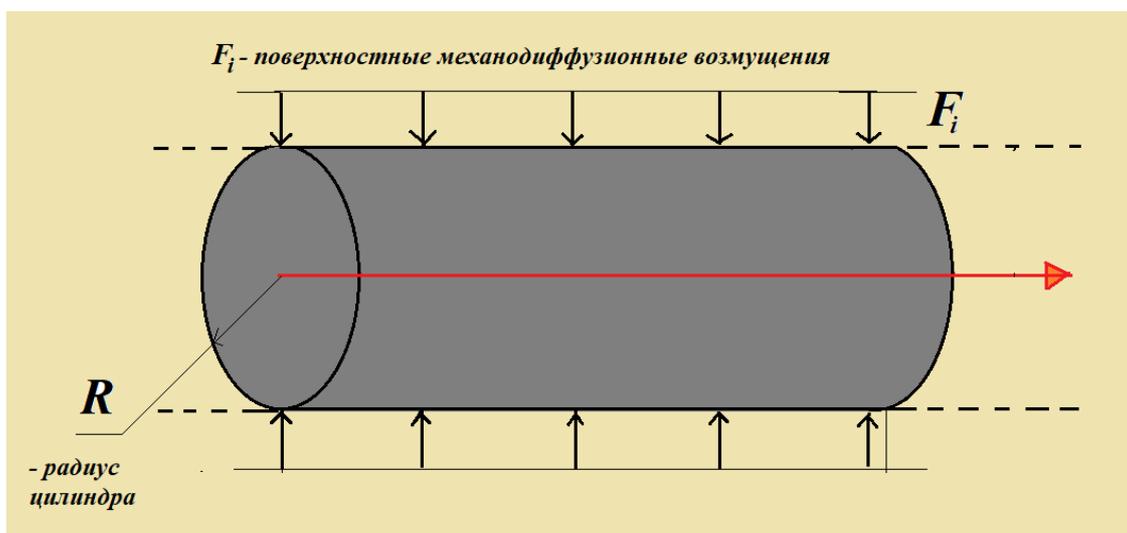


Рис. 1. Иллюстрация к постановке задачи

Для решения поставленной задачи используется метод функций Грина [1, 2], согласно которому искомые функции представляются в виде свертки поверхностных функций Грина задачи механо-диффузии с функциями, заданными в правых частях граничных условий. Для нахождения функций Грина применяются интегральные преобразование Лапласа по безразмерному времени и преобразование Ханкеля по радиальной координате. Обратное преобразование Лапласа осуществляется аналитически с помощью вычетов. Найденные функции Грина представлены в виде тригонометрических рядов по синусам и по косинусам. Выполнен тестовый расчет для конкретного числового примера, полностью иллюстрирующего достоверность полученных теоретических результатов.

### Литература

1. Zemskov A.V., Tarlakovskii D.V. Polar-symmetric problem of elastic diffusion for isotropic multi-component plane // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016. Vol. 158. No 1, 012101.
2. Зверев Н.А., Земсков А.В. Постановка нестационарной задачи упругой диффузии для изотропного сплошного цилиндра // Проблемы безопасности на транспорте: материалы IX Международной научно-практической конференции. Гомель: БелГУТ, 2019. Ч. 2. С. 212–221.
3. Bhattacharya D., Kanoria M. The influence of two temperature generalized thermoelastic diffusion inside a spherical shell // International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR). 2014. Vol. 2. Is. 5. Pp. 151–159.
4. Deswal S., Kalkal K.K., Sheoran S.S. Axi-symmetric generalized thermoelastic diffusion problem with two-temperature and initial stress under fractional order heat conduction // Physica B: Condensed Matter. 2016. Vol. 496. Pp. 57–68.

## References

1. *Zemskov A.V., Tarlakovskii D.V.* Polar-symmetric problem of elastic diffusion for isotropic multi-component plane // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016. Vol. 158, No 1, 012101.
2. *Zverev N.A., Zemskov A.V.* Formulation of the unsteady problem of elastic diffusion for an isotropic continuous cylinder // IX International scientific and practical conference "Transport safety aspects". November 28–29, 2019. Gomel: BelGUT, 2019. Part two. Pp. 212–221.
3. *Bhattacharya D., Kanoria M.* The influence of two temperature generalized thermoelastic diffusion inside a spherical shell // International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR). 2014. Vol. 2. Is. 5. Pp. 151–159.
4. *Deswal S., Kalkal K.K., Sheoran S.S.* Axi-symmetric generalized thermoelastic diffusion problem with two-temperature and initial stress under fractional order heat conduction // Physica B: Condensed Matter. 2016. Vol. 496. Pp. 57–68.

## МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ МАГНИЕВОГО СПЛАВА МА2-1 ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ТЕМПЕРАТУРНОМ ДИАПАЗОНЕ ОТ 295 ДО 673 К ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ПАРАМЕТРА ТРЕХОСНОСТИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

**К.В. Иохим, В.В. Скрипняк, А.А. Козулин, В.А. Скрипняк**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
iochim.k@mail.ru

**Ключевые слова:** высокоскоростная деформация, повреждение, разрушение при растяжении, параметр трехосности напряженного состояния, повышенные температуры, магниевые сплавы.

**Аннотация.** В работе представлены результаты экспериментальных исследований механического поведения сплава при высокоскоростном растяжении при комнатной и повышенных температурах (до 0.75 температуры плавления). Цель работы состояла в изучении влияния скорости деформации и параметра трехосности напряженного состояния на сопротивление пластической деформации и эволюцию повреждаемости магниевого сплава Mg – 3%, Al – 1% Zn в диапазоне температур от 295 до 673 К. Получены данные о влиянии параметра трехосности напряженного состояния в диапазоне от 0.33 до 0.5 на напряжение течения и величину предельной деформации до разрушения магниевого сплава при растяжении со скоростями деформации 100 и 1000 с<sup>-1</sup> при температурах 295, 473 и 673 К. Обнаружено, что с ростом параметра трехосности напряженного состояния в диапазоне от 0.33 до 0.5 величина предельной деформации до разрушения при растяжении сплавов магния уменьшается в 2 раза. Полученные данные были использованы для калибровки моделей пластического деформирования и разрушения магниевого сплава МА2-1.

# MECHANICAL BEHAVIOR OF MAGNESIUM ALLOY MA2-1 AT HIGH-SPEED DEFORMATION IN THE TEMPERATURE RANGE FROM 295 K TO 673 K AT DIFFERENT VALUES OF THE TRIAXIAL STRESS STATE PARAMETER

K. Iokhim, V. Skripnyak, A. Kozulin, V. Skripnyak

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

**Keywords:** high-strain rates, damage, fracture under tension, the stress triaxiality factor, elevated temperatures, magnesium alloys.

**Abstract.** The paper presents the experimental results of the mechanical behavior of Mg – 3%, Al – 1%, Zn alloy at high strain rates at room and elevated temperatures. The goal of the research was studying the influence of the strain rate and the stress triaxiality factor on the resistance to plastic deformation and the damage evolution to the magnesium alloy Mg – 3%, Al – 1% Zn in the temperature range from 295 to 673 K. Data on the stress triaxiality effect on the plastic flow stress and the strain to fracture of the magnesium alloy under tension with strain rates of 100 and 1000  $\text{s}^{-1}$  at temperatures of 295, 473 and 673 K were obtained. The stress triaxiality factor was varied within the range from 0.33 to 0.5. It was found that the value of tensile strain to fracture of the magnesium alloy decreased twice when the stress triaxiality factor increased from 0.33 to 0.5. The obtained data were used for calibration of plastic deformation and fracture models which are used in computer-aided design of products from MA2-1magnesium alloy.

Легкие сплавы на основе магния, относящиеся к изомеханической группе сплавов с гексагональной плотноупакованной решеткой, обладают повышенными удельными прочностными характеристиками и применяются для создания металлических легких и надежных конструкций [1–4].

Физические механизмы пластической деформации ГПУ-систем, связанные с двойникованием и дислокационным скольжением, обуславливают различие закономерностей упругопластического деформирования магниевых сплавов при сжимающих и растягивающих нагрузках. При деформации магниевых сплавов в температурном диапазоне от 423 до 673 K происходит интенсивная динамическая рекристаллизация, сопровождающаяся изменением механических свойств. Это свидетельствует о том, что в процессе деформации магниевых сплавов возникает деформационная анизотропия, которая обусловлена формирующейся текстурой на мезоскопическом уровне.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований сплава MA2-1, полученных при растяжении скоростями деформации 100 и 1000  $\text{s}^{-1}$  при температурах 295, 473 и 673 K, а также результаты численного моделирования, воспроизводящего условия натуральных испытаний. Начальные параметры трехосности напряженного состояния составляли от 0.33 до 0.5. Экспериментальные исследования проводились на высокоско-

ростном стенде Instron VHS 40/50-20. Испытаниям были подвергнуты плоские образцы с гладкой рабочей частью и с надрезами, имеющими радиусы 2.5, 5 и 10 мм.

Нагрев образцов осуществлялся с помощью плоских керамических инфракрасных излучателей. Полученные данные были использованы для калибровки уравнений моделей пластического деформирования Зерилли – Армстронга или Джонсона – Кука и модели Гурсона – Твергаарда–Нидельмана (GTN) разрушения магниевого сплава МА2-1, применяющиеся при компьютерном проектировании легких и прочных конструкций. Полученные численные значения коэффициентов моделей позволяют описать упругопластическое деформирование, развитие повреждений, а также разрушения сплава МА2-1 (аналог AZ31) в широком диапазоне температур и скоростей деформации.

Полученные данные указывают, что параметр трехосного напряженного состояния в диапазоне от 0.33 до 0.5 существенно влияет на напряжение течения и величины продольной деформации до разрушения магниевого сплава при растяжении скоростями деформации от 0.001 до 1000 с<sup>-1</sup> в широком диапазоне температур.

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

### Литература

1. *Frost H.J., Ashby M.F.* Deformation Mechanism Maps. Oxford: Pergamon Press. 1983. Pp. 166.
2. *Ulacia I., Dudamell N.V., Galvez F., Sangbong Yi.* Mechanical behavior and microstructural evolution of a Mg AZ31 sheet at dynamic strain rates. *Acta Materialia*. 2010. Vol. 58. Pp. 2988–2998.
3. *Ulacia I., Salisbury C.P., Hurtado I., Worswick M.J.* Tensile characterization and constitutive modeling of AZ31B magnesium alloy sheet over wide range of strain rates and temperatures. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011. Vol. 211. No. 5. Pp. 830–839.
4. *Valoppi B., Bruschi S., Ghiotti A., Shivpur R.* Johnson-Cook based criterion incorporating stress triaxiality and deviatoric effect for predicting elevated temperature ductility of titanium alloy sheets. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2017. Vol. 123. Pp. 94–105.
5. *Скрипняк В.А., Скрипняк В.В., Козулин А.А., Иохим К.В.* Влияние концентраторов напряжений на механическое поведение магниевого сплава при высокоскоростной деформации в температурном диапазоне от 295 до 673 К // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2019. № 1. С. 151–160.

### References

1. *Frost H.J., Ashby M.F.* Deformation Mechanism Maps. Oxford: Pergamon Press. 1983. Pp. 166.
2. *Ulacia I., Dudamell N.V., Galvez F., Sangbong Yi.* Mechanical behavior and microstructural evolution of a Mg AZ31 sheet at dynamic strain rates. *Acta Materialia*. 2010. Vol. 58. Pp. 2988–2998.
3. *Ulacia I., Salisbury C.P., Hurtado I., Worswick M.J.* Tensile characterization and constitutive modeling of AZ31B magnesium alloy sheet over wide range of strain rates and temperatures. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011. Vol. 211. No. 5. Pp. 830–839.

4. Valoppi B., Bruschi S., Ghiotti A., Shivpur R. Johnson-Cook based criterion incorporating stress triaxiality and deviatoric effect for predicting elevated temperature ductility of titanium alloy sheets. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2017. Vol. 123. Pp. 94–105.

5. Skripnyak V.A., Skripnyak V.V., Kozulin A.A., Iohim K.V. The influence of stress concentrators on the magnesium alloy mechanical behavior under deformation at high strain rates in the temperature range from 295 to 673 K. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2019. No. 1. Pp. 151–160. (Rus.)

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ, ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ХАРАКТЕРА РАЗРУШЕНИЙ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО АЛЮМИНИЯ, МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОЧАСТИЦАМИ $Al_2O_3$

**Н.И. Кахидзе, А.П. Хрусталёв, И.А. Жуков, А.Б. Ворожцов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
nick200069@yandex.ru

**Ключевые слова:** алюминий, композиционный материал, наночастицы, микроструктура, механические свойства, твёрдость, чувствительность к скорости деформации.

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследований технически чистого алюминия, модифицированного наночастицами  $Al_2O_3$ . Исследования структуры полученных сплавов, расчёты среднего размера зерна, определения твёрдости и микротвёрдости. Получены показатели условного предела текучести, временного сопротивления и пластичности при разных скоростях деформации, определена чувствительность к скорости деформации.

## INVESTIGATION OF THE STRUCTURE, PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES, AND THE FRACTURE MODE UNDER STATIC AND LOW-CYCLE LOADING OF TECHNICALLY PURE ALUMINUM MODIFIED WITH $Al_2O_3$ NANOPARTICLES

**N. Kakhidze, A. Khrustalyov, I. Zhukov, A. Vorozhtsov**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
nick200069@yandex.ru

**Keywords:** aluminum, composite material, nanoparticles, microstructure, mechanical properties, hardness, sensitivity to deformation rate.

**Abstract:** the paper presents the results of studies of technically pure aluminum modified with  $Al_2O_3$  nanoparticles. Studies of the structure of the obtained alloys, calculations of the average grain size, determination of hardness and microhardness. The indices of the condi-

tional yield strength, temporary resistance and ductility at different strain rates are obtained, and sensitivity to the strain rate is determined.

Введение в матричный расплав лёгких металлов наноразмерных модификаторов позволяет образовать дополнительные центры кристаллизации, приводя к дисперсному упрочнению [1] и преграды дальнейшему движению дислокаций при нагружении материала [2], что, в конечном итоге, должно позволить заменить в транспортостроении тяжеловесные стали лёгкими и сверхлёгкими материалами. Непосредственное введение модификаторов в расплав невозможно из-за проблем агломерации и флотации наночастиц, приводящие к увеличению пористости исходного материала.

Для изучения влияния различных концентраций наноразмерного модификатора на структуру и механические свойства технически чистого алюминия были синтезированы слитки без частиц и с содержанием наноразмерного оксида алюминия 0.1, 0.5, 1 и 1.5 масс. %. В качестве матрицы был использован технически чистый алюминий марки А0, в качестве модификатора – наночастицы оксида алюминия, полученные методом электрического взрыва проводника со средним размером 100 нм. Для улучшения смачиваемости наночастицы вводились в расплав в составе лигатуры: порошок наночастиц  $Al_2O_3$  деагломерировался в микропорошке алюминия (20 мкм) и подвергался оригинальному ударно-волновому компактированию [3]. Матричный алюминий был расплавлен в графитовом тигле до 730 °С, в зону воздействия механического смесителя вводилась лигатура для равномерного распределения наночастиц по всему объёму расплава, с последующим ультразвуковым воздействием в течение 2 минут для интенсифицирования смачиваемости наночастиц и дегазации расплава [4]. Слитки были получены методом литья в стальной кокиль, разливка производилась при температуре 630 °С с вибрационным воздействием на кокиль до полной кристаллизации расплава для дополнительной дегазации [5].

Микроструктура образцов из полученных слитков исследовалась с помощью метода дифракции отраженных электронов (EBSD). Ультразвуковая обработка способствует изменению дендритного строения достаточно равноосными зёрнами. Образованные наночастицами новые центры кристаллизации способствуют измельчению среднего размера зерна, например, сплавы А0 + 0.5 и 1 масс. %  $Al_2O_3$  имеют средние размеры 112 и 69 мкм соответственно, а сплав А0 без частиц – 200 мкм.

В табл. 1 указаны сводные данные по механическим свойствам исследуемых сплавов при квазистатических нагружениях. Отмечается тенденция увеличения твёрдости по Бринеллю при увеличении концентрации наночастиц до 1.5 масс. % с 19 до 21 НВ, а также увеличение микротвёрдости по Виккерсу с 25 до 27 НВ при увеличении концентрации  $Al_2O_3$  до 1 масс. %. Одноосное растяжение плоских образцов было проведено на испытательной машине Instron 40/50-20. Обобщая полученные результаты, можно от-

метить упрочнение сплавов с содержанием частиц до 1 масс. %: условный предел текучести и временное сопротивление у сплава А0 + 1 масс. %  $Al_2O_3$  22 и 72 МПа соответственно, тогда как у сплава А0 без частиц 11 и 47 МПа соответственно; также отмечается снижение пластичности с 45 % (А0 без частиц) до 36 % (А0 + 1 масс. %  $Al_2O_3$ ).

*Таблица 1. Сводные данные по механическим свойствам исследуемых сплавов*

Концентрация $Al_2O_3$ , %	НВ	НV	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\epsilon_{max}$ , %	SRS
0	19±0.21	25±1.67	11±1.67	47±1.27	44±2.9	0.223
0.1	20±0.86	26±1.47	28±3.91	68±1.45	42±4.95	0.119
0.5	20±0.62	26±1.66	19±4.94	63±5.25	42±6.55	0.065
1	21±0.72	27±1.52	22±4.54	72±8.20	36±3.92	0.150
1.5	21±0.54	25±1.82	17±2.25	62±7.32	34±4.83	–

Эксперименты, направленные на изучение скоростной чувствительности материалов, проводились при скоростях деформации 0.001, 0.01, 0.1 с<sup>-1</sup>. Наблюдается заметное деформационное упрочнение с повышением скорости деформации при растяжении от 0.001 до 0.1 с<sup>-1</sup>, например, у сплава, содержащего 1 масс. %  $Al_2O_3$ , напряжение текучести и предел прочности значительно возрастают (с 18 до 36 МПа и с 66 до 84 МПа соответственно) с увеличением скорости деформации при неизбежном изменении пластичности (с 42 до 40 %). Следует отметить более выраженное увеличение механических свойств при повышении скорости деформирования у сплава без включений.

Для полученных сплавов была определена чувствительность к скорости деформации посредством параметра SRS. Значением SRS является наклон аппроксимирующей зависимости экспериментальных данных пластического течения, соответствующих различным скоростям деформации в двойных логарифмических координатах. Значения параметра связывают со средним размером зерна: у ультрамелкозернистого алюминия SRS в районе 0.013. У исходного сплава А0 без частиц параметр равен 0.223. У упрочненных наночастицами сплавов он ниже и колеблется в диапазоне 0.150–0.065.

Обобщая полученные результаты, обработка внешними полями и применение уникальной лигатуры позволяют корректно ввести наночастицы оксида алюминия в расплав А0, решая проблемы агломерации и флотации. Наночастицы выступают в качестве инокуляторов, изменения агрегатного состояния расплава на своей поверхности, приводя к измельчению среднего размера зерна. При введении модификаторов прослеживается тенденция увеличения твёрдости и микротвёрдости. По исследованию механических свойств технически чистого алюминия А0 модифицированного наночастицами  $Al_2O_3$ , следует вывод, что введение наночастиц до 1 масс. % способствует увеличению механических свойств с одновременным уменьшением

пластичности. Вклад в скоростную чувствительность и, в общем, во все деформационное поведение вносят частицы, присутствующие в теле зерна и взаимодействующие с дислокациями.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-20081.

### Литература

1. *Sreekumar V.M., Nadendla H.B., Eskin D.G., Fan Z.* Structure-property analysis of in-situ Al-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> metal matrix composites synthesized using ultrasonic cavitation // *Mater. Sci. Eng. A.* 2015. Vol. 628. Pp. 30–40.
2. *Orowan E.* Conditional for dislocation passage of precipitations // *Proc. Symp. On Intern. Stresses in Metals and Alloys.* London: Inst. Of Metals. 1948. Pp. 451–454.
3. *Ворожцов С.А., Кудряшова О.Б., Лернер М.И., Ворожцов А.Б., Хрусталёв А.П., Первигов А.В.* Консолидация биметаллических наноразмерных частиц и формирование нанокompозитов в зависимости от условий ударно-волнового компактирования // *Известия высших учебных заведений. Физика.* 2017. №7. С. 147–152.
4. *Atamanenko T.V., Eskin D.G., Zhang L., Katgerman L.* Criteria of Grain Refinement Induced by Ultrasonic Melt Treatment of Aluminum Alloys Containing Zr and Ti // *Metallurgical and Materials Transactions.* 2010 № 41. Pp. 2056–2066.
5. *Хмелева М.Г., Промахов В.В., Жуков И.А., Платов В.В., Ворожцов А.Б.* Влияние вибрации и модифицирования на процессы кристаллизации и механические свойства сплава марки АК7: сб. тезисов XIV Международной конференции «Высокоэнергетические и специальные материалы: демилитаризация, антитерроризм и гражданское применение» Томск, 2018 С. 265–266.

### References

1. *Sreekumar V.M., Nadendla H.B., Eskin D.G., Fan Z.* Structure-property analysis of in-situ Al-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> metal matrix composites synthesized using ultrasonic cavitation // *Mater. Sci. Eng. A.* 2015. Vol. 628. Pp. 30–40.
2. *Orowan E.* Conditional for dislocation passage of precipitations // *Proc. Symp. On Intern. Stresses in Metals and Alloys.* London: Inst. Of Metals. 1948. Pp. 451–454.
3. *Vorozhtsov S.A., Kudryashova O.B., Lerner M.I., Vorozhtsov A.B., Khrustalyov A.P., Pervikov A.V.* Konsolidatsiya bimetallicheskikh nanorazmernykh chastits i formirovaniye nanokompozitov v zavisimosti ot usloviy udarno-volnovogo kompaktirovaniya // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika.* 2017. №7. Pp. 147–152. (Rus.)
4. *Atamanenko T.V., Eskin D.G., Zhang L., Katgerman L.* Criteria of Grain Refinement Induced by Ultrasonic Melt Treatment of Aluminum Alloys Containing Zr and Ti // *Metallurgical and Materials Transactions.* 2010 № 41. Pp. 2056–2066.
5. *Khmeleva M.G., Promakhov B.B., Zhukov I.A., Platov B.B., Vorozhtsov A.B.* Vliyaniye vibratsii i modifitsirovaniya na protsessy kristallizatsii i mekhanicheskiye svoystva splava marki AK7 // *Sbornik tezisov XIV Mezhdunarodnoy konferentsii «Vysokoenergeticheskiye i spetsial'nyye materialy: demilitarizatsiya, antiterrorizm i grazhdanskoye primeneniye»* Tomsk. 2018. Pp. 265–266. (Rus.)

# ФОРМИРОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНОГО РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ИЗЛОМА ПРИ УСТАЛОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ ЗТА КОМПОЗИТОВ

**М.В. Коробенков, Т.А. Киселева**

Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия  
Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
Mkorobenzov@kantiana.ru

**Ключевые слова:** керамические композиты, усталостные испытания, фрактальный рельеф.

**Аннотация.** В работе представлено исследование поверхности усталостного разрушения керамического композита  $Al_2O_3 - ZrO_2$  при трехточечном изгибе с позиции фрактальной геометрии. Размеры фрактальной поверхности  $D_f$  определялись методом триангуляции по изображениям, полученным со сканирующего электронного микроскопа. Было показано, что рельеф поверхности усталостного разрушения может характеризоваться фрактальным рельефом в локальном приближении. Фрактальная размерность исследуемой поверхности изменяется в относительно узких пределах  $D_f = 2.653-2.742$ , для керамических образцов, спеченных при  $1650\text{ }^\circ\text{C}$ , и сильно зависит от количества циклов. Образцы керамики, спеченные при  $1400\text{ }^\circ\text{C}$ , показали низкое сопротивление усталостным нагрузкам, при этом измеренная фрактальная размерность варьируется в пределах  $D_f = 2.710-2.781$  и не зависит от числа циклов нагружения.

## THE FORMATION OF A FRACTAL RELIEF OF THE FRACTURE SURFACE UNDER FATIGUE LOADING OF ZTA COMPOSITES

**M. Korobenzov, T. Kiseleva**

Immanuel Kant Baltic Federal University, Russian Federation  
National Research Tomsk State University, Russian Federation  
Mkorobenzov@kantiana.ru

**Keywords:** ceramic composites, fatigue tests, fractal relief.

**Abstract.** The paper presents a study of the fatigue fracture surface of the ceramic composite  $Al_2O_3 - ZrO_2$  during three-point bending from the position of fractal geometry. The dimensions of the fractal surface  $D_f$  were determined by the method of triangulation from images obtained from a scanning electron microscope. It was shown that the surface relief of the fatigue fracture can be characterized by a fractal relief in the local approximation. The fractal dimension of the studied surface varies within relatively narrow limits  $D_f = 2.653-2.742$ , for ceramic samples sintered at  $1650\text{ }^\circ\text{C}$ , and strongly depends on the number of cycles. Ceramic samples sintered at  $1400\text{ }^\circ\text{C}$  showed low resistance to fatigue loads, while the measured fractal dimension varies in the range  $D_f = 2.710-2.781$ , and does not depend on the number of loading cycles.

Известно, что наиболее значимым фактором, влияющим на механические свойства керамик, является пористость. С другой стороны, эффективность таких материалов в основном определяется параметрами структуры пор [1]. Среди разнообразных конструкционных керамических материалов исследования частично стабилизированных керамик на основе диоксида циркония представляют первостепенный интерес вследствие всестороннего влияния пористости, структуры зерна и фазового состава на их механическое поведение. При этом усталостное поведение пористых керамических материалов исследовано в недостаточной степени, и представляет значительный интерес. Хотя исследования в этой области ведутся давно, большинство из них были в основном сосредоточены на демонстрации и объяснении механической стороны циклической усталости без описания и интерпретации влияния структурных уровней зарождения повреждений при усталостном нагружении керамических композитов [2]. Одним из методов определения структурного уровня зарождения усталостного разрушения может быть фрактальная геометрия поверхности разрушения. Предполагая, что исследуемая поверхность разрушения является фрактальным объектом, мы можем использовать общие представления о фрактальных объектах для ее анализа.

Целью данной работы являлось изучение фрактальной геометрии усталостной поверхности разрушения композитов ZTA (20% ( $ZrO_2 - (3\% MgO)$ ) – 80% ( $\alpha - Al_2O_3$ )). Для выполнения поставленных целей были проведены усталостные испытания призматических образцов, полученных предварительным формованием заготовок давлением с последующим спеканием при температурах 1400, 1500 и 1650 °C с выдержкой при пиковой температуре в течение одного часа. Пористость образцов измеряли гидростатическим методом в дистиллированной воде. Физические и механические свойства образцов были исследованы методом трехточечного изгиба с использованием тест-системы Instron ElectroPuls E1000. Промежуток между двумя держателями опор составлял 30 мм для образцов с пористостью 6.5 и 11 % и 36 мм для образцов с пористостью 21 %.

Значение предела прочности при растяжении  $\sigma_{ben}$  и модуля изгиба  $E_{ben}$  керамических композитов определяли при скорости нагружения 0.3 мм/мин с использованием пяти образцов из той же серии согласно [4]:

$$\sigma_{ben} = \frac{3Pl}{2bh^2}, \quad E_{ben} = \frac{Pl^3}{4fbh^3}. \quad (1)$$

Условия нагружения были определены в виде униполярных волн нагружения от 8 Н с двойной амплитудой D цикла, соответствующей трем диапазонам напряжений: 0.9, 0.8 и 0.7 от средних максимальных статической сил изгиба и частоте нагружения  $\nu = 4$  Гц.

Фрактальный анализ усталостного рельефа поверхности керамических композитов проводился с помощью программы расчета фрактальных размерностей  $D_f$  области поверхности, основанной на измерении их площади методом триангуляции [3], по изображениям с электронного сканирующего микроскопа VEGA3 TESCAN на разных масштабных уровнях. Метод триангуляции основан на измерении фактических значений площади поверхности  $S_{fact}$  в зависимости от масштаба измерения  $l_i$  или эффективных параметров  $\delta_i$ .

Согласно [5]:

$$S_{fact,i} = S_0 \delta_i^{2-D_f} \quad (2)$$

Значение  $D_f$  определялось по наклону линейной области зависимости  $\ln(S_{fact,i})$  от  $\ln(\delta_i)$ .

Результаты проведенных исследований показали, что пределы усталости увеличивались для образцов с уменьшением содержания пор, такая же зависимость наблюдалась в условиях статических испытаний. Анализ изображений, полученных со сканирующего электронного микроскопа, показал распространение трещин только по границам зерен.

Фрактальный анализ изломов образцов показал, что формирующаяся поверхность разрушения при усталостном нагружении не является фрактальной, то есть стремится к плоской, для больших  $\delta$  (превышающих размер частиц). Этот случай соответствует размеру поверхности, близкому к 2, то есть топологическому размеру.

Небольшое изменение  $D_f$  для различных областей в правильных приближенных областях отражает статистически самоаффинное поведение поверхности разрушения. Значение, соответствующее изгибу в зависимостях  $\ln(S_{fact}/S_0)$  от  $\ln(1/\delta)$ , можно интерпретировать как некоторую верхнюю границу для определения фрактальной размерности. Область меньшего  $\delta$ , где поверхность ведет себя как фрактальный объект, соответствует так называемому локальному подходу (пределу) в определении фрактальной размерности; тогда как для области большего  $\delta$  мы можем формально говорить о глобальном приближении (пределе) в определении размерности поверхности.

Таким образом, в результате проведенных исследований можно сделать вывод о том, что поверхности разрушения формирует самоаффинный рельеф поверхности, характеризуемый локальным ограниченным набором значений фрактальной размерности. Диапазон этих значений для исследуемого диапазона значений измерительной шкалы мал, и в принципе для всего диапазона значений  $\delta$ , где можно использовать локальное приближение, можно ввести статистическое значение фрактальной размерности поверхности.

Исследование было поддержано из средств субсидии, выделенной на реализацию Программы повышения конкурентоспособности БФУ им И. Канта

### Литература/References

1. *Korobenzov M.V. and Kulkov S. N* Structure and properties of ZTA composites for joint replacement // AIP Conference Proceeding. 2017. Vol. 1882. 020035.
2. *Souza R.C. Dos Santos C., Barboza M.J.R., De Araujo Bicalho L., Baptista C.A. R.P. and Elias C.N.* Fatigue behavior of 3%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-doped ZrO<sub>2</sub> ceramics // Journal of Material Research and Technology. 2014. Vol. 39. Is. 1. Pp. 48–54.
3. *Kozulin A.A., Narikovich A.S., Kulkov S.N., Leitsin V.N. and Kulkov S.S.* Damage formation, fatigue behavior and strength properties of ZrO<sub>2</sub>-based ceramics // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1760. 020036.
4. *Ankudinov A.V., Evtikheev V.P., Ladutenko K.S. et al.* Kelvin probe force microscopy of hole leakage from the active region of a working injection-type semiconductor laser diode // Semiconductors. 2006. Vol. 40. Pp. 982–989.
5. *Feder J.* Fractals // New York: Plenum Press. 1988.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОГО СОСТОЯНИЯ АМОРТИЗАЦИОННОГО ЭЛЕМЕНТА С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНО-УПРУГОГО МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛА

А.Г. Кушнарёв<sup>1</sup>, И.В. Щербаков<sup>2</sup>, А.Е. Искаков<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия  
kushnarev97@gmail.com

**Ключевые слова:** гиперупругость, моделирование, большие деформации, резиновый амортизатор.

**Аннотация.** В работе был проведен сравнительный анализ результатов экспериментального исследования механического поведения образца резины с результатами численного моделирования при испытании по схеме одноосного и двухосного сжатия. Определяющее уравнение, описывающее деформационное поведение материала, представлено пятипараметрической моделью Муни-Ривлина. Константы определяющего уравнения получены при обработке экспериментальных данных. Результаты исследования показали, что выбранное определяющее уравнение и его константы позволяют достоверно описывать механическое поведение рассматриваемого материала. Деформационное поведение резинометаллического демпфера амортизатора при эксплуатационных нагрузках исследовано теоретически с использованием компьютерного моделирования на основе методов конечно-элементного анализа. Созданная математическая модель может быть использована для определения напряженно-деформированного состояния ответственных элементов конструкции из исследуемого класса материалов.

# INVESTIGATION OF STRESS-STRAIN CONDITION OF SHOCK ABSORBER ELEMENT TAKING INTO ACCOUNT NONLINEAR ELASTIC MECHANICAL BEHAVIOR OF MATERIAL

A. Kushnaryov<sup>1</sup>, I. Scherbakov<sup>2</sup>, A. Iskakov<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch  
of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation  
kushnarev97@gmail.com

**Keywords:** hyperelasticity, numerical simulation, large strain, rubber shock-absorber.

**Abstract.** A comparative analysis of the results of an experimental study of the mechanical behavior of a rubber specimen with the results of numerical simulation during testing according to the uniaxial and biaxial compression scheme was performed. The basic equation is a five-parameter Muni-Rivlin model with constants determined from experimental data. The results of the study showed that these constants reliably describe the mechanical behavior of the material in question. During the analysis, the rubber part of the shock absorber used in the design as a vibration isolator was manufactured and tested using the finite element method. The created mathematical model can be used to calculate the strength of critical structural elements from the studied class of materials.

Упругопрочностные свойства материалов при сжатии играют огромную роль при проектировании резиновых изделий ответственных конструктивных механизмов, виброизоляторов и амортизаторов. Большие напряжения, возникающие в местах их концентрации, способствуют тому, что резиновые детали быстро выходят из строя и приводят к разрушению всю связанную с ними конструкцию раньше заданного срока эксплуатации. В этом случае использование численного моделирования на этапах проектирования деталей способствует продлению жизненного цикла механизмов и помогает избежать преждевременных выходов из строя всей конструкции путем определения напряженно-деформированного состояния изделий, изготовленных из гиперупругих материалов, особенностью которых является сохранение упругих свойств при больших деформациях.

Однако нелинейное упругое поведение многих полимерных материалов, включая резины, в условиях больших деформаций уменьшает точность инженерных прогнозов и осложняет выбор определяющих уравнений, поиск их констант [1]. Тем самым затрудняя отражение реального деформационного поведения.

Целью данного исследования было проведение натурных экспериментов в совокупности с численным моделированием по одноосному и многоосному сжатию образцов конструкционной резины с последующим созданием физико-математической модели, адекватно отражающей нелинейное механическое поведение конструкционной резины, применяемой для изготовления упругих элементов виброизоляторов.

В работе проведён ряд экспериментов по сжатию цилиндрических образцов, изготовленных из конструкционной резины. Эксперименты проводились по двум схемам нагружения – одноосное и двуосное сжатие [2]. В результате экспериментов на двуосное сжатие пяти подготовленных образцов были получены кривые напряжения–деформации рассматриваемого материала.

Регистрация значений силы и деформации была осуществлена после того, как образцы прошли три цикла загрузки-выгрузки с интервалом в 1 минуту между ними. При расчете напряжения, вызванного приложенной силой, площадь поперечного сечения образца принималась постоянной и равной исходной. Результаты экспериментов показали, что исследуемый материал может деформироваться упруго вплоть до 70 %, причем реализуемые деформации имеют ярко выраженную нелинейность. Дополнительно требовалось провести эксперименты по сжатию исследуемого элемента конструкции амортизатора.

На основе полученных экспериментальных данных проведено моделирование условий эксперимента по одноосному сжатию стандартных цилиндрических образцов с дальнейшим созданием физико-математической модели, описывающей нелинейное гиперупругое поведение материала в простом и сложнапряженном состоянии.

Задача решалась методом конечных элементов. Были использованы уравнения стандартной механики сплошных сред, однако в качестве определяющего уравнения выбрана многопараметрическая модель Муни-Ривлина [3] описываемая модель используемого материала с параметрами (МПа):  $C_{10}=1.63$ ,  $C_{01}=-1.33$ ,  $C_{11}=-1.22$ ,  $C_{20} = 1.91$ ,  $C_{02}=0.27$ .

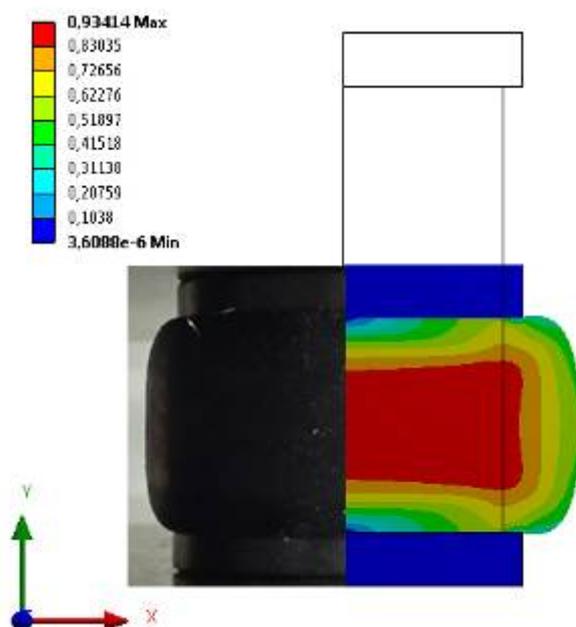


Рис. 1. Распределение продольной деформации по объему образца при двухосном сжатии:  
слева – опытный образец;  
справа – результаты численного моделирования

Результаты численного решения совпадают с экспериментальными значениями, интервалы достоверности соответствуют допустимой статистической погрешности, тем самым позволяя утверждать, что значения натурального эксперимента и численного моделирования имеют качественное и количественное соответствие (*рис. 1*).

Созданная физико-математическая модель может быть использована для прочностных расчетов ответственных элементов конструкции из исследуемого класса материалов.

### Литература

1. *Скрипняк В.А., Козулин А.А.* Влияние технологических микродефектов структуры на долговечность полимерных материалов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2007. Т. 50. № 7. С. 3–6.
2. ГОСТ ISO 7743-2013. Резина и термопласты. Определение упругопрочностных свойств при сжатии. М.: Стандартинформ, 2016.
3. *Kozulin A.A., Skripnyak V.A.* Strength calculation of polymer pipeline elements // The 8th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology KORUS. 2005. Pp. 29–31.

### References

1. *Skripnyak V.A., Kozulin A.A.* The influence of technological microdefects of the structure on the durability of polymeric materials // News of Higher Education Institutions. Physics. 2007. Vol. 50. No. 7. Pp. 3–6.
2. *GOST ISO 7743-2013.* Rubber and thermoplastics. Determination of elastic strength properties in compression. M.: Standartinform, 2016.
3. *Kozulin A.A., Skripnyak V.A.* Strength calculation of polymer pipeline elements // The 8th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology KORUS, 2005. Pp. 29–31.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ BT1-0 И СПЛАВА Zr-1 MAS. % Nb В РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЯХ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ В ГИГАЦИКЛОВОМ РЕЖИМЕ

**А.М. Майрамбекова, А.Ю. Ерошенко**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
aikol@ispms.tsc.ru

**Ключевые слова:** титан, сплав циркония, ультрамелкозернистая структура, гигацикловая усталость, усталостное разрушение.

**Аннотация.** В данной работе были исследованы усталостные характеристики и изучены особенности морфологии поверхности разрушения при циклическом нагружении в гигацикловом режиме для образцов BT1-0 и сплава Zr-1 мас. % Nb в различных

структурных состояниях. Установлено, что формирование ультрамелкозернистой структуры в титане и сплаве циркония приводит к увеличению предела усталости титана в 1.6 раза, а сплава циркония в 1.7 раза в гигацикловой области по сравнению с мелкозернистым и крупнокристаллическим состоянием. Методом растровой электронной микроскопии исследована поверхность разрушения усталостных изломов. Выполнен анализ по РЭМ-изображениям исследуемых образцов в различных структурных состояниях после циклических испытаний. Дополнительно проведен фрактальный анализ с помощью профилометрии высокого разрешения New View 5010 поверхностного рельефа изломов образцов VT1-0 и Zr-1 мас. % Nb в различных структурных состояниях. Были определены характеристики коррелированного поведения многомасштабных дефектных структур, с которыми связано инициирование и распространение усталостных трещин.

## **STUDY OF THE FRACTURE SURFACE MORPHOLOGY OF VT1-0 AND ZR-1 WT. % Nb IN VARIOUS STRUCTURAL STATES UNDER CYCLIC LOADING IN GIGACYCLE REGIME**

**A. Mairambekova, A. Eroshenko**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
aikol@ispms.tsc.ru

**Keywords:** titanium, zirconium alloy, ultrafine-grained structure, gigacyclic fatigue, fatigue failure.

**Abstract.** In this paper fatigue characteristics were conducted research and the features of the morphology of the fracture surface under cyclic loading in the gigacycle regime were studied for samples of VT1-0 and Zr-1 wt. % Nb in various structural states. It has been established that the formation of the ultrafine-grained structure in VT1-0 and Zr-1 wt. % Nb alloy leads to an increase in the fatigue limit of titanium by 1.6 times and the zirconium alloy by 1.7 times in the gigacycle region when compared to the fine-grained and coarse-grained states. The surface of fatigue fracture was studied by scanning electron microscopy. The analysis of the samples in different structural states after cyclic tests was carried out using SEM images. Additional study a fractured specimens was analyzed high resolution profilometry New View 5010 for alloys VT1-0 and Zr-1 wt. % Nb in various structural states. The characteristics of correlated behavior of multiscale defect structures associated with crack initiation and propagation of cracks were determined.

В настоящее время прогнозирование долговечности конструкционных материалов и разработка методов ее повышения является важнейшей фундаментальной задачей для различных областей науки и техники. В последние годы появились исследования, связанные с построением кривой усталости в широком диапазоне циклов нагружения, включающая область гигацикловой усталости, то есть  $10^9$  и более циклов нагружения [1, 2]. Необходимость расширения базы испытаний связана с тем, что требуемая долговечность элементов конструкций различных областей техники превышает долговечность, принятую в стандартах ( $10^6$  циклов). Помимо этого с увеличением длительности эксплуатации растет число аварийных разруше-

ний. С другой стороны, одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений в материаловедении является разработка металлических материалов с ультрамелкозернистой и наноразмерной структурой, получаемой различными методами интенсивной пластической деформации и термомеханическими обработками. Во многом это связано с тем, что такая структура обеспечивает значительное повышение прочностных характеристик при одновременном росте функциональных свойств [3]. Значимой также является исследование инициирования и распространения усталостных трещин, которая представляет собой одну из ключевых проблем усталостного разрушения.

Целью настоящей работы является выявление особенностей разрушения титана VT1-0 и сплава Zr-1 мас. % Nb в различных структурных состояниях при циклическом нагружении в гигацикловом режиме.

В качестве объектов исследования были выбраны титан VT1-0 и сплав Zr-1 мас. % Nb (Zr-1Nb) в крупнокристаллическом (КК), мелкозернистом (МЗ) и ультрамелкозернистом (УМЗ) состояниях. В исследуемых сплавах УМЗ структура была сформирована комбинированным двухэтапным методом интенсивной пластической деформации, который включал многократное abc-прессование и многоходовую прокатку в ручьевых валках с последующим отжигом [4]. Микроструктуру и фазовый состав исследовали с помощью оптической, просвечивающей электронной и растровой микроскопии. Результаты были получены на приборе Carl Zeiss Axio Observer, JEOL JEM 2100 и LEO EVO 50 в ЦКП «НАНОТЕХ» ИФПМ СО РАН (ЦКП ТНЦ СО РАН).

Исследуемые образцы подвергались нагружению на ультразвуковой резонансной усталостной машине Shimadzu USF-2000 в режиме гигацикловой усталости при частоте циклических колебаний 20 кГц с коэффициентом асимметрии цикла  $R = -1$  [5].

Результаты усталостных испытаний в гигацикловом режиме титана VT1-0 и сплава Zr-1Nb показали, что микроструктура оказывает сильное влияние на усталостную долговечность и усталостную прочность. Установлено, что формирование УМЗ структуры в VT1-0 и Zr-1Nb приводит к увеличению предела усталости титана в 1.6 раза, а сплава циркония в 1.7 раза в гигацикловой области ( $10^9$  циклов) по сравнению с МЗ и КК состояниями.

Проведен анализ морфологии поверхности разрушения по полученным изображениям на растровом электронном микроскопе LEO EVO 50. Зарождение трещины происходило на поверхности образца и распространялось вглубь. На поверхности разрушения всех усталостных изломов наблюдаются три типичных зоны: зона зарождения, зона ускоренного роста трещины и зона долома. Дополнительно проведено исследование поверхностного рельефа изломов образцов VT1-0 и Zr-1Nb в различных

структурных состояниях методами фрактального анализа с помощью цифрового интерферометра-профилометра New View 5010.



Рис. 1. Внешний вид интерферометра-профилометра New-View 5010

Этот метод позволил установить количественные характеристики профиля поверхности разрушения (показатель Херста), по которым определялись масштабно-инвариантные закономерности инициирования и рост трещины. Установлены количественные характеристики профиля поверхности разрушения, соответствующие характерным областям: очагу локализации поврежденности и зоне роста очага до размеров трещин, соответствующих кинетике Париса.

Работа выполнена в рамках Программ фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2017–2020 гг., Программа III.23.2.

### Литература

1. Bathias C. There is no infinite fatigue life in metallic materials // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 1999. №. 22. Pp. 559–565.
2. Mughrabi H. Specific features and mechanisms of fatigue in the ultrahigh-cycle regime // *Int. J. Fatigue.* 2006. № 28. Pp. 1501–1508.
3. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications // Publ. Wiley and TMS, Hoboken, USA, 2014. pp. 456.
4. Sharkeev Yu.P., Eroshenko A.Yu., Danilov V.I. et al. Microstructure and Mechanical Properties of Nanostructured and Ultrafine-Grained Titanium and the Zirconium Formed by the Method of Severe Plastic Deformation // *Russian Physics Journal.* 2014. Vol. 56. Pp. 1156–1162.
5. Oborin V.A., Bannikov M.V., Naimark O.B., Palin-Luc T. Scaling invariance of fatigue crack growth in gigacycle loading regime // *Technical Physics Letter.* 2010. Vol. 36. №. 11. Pp. 1061–1063.
6. Майрамбекова А.М., Ерошенко А.Ю., Банников М.В. Исследование усталостного разрушения титана ВТ1-0 и сплава Zr-1 мас.% Nb в режиме гигацикловой усталости /

VIII Международной молодежной научной конференции «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики», г. Томск: сб. трудов конференции Томского государственного университета; под ред. М.Ю. Орлова. Т. 303. Сер. физико-математическая. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2019. С. 97–102. Doi. 10.17223.978-5-7511-2582-0/10.

### References

1. *Bathias C.* There is no infinite fatigue life in metallic materials // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 1999. №. 22. Pp. 559–565.
2. *Mughrabi H.* Specific features and mechanisms of fatigue in the ultrahigh-cycle regime // *Int. J. Fatigue.* 2006. № 28. Pp. 1501–1508.
3. *Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G.* Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications // Publ. Wiley and TMS, Hoboken, USA, 2014. Pp. 456.
4. *Sharkeev Yu. P., Eroshenko A. Yu., Danilov V.I. et. al.* Microstructure and Mechanical Properties of Nanostructured and Ultrafine-Grained Titanium and the Zirconium Formed by the Method of Severe Plastic Deformation // *Russian Physics Journal.* 2014. Vol. 56. Pp. 1156–1162.
5. *Oborin V.A., Bannikov M.V., Naimark O.B., Palin-Luc T.* Scaling invariance of fatigue crack growth in gigacycle loading regime // *Technical Physics Letter.* 2010. Vol. 36. №. 11. Pp. 1061–1063.
6. *Mairambekova A.M., Eroshenko A.Yu., Bannikov M.V.* Study of the fatigue failure of titanium VT1-0 and Zr-1 wt. % Nb alloy in the gigacycle fatigue mode / VIII-th All-Russian Youth Scientific Conference "Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics" / the conference proceedings of TSU / Ed. M.Yu. Orlov. Tomsk. T. 303. Ser. Physics and mathematics. Izdatelstvo "Krasnoe znamya" 2019. Pp. 97–102. Doi. 10.17223.978-5-7511-2582-0/10.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В КЕРАМИЧЕСКОМ КОМПОЗИТЕ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ КОСТНОЙ ТКАНИ ПРИ НАКОПЛЕНИИ ПОВРЕЖДЕНИЙ

**В.А. Микушина**

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия  
mikushina\_93@mail.ru

**Ключевые слова:** композит, распределение напряжений, численное моделирование.

**Аннотация.** В данной статье представлено численное исследование особенностей статистического распределения напряжений и неоднородностей напряженного состояния композиционного материала «керамика на основе диоксида циркония – кортикальная костная ткань». Моделирование механического поведения композита выполнено с использованием конечно-разностного метода. Процессы деформации и разрушения описываются моделью упруго-хрупкого материала с учетом накопления повреждений и деградации упругих модулей.

В работе определены эффективные механические свойства композита на основе данных о механических свойствах его составляющих и найдены предельные значения эффективных напряжений и деформаций, соответствующие критерию разрушения на макроуровне:  $\sigma = 155$  МПа и  $\varepsilon = 0.56$  %. Также была изучена эволюция статистических распределений напряжений в компонентах композита. Показано, что накопления повреждений оказывают значительное влияние на вид распределений напряжения на конечных этапах деформирования.

## STUDYING THE FEATURES OF STRESS DISTRIBUTION IN CERAMIC COMPOSITE WITH BONE TISSUE INCLUSIONS AT DAMAGE ACCUMULATION

V. Mikushina

Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Russian Federation  
mikushina\_93@mail.ru

**Keywords:** ceramic composite, stress distribution, numerical simulation.

**Abstract.** The features of stress statistical distribution and stress state heterogeneities of the composite “zirconia-based ceramics–cortical bone tissue” were studied by the numerical method in this paper. The model structure of the composite was considered in the two-dimensional statement in the uniaxial compression. Modeling the mechanical behavior of the composite was performed using the finite-difference method. The constitutive model of the elastic-brittle material with damage accumulation and degradation of elastic moduli is used for simulating deformation and fracture processes. The fracture process was described by utilizing two local fracture criteria based on the limit values of tensile pressure and damage.

The effective mechanical properties of the composite were determined on the basis of the data on the mechanical properties of its constituents. The macroscopic fracture of the composite is reached at determined values of effective stress and strain:  $\sigma = 155$  МПа and  $\varepsilon = 0.56\%$ . The statistical stress distribution in the components of the composite was analyzed. It was revealed that damage accumulation significantly affects the shape of stress distribution at the final stages of deformation. Also, it was shown that the presence of heterogeneities in the composite structure affects the local fracture of the composite material. The microdamages nucleate in the matrix of the composite and then propagate in both ceramic matrix and bone tissue inclusions along the loading axis.

В настоящее время одной из актуальных медицинских проблем является лечение дефектов костных тканей. Для восстановления крупных костных дефектов используются медицинские изделия или тканеинженерные конструкции, в том числе на основе керамики.

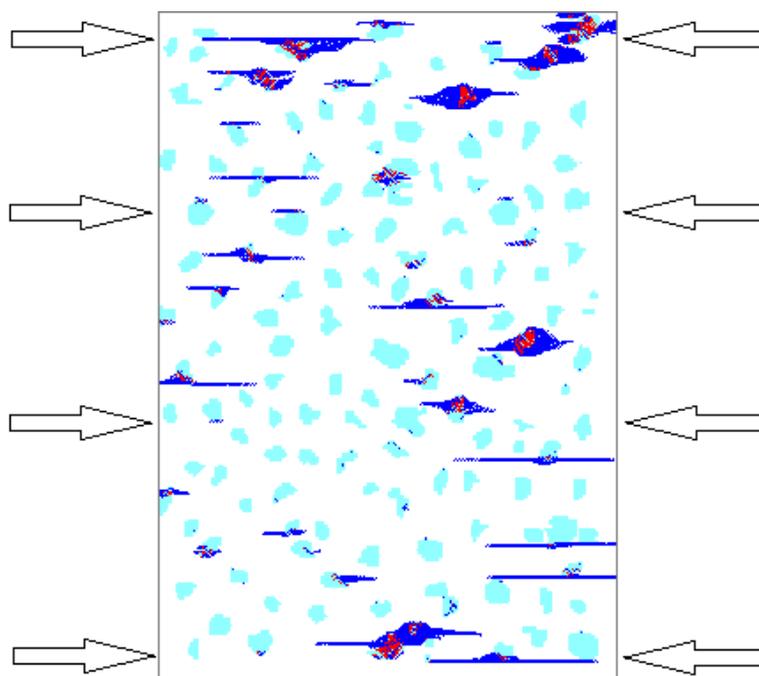
Существуют различные виды керамик для медицинских применений. Одним из наиболее популярных и эффективных материалов для создания имплантатов, подвергающихся активному нагружению, является керамика на основе диоксида циркония [1]. Для использования керамики в медицине, необходимо чтобы в этих материалах присутствовала пористость. Во-первых, пористость позволяет уменьшить высокое значение модуля

упругости керамики. Во-вторых, наличие пористости в имплантате позволяет живой костной ткани заполнять поры. В результате образуется композит с керамической матрицей и включениями костной ткани.

Экспериментальные исследования механических свойств таких композитов представляет собой сложный, дорогой и длительный процесс. В отличие от экспериментальных исследований, численное моделирование требует гораздо меньше ресурсов. Поэтому разработка численных методов и подходов для изучения механического поведения этого композита является актуальной проблемой [23].

Целью работы является численное исследование особенностей статистического распределения напряжений и неоднородностей напряженного состояния композита «керамика на основе диоксида циркония – кортикальная костная ткань». Для этого была построена модельная структура композита в двумерной постановке, и исследовано ее поведение в условиях одноосного сжатия (рис. 1). Структура композита задавалась с явным распределением пор в керамике. Предполагалось, что поры заполнены костной тканью и составляли 13 %. Для матрицы были заданы свойства, соответствующие пористой керамике на основе диоксида циркония, для наполнителя – физико-механические характеристики кортикальной костной ткани.

Рис. 1. Картина разрушения модельной структуры композита в условиях одноосного сжатия. Синий цвет соответствует разрушению при выполнении критерия разрушения по поврежденности, красный – по отрицательному давлению



Численное изучение механического поведения композита проводилось с помощью модели изотропной упруго-хрупкой повреждаемой среды и на основе конечно-разностного метода. Для описания процесса разрушения мы использовали два критерия разрушения: критерий на основе локально-

го значения поврежденности и критерий по предельному значению растягивающего давления.

В результате проведенного численного исследования были построены макроскопическая диаграмма деформирования, статистические распределения напряжений в каждом компоненте композита при различных значениях деформаций, а также картины разрушения. Анализ осредненной диаграммы позволил найти предельные значения эффективного напряжения и деформации, удовлетворяющие критерию макроскопического разрушения:  $\sigma = 155$  МПа и  $\varepsilon = 0.56$  %. Показано, что с увеличением повреждений изменяется форма распределений напряжений, что выражается в уменьшении пикового значения распределения напряжений и увеличении дисперсии распределения.

Также было проанализировано влияние неоднородностей структуры композита на локальное разрушение композиционного материала. Было показано, что наличие сильных концентраторов напряжений в структуре композита определяет место зарождения трещин и влияет на их распространение в моделируемой структуре. Обнаружено, что как керамическая матрица, так и включения костной ткани разрушаются, причем костная ткань преимущественно разрушается при критерии разрушения по отрицательному давлению (*рис. 1*).

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект Ш.23.2.12.

### Литература

1. Кирилова И.А., Садовой М.А., Подорожная В.Т., Буякова С.П., Кульков С.Н. Керамические и костно-керамические имплантаты: перспективные направления // Хирургия позвоночника. 2013. № 4. С. 52–62.
2. Eremina G.M., Smolin A.Yu. Multilevel numerical model of hip joint accounting for friction in the hip resurfacing endoprosthesis // Facta Univ. Ser. Mech. Eng. 2019. Vol. 17. Pp. 29–38.
3. Schmauder S., Schäfer I. Multiscale Materials Modeling. Approaches to Full Multiscaling. Berlin: De Gruyter, 2016. 346 p.

### References

1. Kirilova I.A., Sadovoy M.A., Podorozhnaya V.T., Buyakova S.P., Kulkov S.N. Ceramic and Osteoceramic Implants: Upcoming Trends Hir. Pozvonoc. 2013. Vol. 4. Pp. 52–62. (Rus.)
2. Eremina G. M., Smolin A. Yu. Multilevel numerical model of hip joint accounting for friction in the hip resurfacing endoprosthesis. Facta Univ. Ser. Mech. Eng. 2019. Vol. 17. Pp. 29–38.
3. Schmauder S., Schäfer I. Multiscale Materials Modeling. Approaches to Full Multiscaling. Berlin: De Gruyter, 2016. 346 p.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ

**И.А. Модин**

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия  
mianet@mail.ru

**Ключевые слова:** пористая среда, эксперимент, динамическая деформация, статическая деформация, нелинейность, необратимость.

**Аннотация.** В условиях отрицательных температур грунты меняют свои свойства. Свойства грунтов существенно отличаются при различных режимах нагружения. При росте отрицательных температур они становятся значительно жестче, за счет превращения содержащейся в них воды в лед и образование новых более прочных связей между частицами. В особенности это касается водонасыщенных грунтов. С другой стороны, вследствие естественной пористости грунты и в мерзлом состоянии сохраняют отличие при их деформировании в статических и динамических режимах нагружения. Выявление свойств грунтовых сред в условиях отрицательных температур имеет большое значение для оценки их сжимаемости, разрушения, передачи нагрузок на элементы конструкций. Особо важное значение эти исследования имеют для конструкций взаимодействующих с грунтом в арктических условиях.

## EXPERIMENTAL STUDIES OF THE DEFORMATION AND STRENGTH PROPERTIES OF FROZEN SOILS UNDER QUASISTATIC AND DYNAMIC LOADING

**I. Modin**

Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Russian Federation  
mianet@mail.ru

**Keywords:** porous medium, experiment, dynamic deformation, static deformation, non-linearity, irreversibility.

**Abstract.** At low temperatures, soils change their properties. The properties of soils differ significantly under different loading conditions. With an increase in negative temperatures, they become much tougher due to the transformation of the water contained in them into ice. New stronger bonds between particles are formed. This is especially true for water-saturated soils. Due to the natural porosity, soils in the frozen state retain a difference when they are deformed under static and dynamic loading conditions. The identification of the properties of soil media at low temperatures is of great importance for evaluating their compressibility, fracture, and transfer of loads on structural elements. Of particular importance these studies are for structures interacting with soil in arctic conditions.

Исследование деформационных свойств пористых и грунтовых сред является важной и актуальной задачей [1–4]. Сжатие грунта проводилось на примере песка с диапазоном фракции от  $0.1 \times 10^{-3}$  до  $10^{-3}$  м (размер песчинок). Квазистатическое сжатие грунта проводилось на сервогидравлической машине Zwick/Roell Z100, с программным обеспечением TestExpertII, которая дополнительно оснащена термическим шкафом с разрешенной температурой от  $-150$  до  $600$  °С. Измерение продольных деформаций при сжатии производилось лазерным экстензометром LaserXtens с точностью измерения до  $10^{-6}$  м. Для проведения эксперимента была изготовлена следующая оснастка: полый цилиндр с наружным диаметром  $30 \times 10^{-3}$  м, внутренним диаметром  $20 \times 10^{-3}$  м и высотой  $50 \times 10^{-3}$  м, и пуансон диаметром  $19.9 \times 10^{-3}$  м и высотой  $50 \times 10^{-3}$  м. В полый цилиндр засыпался грунт и сдавливался в гидравлической машине. Начальная толщина слоя составляла  $30 \times 10^{-3}$  м, сжатие проводилось до силы 10 000 кг. Для испытаний были выбраны три вида грунта в зависимости от содержания воды: сухой песок с плотностью  $1750$  кг/м<sup>3</sup>, песок, насыщенный на 10-процентной водой с плотностью  $1920$  кг/м<sup>3</sup>, песок, насыщенный на 18-процентной водой с плотностью  $2060$  кг/м<sup>3</sup>. Масса сухого песка в оснастке составила 0.064 кг. Изготовленные образцы диаметром  $20 \times 10^{-3}$  м и высотой  $40 \times 10^{-3}$  м помещались на 24 ч в морозильную камеру с температурой  $-18$  °С. Испытания на сжатие проводились в обойме (полем цилиндре), с измерением поперечной деформации обоймы (цилиндра) с помощью видеоэкстензометра.

По результатам экспериментальных исследований были получены продольная и поперечная деформации. Для одного из экспериментов на сухом замороженном песке в статическом режиме нагружения проводилось сжатие с промежуточными разгрузками в 30, 70 и 100 кН. Разгрузочный модуль в проведенных испытаниях изменялся от 10 до 30 ГПа. Диаграммы деформирования носят нелинейный и необратимый характер. Результаты квазистатического и динамического сжатия замороженных грунтов различной водонасыщенности заметно отличаются. Уровень напряжений при динамическом сжатии значительно выше, чем при статическом (при одинаковых деформациях). Диаграммы замороженных водонасыщенных грунтов, как в статическом, так и в динамическом режимах нагружения сильно отличаются от диаграмм при нормальных температурах.

### Литература

1. Ляхов Г.М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах. М.: Недра. 1974. 191 с.
2. Ляхов Г.М. Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах. М.: Наука. 1982. 288 с.
3. Kochetkov A.V., Leontev N.V., Modin I.A., Savikhin A.O. Study of the stress-strain and strength properties of the metal woven grids // Journal of Mathematics and Mechanics, Tomsk State University. 2018, 52. Pp. 53.

4. *Orlova Yu.N., Orlov M.Yu.* The study of the process of explosive loading of ice // Tomsk State University // Journal of Mathematics and Mechanics, 2015, 38. pp. 81–89.

### References

1. *Lyakhov G.M.* Fundamentals of the dynamics of blast waves in soils and rocks. M.: Nedra. 1974. 191 p.

2. *Lyakhov G.M.* Waves in soils and porous multicomponent media. M: Science. 1982. 288 p.

3. *Kochetkov A.V., Leontev N.V., Modin I.A., Savikhin A.O.* Study of the stress-strain and strength properties of the metal woven grids // Journal of Mathematics and Mechanics, Tomsk State University. 2018, 52. Pp. 53.

4. *Orlova Yu.N., Orlov M.Yu.* The study of the process of explosive loading of ice // Tomsk State University // Journal of Mathematics and Mechanics, 2015, 38. Pp. 81–89.

## ВЫБОР СООТНОШЕНИЯ РЕАГЕНТОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА ПУТЕМ ОКИСЛЕНИЯ НАНОПОРОШКА АЛЮМИНИЯ

**О.Н. Морозова, А.А. Павленко, А.А. Антонникова, С.С. Титов**

Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Россия  
morozova\_olga15@mail.ru

**Ключевые слова:** водородная энергетика, алюминий, нанопорошок, топливный элемент, реакция окисления.

**Аннотация.** В работе представлены результаты экспериментальных исследований по окислению алюминиевого нанопорошка марки Alex водой при нагревании. Приведены зависимости давления и температуры от времени окисления алюминия в реакторе высокого давления. Показаны преимущества извлечения водорода из водородосодержащих веществ посредством окисления металлических порошков. Путем изменения соотношения реагентов определено оптимальное массовое соотношение нанопорошка алюминия и воды, при котором реакция окисления протекает с высвобождением водорода.

## CHOICE OF THE RATIO OF REAGENTS FOR THE PRODUCTION OF HYDROGEN BY OXIDATION OF ALUMINUM NANOPOWDER

**O. Morozova, A. Pavlenko, A. Antonnikova, S. Titov**

Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch  
of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation  
morozova\_olga15@mail.ru

**Keywords:** hydrogen energetics, aluminum, nanopowder, fuel cell, oxidizing reaction.

**Abstract.** The paper presents the results of experimental studies on the oxidation of aluminum nanopowders of the brand Alex with water when heated. The dependences of the pressure and temperature of the aluminum oxidation reaction in a high-pressure reactor are presented. The advantages of extracting hydrogen from hydrogen-containing substances by oxidizing metal powders are shown. The optimum mass ratio of aluminum nanopowder and water was determined by changing the ratio of reagents, at which the oxidation reaction proceeds with the release of hydrogen.

Последние десятилетия активно обсуждается тема использования водорода в качестве энергоносителя. Уже имеются разработки по применению водорода в виде добавок в топливо для обычных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) для улучшения характеристик двигателя, а также как основного компонента топлива в водородно-воздушных топливных элементах (ТЭ). Это связано с экологичностью водорода, так как единственным побочным продуктом его сгорания (окисления) является вода, к тому же при утечке большого количества водорода он не накапливается в атмосфере, а улетает за пределы стратосферы [1, 2]. В связи с этим разработка новых источников питания является актуальной задачей современности.

Водород, являясь самым экологичным энергоносителем (его энергоемкость в расчете на единицу массы составляет – 121 кДж/г) может быть использован в качестве топлива в ТЭ – устройствах, которые преобразуют химическую энергию, запасенную в водороде в электрическую. В работах [3, 4] уже рассматриваются прототипы портативных источников питания на основе водорода, которые в дальнейшем могли бы заменить традиционные батарейки и аккумуляторы. Основной трудностью при работе с водородом является его хранение и транспортировка, так как его молекулы обладают высокой проникающей способностью, а перемещать газообразный водород в баллонах под давлением небезопасно, тем более это совершенно не подходит для питания малогабаритных портативных источников энергии. Трудностей с хранением и транспортировкой можно избежать, если получать водород на месте потребления из доступного и безопасного сырья.

Таким образом, целью данной работы является выбор и определение оптимального соотношения компонентов для получения водорода. С использованием лабораторной установки, основой которой является реактор высокого давления для определения соотношения компонентов необходимо провести экспериментальные исследования по окислению алюминиевого нанопорошка (НПА) водой.

Как известно, многие металлы при взаимодействии с водой и водными растворами окисляются с образованием водорода [5]. НПА является одним из основных материалов для получения водорода из-за доступности, безопасности побочных продуктов реакции и эффективности. Процесс окисления алюминия происходит по реакции:



Согласно стехиометрическим расчетам при окислении водой 1 г алюминия выделяется 1.24 л водорода и гидроксид алюминия, который может быть в дальнейшем переработан. Таким образом, получая водород данным методом можно избежать проблем с его хранением и транспортировкой к месту использования, а также обеспечить своевременную и непрерывную подачу топлива в автономное устройство генерирования энергии на основе водородных ТЭ.

Для определения оптимального соотношения реагентов для получения водородного топлива были проведены экспериментальные исследования по окислению алюминиевого порошка водой. Поскольку нанодисперсные порошки отличаются от свойств крупных промышленных порошков более высокой реакционной способностью, в работе использовался НПА марки Alex с содержанием активного металла 80.37%.

В ходе работы были исследованы образцы водных суспензий с различным массовым соотношением реагентов, а именно: НПА:H<sub>2</sub>O = 1:100, 1:20 и 1:11. Непрерывно перемешиваемую суспензию в реакторе подогревали до 60 °С, как только давление в реакторе начинало расти, перемешивание продолжалось без нагревания. Зависимости давления и температуры в реакторе от времени показаны на *рис. 1*.

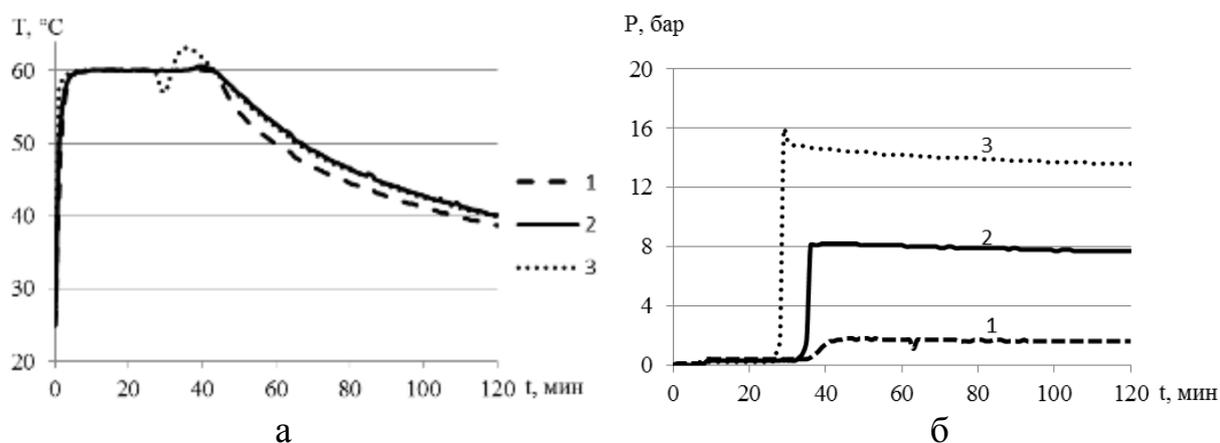


Рис. 1. Результаты экспериментальных исследований: зависимость температуры *a* и давления *б* в реакторе от времени (*кривая 1* – массовое соотношение НПА:H<sub>2</sub>O = 1:100; *кривая 2* – массовое соотношение НПА:H<sub>2</sub>O = 1:20; *кривая 3* – массовое соотношение НПА:H<sub>2</sub>O = 1:11)

По полученным зависимостям давления и температуры от времени (*рис. 1*) сделан вывод: увеличение концентрации НПА в воде приводит к ускорению протекания реакции окисления алюминия. В образце, с массовым соотношением НПА:H<sub>2</sub>O = 1:11 (*рис. 1, a, кривая 3*) на 25 мин зарегистрирован саморазогрев частиц, после отключения подогрева. При боль-

шем содержании воды процесс окисления алюминия протекает медленнее с незначительным увеличением температуры после отключения подогрева (рис. 1, а, кривая 2). При окислении 1 г НПА 100 г воды саморазогрева суспензии не наблюдается (рис. 1, а, кривая 1), давление в реакторе изменяется не значительно (рис. 1, б, кривая 1).

Таким образом, на данном этапе исследований можно сделать вывод, что для получения водорода при создании водородного источника энергии целесообразно придерживаться соотношения  $H_2O$  к НПА = 11:1.

Работа выполнена при использовании приборной базы Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

### Литература

1. *Haseli Y.* Maximum conversion efficiency of hydrogen fuel cells // International Journal of Hydrogen Energy. 2018. Vol. 43. №. 18. Pp. 9015–9021.
2. *Исмаатов Ж.Ф., Аширов В.Р., Садуллаев М.Х.* Водород как добавка в топливо // Вопросы науки и образования. 2019. №. 5 (50). С. 33–37.
3. *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.
4. *Ma H.* и др. Compact design of 10 kW proton exchange membrane fuel cell stack systems with microcontroller units // Energies. 2014. Vol. 7. №. 4. Pp. 2498–2514.
5. *Ильин А.П., Коршунов А.В., Толбанова Л.О.* Применение нанопорошка алюминия в водородной энергетике // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2007. Т. 311. №. 4. С. 10–14.

### References

1. *Haseli Y.* Maximum conversion efficiency of hydrogen fuel cells International Journal of Hydrogen Energy. 2018. Vol. 43. No. 18. Pp. 9015–9021.
2. *Ismatov Zh.F., Ashirov V.R., Sadullaev M.H.* Hydrogen as an additive in fuel Voprosy nauki i obrazovaniya. 2019. No. 5 (50). Pp. 33–37. (Rus.)
3. *Ladovskij A.V., Korovin N.V.* Portable current source based on alkaline fuel cells with indirect oxidation of sodium borohydride. Elektrohimičeskaya energetika. 2010. Vol. 10. No. 3. Pp. 153–156. (Rus.)
4. *Ma H. et al.* Compact design of 10 kW proton exchange membrane fuel cell stack systems with microcontroller units. Energies. 2014. Vol. 7. No. 4. Pp. 2498–2514.
5. *Il'in A.P., Korshunov A.V., Tolbanova L.O.* The use of aluminum nanopowder in hydrogen energetics. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2007. Vol. 311. No. 4. Pp. 10–14. (Rus.)

# АМОТИЗИРУЮЩИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПОРИСТЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ И СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Ю.В. Попов, В.А. Марков, В.И. Пусев, В.В. Селиванов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия  
popov.yulian@mail.ru

**Ключевые слова:** механические свойства, амортизирующие свойства, высокопористый алюминиевый сплав, сотовая конструкция, диаграмма деформирования, удельная энергия поглощения удара.

**Аннотация.** Представлены результаты исследований, которые позволяют судить об особенностях механических и амортизирующих свойствах высокопористых алюминиевых сплавов и сотовых конструкций из алюминиевых сплавов. Приведены аналогичные амортизаторы для различных стадий диаграммы деформирования высокопористых алюминиевых сплавов и сотовых конструкций, а также основы расчета удельной энергии поглощения удара и эффективной энергии поглощения удара. Показано, что расчет удельной энергии поглощения удара и эффективной энергии поглощения удара связан численно с площадью под диаграммой деформирования.

## SHOCK ABSORBING AND MECHANICAL PROPERTIES OF HIGHLY POROUS ALUMINUM ALLOYS AND HONEYCOMB STRUCTURES

Yu. Popov, V. Markov, V. Pusev, V. Selivanov

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Bauman Moscow State Technical University», Russian Federation  
popov.yulian@mail.ru

**Keywords:** mechanical properties, shock absorbing properties, highly porous aluminum alloy, honeycomb structure, deformation diagram, specific impact absorption energy.

**Abstract.** Research results are presented that make it possible to judge the features of the mechanical and shock-absorbing properties of highly porous aluminum alloys and honeycomb structures made of aluminum alloys. Shock-absorber analogues for various stages of the deformation diagram of highly porous aluminum alloys and honeycomb structures are given, as well as the basics of calculating the specific energy of impact absorption and effective energy of absorption of impact. It is shown that the calculation of the specific energy of shock absorption and the effective energy of shock absorption is related numerically to the area under the deformation diagram.

**Введение.** К высокопористым металлам можно отнести металлы, имеющие начальную пористость от 1.2 до 8.0, а начальная пористость определена как частное от деления величины плотности материала матрицы (твердой фазы, сплошного или компактного материала) на величину

начальной средней плотности (кажущейся плотности) пористой среды. Пористые металлы с начальной пористостью от 8.0 до 20.0 относят к сверхпористым. В большинстве случаев механические характеристики высокопористых металлов, в том числе и на основе алюминиевых сплавов, получают при испытаниях на сжатие при упругопластических деформациях и деформациях пластического уплотнения. Диаграммы деформирования пеноалюминия и высокопористых алюминиевых сплавов, полученных с помощью других технологий, имеют характерные стадии (этапы), которые в ряде работ представлены идеализированными диаграммами деформирования [1]:

- 1 – линейная упругая стадия;
- 2 – нелинейная упругая стадия (переходная стадия);
- 3 – уплотнительно-пластическая стадия;
- 4 – пластическая стадия.

Некоторые высокопористые и сверхпористые алюминиевые сплавы имеют диаграммы деформирования, которые близки к идеальной.

Полученные диаграммы деформирования ячеистого алюминия на основе литейного сплава АК7 независимо от начальной пористости и размера пор практически соответствуют идеализированной диаграмме деформирования [2]. Большинство исследованных высокопористых алюминиевых сплавов имеют диаграммы деформирования с упрочнением, что нежелательно для эффективного ослабления (изоляции) ударных воздействий. Полученные при испытаниях на сжатие диаграммы деформирования образцов сотовых конструкций из алюминиевых сплавов близки к идеализированной диаграмме деформирования высокопористых металлов. Однако по мере увеличения начальной средней плотности образцов на диаграмме деформирования появляется участок упрочнения.

Следует отметить широкое применение термина «демпфирующие свойства» (характеристики) наряду с термином «амортизирующие свойства» (характеристики). Однако демпфирующие свойства конструкционных металлов определяются упругими постоянными и проявляются при напряжениях, которые намного меньше предела текучести металла, а амортизирующие свойства пористых металлов и сотовых конструкций проявляются при больших пластических деформациях и уплотнении.

Кроме того, демпфер (от нем. *dampfer* – глушитель) – устройство для уменьшения (демпфирования) или предотвращения вредных механических колебаний звеньев машин и механизмов, поглощающее энергию механических колебаний; а амортизатор (от фр. *amortir* – ослаблять, смягчать) – устройство для смягчения ударов в конструкциях машин и сооружений в целях их защиты от сотрясений и больших нагрузок. Поэтому в данной работе применяется термин «амортизирующие свойства» (характеристики).

Очевидно, что упругая стадия деформирования идеализированной диаграммы уплотнения ячеистого алюминия соответствует амортизатору-

аналогу с постоянной жесткостью без начальной затяжки, уплотнительно-пластическая стадия идеальному амортизатору, а пластическая стадия амортизатору-аналогу с «жесткой» нелинейной характеристикой. Среди амортизаторов наилучшим считается такой, который способен воспринимать возможно большую энергию удара при минимальном значении силы. В этом случае оптимальной характеристикой считается такая, при которой для любого удара (при различных скоростях удара) сжатие амортизатора равно его полному ходу, а усилие сжатия  $F = \text{const}$ .

Амортизирующие характеристики высокопористых металлов и сотовых конструкций можно рассчитать на основе известных диаграмм деформирования в виде удельной энергии поглощения удара  $A$  и эффективной энергии поглощения удара  $E$ , которые вычисляются на основе диаграмм деформирования [3].

**Заключение.** Особенности механических свойств высокопористых алюминиевых сплавов и сотовых конструкций из алюминиевых сплавов определяют их хорошие амортизирующие свойства (характеристики), которые могут быть определены на основе удельной энергии поглощения удара и эффективной энергии поглощения удара.

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

### Литература

1. *Ashby M.F., Tianjian L.* Metal foams: a survey // *Sci. of China. Ser. B.* 2003. Vol. 46. No 6. Pp. 522–532.
2. *Гусаров А.П.* Механические и амортизирующие свойства высокопористого ячеистого алюминия / *А.П. Гусаров А.В. Жариков, В.А. Марков, А.Ф. Овчинников, В.И. Пусев, В.В. Селиванов, А.Н. Сообщииков* // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение».* 2009. №1(74). С. 58–66.
3. *Wei P., Liu L.* Influence of density on compressive properties and energy absorption of foamed aluminium alloy // *J. of Wuhan Univ. of Techn.Mater. Sci.* 2007. Vol. 22. No 2. Pp. 225-228.

### References

1. *Ashby M.F., Tianjian L.* Metal foams: a survey // *Sci. of China. Ser. B.* 2003. Vol. 46. No 6. Pp. 522–532.
2. Mechanical and shock absorbing properties of highly porous cellular aluminum / *Gusarov A.P., Zharikov A.V., Markov V.A., Ovchinnikov A.F., Pusev V.I., Selivanov V.V., Soobstnikov A.N.* // *Vestnik BMSTU. Ser. "Engineering".* 2009. №1(74). С. 58–66.
3. *Wei P., Liu L.* Influence of density on compressive properties and energy absorption of foamed aluminium alloy // *J. of Wuhan Univ. of Techn.Mater. Sci.* 2007. Vol. 22. No 2. Pp. 225-228.

# ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В АЛЮМИНИЕВЫХ ЗАГОТОВКАХ ПРИ ГЛУБОКОМ ПРОДАВЛИВАНИИ

Д.А. Серебряков<sup>1</sup>, А.Г. Кушнарев<sup>1</sup>, А.С. Нарикович<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Балтийский федеральный университет им И. Канта, Россия  
den10\_5@mail.ru

**Ключевые слова:** рентгеновская оптика, механические свойства, моделирование, пластическая деформация, билинейное упрочнение.

**Аннотация.** В работе методом конечных элементов проведено исследование напряженно-деформированного состояния алюминиевых заготовок при производстве элементов преломляющих линз для рентгеновской оптики методами глубокого продавливания. Построена физико-математическая модель упругопластического поведения при больших степенях деформации технически чистого алюминиевого сплава А0. Вычислительный эксперимент заключался в моделировании одностороннего и двухстороннего продавливания пустот параболической формы в алюминиевых заготовках, имеющих форму шайб. В результате исследования оценена эффективность выбранного метода производства, дана оценка оснастке и технологическим режимам, определены степени пластической деформации при обработке, которые достигают десятков процентов в локальных зонах заготовок. Большие степени деформаций в стесненных условиях могут быть причиной рекристаллизации в областях их локализации.

## INVESTIGATION OF STRESS-STRAIN STATE IN ALUMINUM BILLETS AT DEEP PUNCHING

D. Serebryakov<sup>1</sup>, A. Kushnaryov<sup>1</sup>, A. Narikovich<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Immanuel Kant Baltic Federal University, Russian Federation  
den10\_5@mail.ru

**Keywords:** X-ray optics, mechanical properties, numerical simulation, plastic strain, bilinear isotropic hardening.

**Abstract.** In this work, the stress-strain state of aluminum billets in the production of refractive lens elements by deep-pressing methods was studied by the finite element method. A physicomathematical model of the elastic-plastic behavior at high degrees of deformation of technically pure aluminum alloy A0 is constructed. A computational experiment consisted in modeling one-sided and two-sided punching of parabolic-shaped voids in aluminum blanks having the shape of washers. As a result of the study, the effectiveness of the selected production method was evaluated, the equipment and technological modes were evaluated, the degrees of plastic deformation during processing were determined, which reach tens of percent in the local zones of the workpieces. Large degrees of deformations in cramped conditions can cause recrystallization in the areas of their localization.

Составные преломляющие линзы для современной рентгеновской оптики состоят из набора металлических шайб с углублениями в виде параболоида вращения [1], как показано на *рис. 1*. Изготовление таких линз требует точного соблюдения технологии производства для получения требуемой геометрии с минимальными погрешностями. Самой доступной технологией производства является глубокое продавливание в специально изготовленных оснастках. Обычно в качестве материала для линз используют технически чистые алюминиевые сплавы. За счет большой пластичности алюминия технология продавливания позволяет получить требуемый профиль углубления с минимальными затратами. Однако при больших степенях деформации в заготовке могут возникнуть дефектные структуры и большие остаточные напряжения, влияющие на функциональные свойства материала. Объяснение эффектов дефектообразования и выбор оптимального режима обработки доступны при теоретических исследованиях с использованием численного моделирования.

Целью данной работы было теоретическое исследование процессов, происходящих при глубоком продавливании заготовок из алюминиевого сплава при производстве элементов составных линз.

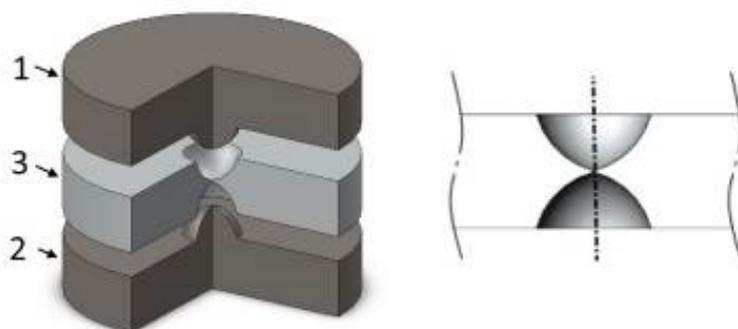


Рис. 1. Геометрическая модель элемента оптической системы (3) с двояковогнутым профилем между верхним (1) и нижним (2) пуансонами и поперечный профиль сечения линзы

В работе методом конечных элементов проведено исследование напряженно-деформированного состояния алюминиевых заготовок при производстве элементов преломляющих линз методами глубокого продавливания с разной глубиной продавливания для образования перешейка требуемой толщины под вершиной параболоида [2]. Вычислительный эксперимент заключался в моделировании одностороннего и двухстороннего продавливания пустот параболической формы в алюминиевых заготовках, имеющих форму шайб с диаметром 5 мм и толщиной 1 мм.

Построена физико-математическая модель упругопластического поведения при больших степенях деформации технически чистого алюминиевого сплава А0. При моделировании решалась система уравнений механики сплошных сред в лагранжевой постановке. В качестве определяющего уравнения принята билинейная модель с изотропным упрочнением [3]. Константы определяющего соотношения получены после обработки экс-

периментальных данных о сжатии цилиндрических образцов используемого алюминиевого сплава при повышенных температурах.

Применение сеточных методов при расчетах больших деформаций осложняется неизбежным вырождением элементов расчетной сетки. Для достижения требуемого результата и обеспечения условий сходимости расчета при моделировании были использованы методы адаптивного перестроения сетки.

В результате исследования оценена эффективность выбранного метода производства, дана оценка оснастке и технологическим режимам, определены степени пластической деформации при обработке, которые достигают десятков процентов в локальных зонах заготовок и остаточных упругих напряжений. Большие степени деформаций в стесненных условиях могут быть причиной увеличения плотности дислокационных структур в локальных областях и рекристаллизации в зонах их локализации [4, 5]. Из-за локального расположения зон рекристаллизации материала может формироваться неоднородность внутренней структуры. Для стабилизации структуры и свойств в объеме материала необходимо прибегнуть к финишной обработке отжигом. Подобранные геометрические размеры оснастки, при которых перераспределение материала из зоны выдавливания приводит к выпучиванию поверхностей на чалальных этапах прессования с последующим восстановлением плоскости. Использование высоких температур при продавливании улучшает технологичность производства в сторону уменьшения усилий при обработке заготовок.

### Литература

1. *Lengeler B., Schroer C.G., Richwin M., Tummler J., Drakopoulos M., Snigirev A., Snigireva I.* A microscope for hard X-rays based on pdrabolic compound refractive lenses. *Applied Physics Letters*. 1999. Vol. 74. № 26. Pp. 3924–3926.
2. *Нарикович А.С., Ершов П.А., Лейцин В.Н., Савин В.В., Снигирев А.А.* Рентгеновская томография как метод диагностики рентгенооптических элементов // *Приборы и техника эксперимента*. 2017. № 3. С. 88–91.
3. *Красновейкин В.А., Скрипняк В.А., Москвичев Е.Н., Козулин А.А., Бородулин Д.А.* Изменение физико-механических свойств алюминиевого сплава 1560 после обработки интенсивной пластической деформацией // *Механика XXI века*. 2017. № 16. С. 263–268.
4. *Москвичев Е.Н., Скрипняк В.А., Скрипняк В.В., Козулин А.А., Лычагин Д.В.* Исследование структуры и механических свойств алюминиевого сплава 1560 после интенсивной пластической деформации методом прессования с рифлением // *Физическая мезомеханика*. 2017. Т. 20. № 4. С. 85–93.
5. *Krasnoveikin V.A., Kozulin A.A., Skripnyak V.A.* Detection of structural changes and mechanical properties of light alloys after severe plastic deformation // *Journal of Physics: Conference Series*. 919 (1). 2017. 012012.

### References

1. *Lengeler B., Schroer C.G., Richwin M., Tummler J., Drakopoulos M., Snigirev A., Snigireva I.* A microscope for hard X-rays based on pdrabolic compound refractive lenses. *Applied Physics Letters*. 1999. Vol. 74. № 26. Pp. 3924–3926.

2. *Narikovich A.S., Ershov P.A., Leucin V.N., Savin V.V., Snigirev A.A.* X-ray tomography as a diagnostic method for x-ray optical elements // *Instruments and experimental technique.* 2017. No. 3. Pp. 88–91.

3. *Krasnoveykin V.A., Skripnyak V.A., Moskvichev E.N., Kozulin A.A., Borodulin D.A.* Physicomechanical properties change of 1560 aluminum alloy because of treatment with intense plastic deformation // *Mechanics of the 21st Century.* 2017. No. 16. S. 263–268.

4. *Moskvichev E.N., Skripnyak V.A., Skripnyak V.V., Kozulin A.A., Lychagin D.V.* Structure and Mechanical Properties of Aluminum 1560 Alloy after Severe Plastic Deformation by Groove Pressing // *Physical Mesomechanics.* 2018. 21(6). Pp. 515–522.

5. *Krasnoveikin V.A., Kozulin A.A., Skripnyak V.A.* Detection of structural changes and mechanical properties of light alloys after severe plastic deformation // *Journal of Physics: Conference Series.* 919 (1). 2017. 012012.

## **ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВОГО СПЛАВА АМГ5, НАПЕЧАТАННОГО ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ**

**В.Р. Утяганова, Н.Н. Шамарин, Н.Л. Савченко**

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия  
filaret\_2012@mail.ru

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, аддитивные технологии, электронно-лучевое плавление, механические свойства.

**Аннотация.** В данной работе были исследованы механические свойства по высоте напечатанного изделия из алюминий-магниевого сплава, изготовленного методом электронно-лучевой аддитивной технологии. Механические свойства определялись методом испытания на растяжение. Результаты механических испытаний указывают на то, что наиболее высокая прочность материала наблюдается у образцов, вырезанных вблизи подложки.

## **RESEARCH OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINUM-MAGNESIUM ALLOY AMG5, PRINTED BY ELECTRON-BEAM ADDITIVE TECHNOLOGY**

**V. Utyaganova, N. Shamarin, N. Savchenko**

Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Russian Federation  
filaret\_2012@mail.ru

**Keywords:** aluminum alloys, additive technologies, electron-beam melting, mechanical properties.

**Abstract.** In this paper, we studied the mechanical properties of all height of the printed product from an aluminum-magnesium alloy manufactured by electron beam additive manu-

facturing. The mechanical properties were determined by tensile testing. The results of mechanical tests indicate that the highest material strength is observed in samples, cut out near the substrate.

За последние несколько десятилетий направление аддитивных технологий набирает обороты в различных отраслях промышленности. Аддитивные технологии металлических материалов обладают неограниченным потенциалом возможностей и совершенствуют производство изделий во всем мире, так как позволяют при меньших затратах и энергопотреблении изготавливать высококачественные детали. Важным преимуществом данных технологий является высокая скорость изготовления деталей со сложной геометрией. Важное достоинство этой технологии заключается в том, что производство сложных деталей не предполагает затраты на обработку и снижает время изготовления деталей [1, 2].

3Д печать изделий методом электронно-лучевого аддитивного производства проводят в вакууме, что и делает этот метод перспективным поскольку позволяет устранить окисление используемых алюминиевые сплавов, предотвращает попадание различных примесей. Эта технология широко применяется для различных классов материалов, таких как, нержавеющие стали, титановые, никелевые, медные, а также алюминиевые сплавы [1, 3, 4].

Алюминиевые сплавы широко используют в качестве конструкционных материалов, они применяются в автомобильной, авиакосмической и авиационной промышленности. На данный момент изделия из алюминиевых сплавов получают не только традиционными методами производства, но и также при помощи аддитивных технологий [5].

Алюминиево-магниевые сплавы, такие как АМг5, имеют наилучшие коррозионные свойства, отличную свариваемость и часто используются в военно-морском строительстве, в ракетной и автомобильной промышленности. Также благодаря их исключительным свойствам зачастую используются в средненагруженных конструкциях. Изделия из алюминиево-магниевых сплавов при возникновении нештатных ситуаций могут подвергаться дополнительным нагрузкам. В связи с этим целью данной работы является изучение механических свойств образцов полученных методом электронно-лучевого аддитивного производства алюминиево-магниевого сплава АМг5.

В работе были получены образцы методом проволочной электронно-лучевой аддитивной технологии сплава АМг5. Образцы для испытаний были вырезаны в продольном (образец № 3, № 4) и поперечном сечении (образец № 1, № 2) относительно печати тонкостенного изделия. Испытания на растяжение проводились при комнатной температуре с использованием универсальной испытательной машины (Testsystems).

На рис. 1 показаны кривые, напряжение-перемещение на которых видно, что максимальные значения предела прочности имеют тестовые образцы №3 и №4, которые вырезаны в направлении продольном относительно нанесенных слоев. В продольном направлении относительно печати в образце № 4 максимальный предел прочности составляет  $\approx 257,96$  МПа. Различия значений механических свойств в образцах в продольном сечении образцов связаны с тем, что образцы были вырезаны на разную высоту от подложки: образец № 4 вырезан на высоту 0,5 мм; образец № 3 на 5 мм.

Показано, что полученные образцы алюминий-магниевого сплава АМг5, напечатанного методом электронно-лучевого проволочного производства обладают анизотропией механических свойств. Результаты механических испытаний указывают на то, что наиболее высокая прочность материала наблюдается у образцов, вырезанных вблизи подложки.

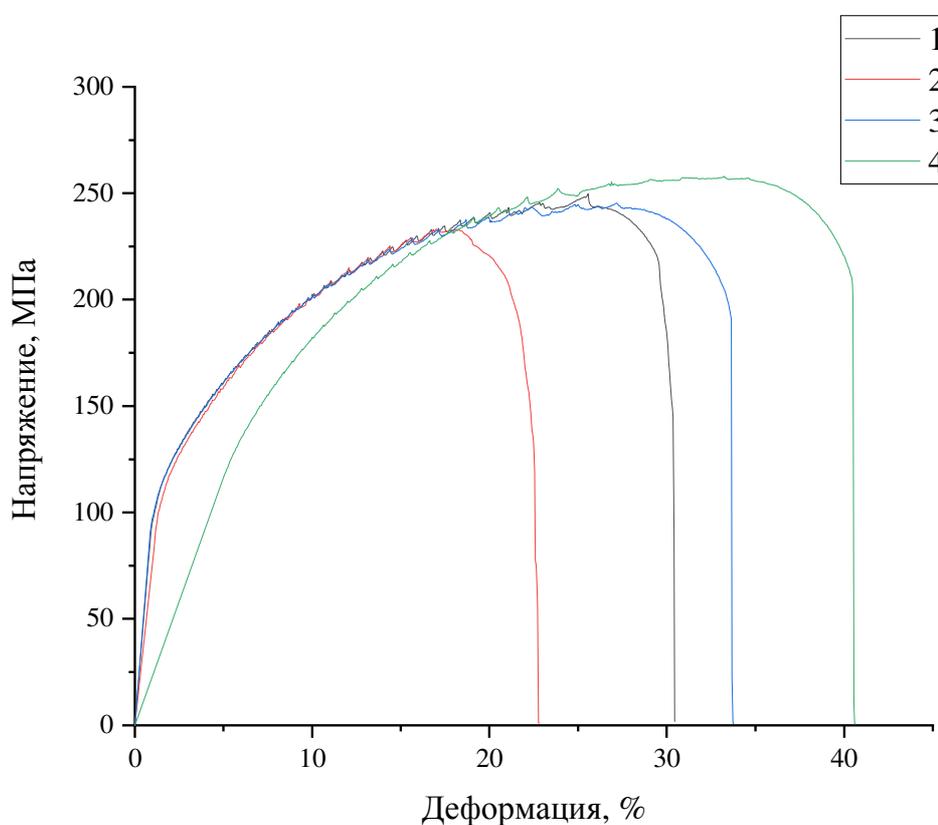


Рис. 1. Кривые напряжение-деформация сплава 5356 после испытания на растяжение: 1, 2 – в поперечном сечении слоев, 3, 4 – в продольном сечении слоев

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг., направление П.23.2.11. Испытания на растяжение выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90072

## Литература/References

1. *Domack M.S., Taminger K.M., Begley M.* Metallurgical Mechanisms Controlling Mechanical Properties of Aluminium Alloy 2219 Produced by Electron Beam Freeform Fabrication. *Mater Sci Forum.* 2009; 519–521:1291–1296.
2. *Lathabai S.* Additive Manufacturing of Aluminium-Based Alloys and Composites. Elsevier Ltd.; 2018.
3. *Taminger K.M., Hafley R.A., Domack M.S.* Evolution and control of 2219 aluminum microstructural features through electron beam freeform fabrication. *Mater Sci Forum.* 2006; 519–521(PART 2):1297–1304.
4. *Martin J.H., Yahata B.D., Hundley J.M., Mayer J.A., Schaedler T.A., Pollock T.M.* 3D printing of high-strength aluminium alloys. *Nature.* 2017; 549(7672):365–369.
5. *Su C., Chen X., Gao C., Wang Y.* Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of Al-Mg alloys fabricated by WAAM. *Appl Surf Sci.* 2019; 486(December 2018):431–440.

## **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

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВДУВА В ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ С УЧЕТОМ ТЕРМОДИНАМИКИ И ИЗМЕНЕНИЯ ДИАМЕТРА ВДУВА ПРИ ОБТЕКАНИИ СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ

**Н.Р. Гимаева**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, РФ  
natalia.gimaeva@inbox.ru

**Ключевые слова:** аэродинамика, 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. Статья направлена на изучение возможности снижения тепловых и аэродинамических нагрузок, действующих на тело в полете и определение эффективных способов управления движением в полете с применением выдува струи газа в пограничный слой. Представлено численное моделирование процесса локального выдува газа в пограничный слой на примере обтекания конуса.

### NUMERICAL MODELING OF INJECTION INTO THE BOUNDARY LAYER TAKING INTO ACCOUNT THERMODYNAMICS AND CHANGES IN THE DIAMETER OF INJECTION DURING SUPERSONIC STREAM

**N. Gimayeva**

National research Tomsk State University, Russian Federation  
natalia.gimaeva@inbox.ru

**Keywords:** aerodynamics, control jet, 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. Compared with the experimental study, numerical modeling of the flow around complex composite bodies is characterized by a large amount of data on the thermodynamic

parameters of the flow. The article is aimed at studying the possibility of reducing the thermal and aerodynamic loads acting on the body in flight and determining effective methods of motion control in flight by blowing a gas jet into the boundary layer. We presented a numerical simulation of the process of local gas blowing into the boundary layer, as an example the case of the flow over a cone was selected.

Практическое освоение космического пространства, начало которому было положено в нашей стране в конце пятидесятых – начале шестидесятых годов, постоянно связано с поисками средств для снижения тепловых и аэродинамических нагрузок, действующих на летательный аппарат и эффективных способов управления его полетом. В этой связи, были проведены первые исследования по взаимодействию газовых струй, вдуваемых с поверхности тела, с набегающими сверхзвуковыми потоками.

Целью настоящей работы является численное моделирование процесса локального выдува газа в пограничный слой. Математическое моделирование проводилось с использованием осесимметричной модели (конус). Угол полураствора моделей составлял  $15^\circ$ .

Численное моделирование процесса локального выдува струи газа в пограничный слой проведено с использованием пакета программ ANSYS Fluent. Моделирование течения осуществляется посредством решения трехмерной нестационарной системы уравнений Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу [1], с использованием SST модели турбулентности [2]. Выдув газа осуществляется через отверстие, расположенное на боковой поверхности конуса, рассматривается массовый расход выдуваемого газа.

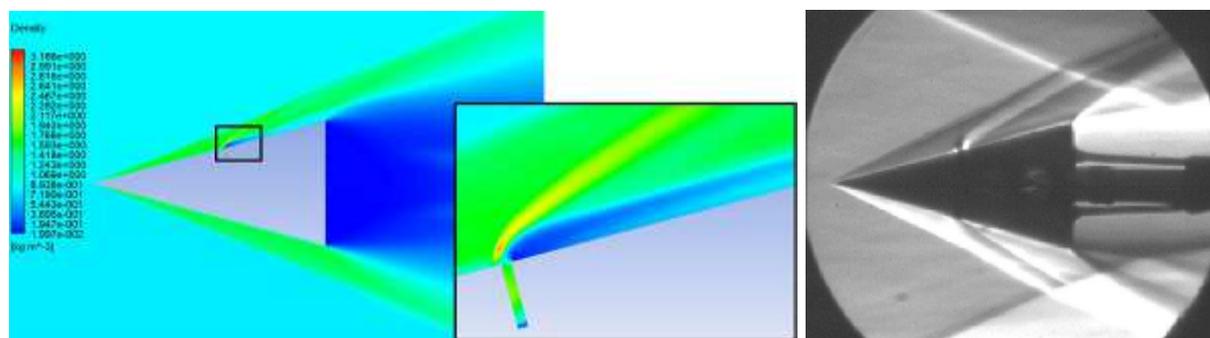


Рис. 1. Распределение плотностей и фотография обтекания конуса с выдувом через два симметрично расположенных отверстия сверхзвуковым воздушным потоком,  $M = 3$ :

*а* – распределение плотностей при численном моделировании;

*б* – экспериментальные данные

Произведена качественная оценка экспериментальных данных, и данных, полученных с помощью численного расчета для случая обтекания конуса с отборным отверстием в диаметре 0.2 мм. Анализ экспериментальных и численных результатов показал их соответствие по основным осо-

бенностям структуры течения в рассматриваемых условиях: формирование конуса Маха, динамическое возмущение течения в области выдува, формирование отрывного течения с поверхности у основания конуса [3]. На рис. 1 приведены данные о поле плотности, полученные численно (рис. 1, а), и о структуре течения, полученные экспериментально (рис. 1, б). Приведенные данные соответствуют обтеканию конуса с выдувом при  $M = 3$ .

В процессе работы отлажена методика численного расчета, позволяющая производить расчет параметров обтекания конического тела при заданной скорости набегающего потока и массового расхода выдуваемого газа. Сформированная база знаний открывает возможности производить численное моделирование тел более сложной формы для изучения их обтекания сверхзвуковыми и гиперзвуковыми потоками.

Грамотная состыковка эксперимента и математического моделирования позволяет получать достоверные данные для широкого диапазона аэродинамических и термогазодинамических параметров, а также дает информативную картину изменения параметров исследуемого процесса.

### Литература

1. *Wilcox D.C.* Turbulence Modeling for CFD. La Canada, California: DCW Industries Inc., 1998.
2. *Menter F.R.* Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // *AIAA Journal*. 1994. Vol. 32. No 8.
3. *Фарапонов В.В., Маслов Е.А., Чупашев А.В., Мацкевич В.В., Чижов С.Ю.* Экспериментальное исследование обтекания тел плоской и осесимметричной формы // *Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: сб. трудов IX Всероссийской научной конференции, 21–25 сентября 2016 года, г. Томск. Томск: Томский государственный университет, 2016. С. 144–145.*

### References

1. *Wilcox D.C.* Turbulence Modeling for CFD. La Canada, California: DCW Industries Inc., 1998.
2. *Menter F.R.* Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // *AIAA Journal*. 1994. Vol. 32. No 8. Pp. 1598–1605.
3. *Faraponov V.V., Maslov E.A., Chupashev A.V., Matskevich V.V., Chizhov S.Yu.* Experimental study of the flow over flat and axisymmetric bodies // *Fundamental and problems of applied modern mechanics: Collection of works of the IX All-Russian Scientific Conference, September 21–25, 2016, Tomsk. Tomsk: Tomsk State University, 2016. Pp. 144–145.*

## ТРИ НАПРАВЛЕНИЯ УЛУЧШЕНИЯ ПАТРОНА СТРЕЛКОВОГО КОМПЛЕКСА

М.А. Кислин<sup>1</sup>, А.А. Герман<sup>1,2</sup>, А.В. Гуськов<sup>2</sup>, К.Е. Милевский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский университет геосистем и технологий, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет  
kislin69@yandex.ru

**Ключевые слова:** начальная скорость, комплекс ШАК-12, патрон 12,7x55 мм, разделенный пороховой заряд, «Тринар», самозарядное ружье МР-153, капсуль-воспламенитель.

**Аннотация.** В работе представлен анализ конструкции патрона с разделенным пороховым зарядом. Исследовано влияние начальной скорости на характеристики полета пуль, которые предназначены для решения определенных тактических задач. Даны рекомендации по капсулированию гильз, что должно отразиться на скорости срабатывания капсуля воспламенителя, который, в свою очередь, энергичнее передаст форс пламени для зажигания порохового заряда. Использование экологически чистого ударно-воспламенительного состава (УВС), который не загрязняет воздух в закрытых тирах продуктами сгорания при выстреле.

## THREE WAYS OF RIFLE CARTRIDGE IMPROVEMENT

M. Kislin<sup>1</sup>, A. German<sup>1,2</sup>, A. Guskov<sup>2</sup>, K. Milevsky<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian State University of Geosystems and Technologies, Russian Federation

<sup>2</sup>Novosibirsk State Technical University, Russian Federation  
kislin69@yandex.ru

**Keywords:** starting speed, SHAK-12 complex, 12,7x55 mm cartridge, divided powder charge, «Trinar», self-loading gun MP-153, primer.

**Abstract.** The work considers analysis of divided powder charge cartridge construction. The effect of the initial velocity on the flight characteristics of bullets, which are designed to solve certain tactical tasks, is studied. Recommendations are given for encapsulating the cartridges, which should affect the speed of operation of the igniter capsule, which, in turn, will energetically transmit the flame force to ignite the powder charge. Use of environmentally friendly shock-igniting composition (UVS), which does not pollute the air in closed shooting ranges with combustion products when fired.

**1. Увеличение начальной скорости.** Известно, что для выполнения специальных задач в городских условиях спецподразделениям требуется оружие, обладающее набором определенных характеристик. К таким относят: относительный малый вес оружия, компактность, безотказность и надежность применения, точность выстрела и т.д. Применение оружия спецподразделениями выявил необходимость поражать цели за преградой

в городских условиях с малоэтажными постройками, либо горной каменистой местности, чем может служить кирпичная стена, стальной лист, либо применение против автомобильного транспортного средства путем выведения двигателя из строя. При этом должны быть исключены рикошеты.

С появлением комплекса ШАК-12 и специального патрона к нему, выполненного в цилиндрической форме с проточкой калибра 12.7x55 мм, имеющего ряд особенностей: низкую начальную скорость (дозвуковую) около 292 м/с, крупный калибр 12.7 мм [5], по сравнению с пулей автомата Калашникова 5.45 мм, стало возможным использовать для повышения начальной скорости разделенный пороховой заряд, отлично зарекомендовавший себя в патронах к гладкоствольным ружьям.

Для того чтобы обеспечить наилучшую совместимость всех необходимых характеристик, соединенных вместе, реализован проект ШАК-12. В этот комплекс входит штурмовой автомат, использующий специальный боеприпас, а именно, винтовочный патрон 12.7x55 мм, обладающий большой кинетической энергией в дозвуковой области.

Данный автомат предназначен для использования в городских условиях, он должен пробивать преграды и не давать рикошетов, а также использование специального патрона с дозвуковой скоростью позволяет снизить уровень шума до 123 дБ при стрельбе [6], что соответствует звуку реактивного двигателя на расстоянии 60 м. Прицельная дальность стрельбы составляет 200 м. При применении легких пуль (7 г) с алюминиевым полым сердечником начальная скорость (сверхзвуковая) для нашей территории составляет около 350 м/с, но она быстрее теряется, а эффективная стрельба такими пулями становится равной 100 м. Пули с бронебойным сердечником обладают меньшей начальной скоростью (дозвуковой) равной 292 м/с, способны пробивать бронежилеты и поражать легкобронированную технику. Их пробивная способность станет выше, если увеличить начальную скорость, так как кинетическая энергия, запасенная при выстреле, задается у дульного среза и действует на всем участке траектории полета до поражения цели.

Из-за низкой (дозвуковой) скорости полета пули, она не способна обеспечить передачу кинетической энергии на большие расстояния (свыше 200 м) и обеспечить запреградное действия на противника (достичь летального эффекта), находящегося в укрытии (это могут быть кирпичные и железобетонные стены, стальные листы). Повышая начальную скорость тяжелой бронебойной пули, изменится траектория полета пули – она станет более настильной. А расстояние прямого выстрела увеличится. Также предлагается оптимальное расположение капсюля-воспламенителя в капсюльном гнезде на основании выведенных формул (см. ниже), позволяющих при «правильном» капсюлировании добиться надежного срабатывания капсюля-воспламенителя. Чтобы снизить вредное воздействие на организм стрелка от срабатывания капсюля-воспламенителя, необходимо ис-

пользовать экологически безопасный ударно-воспламенительный состав (УВС).

В настоящее время разработаны патроны, способные увеличить начальную скорость без повышения давления в патроннике, давление остается постоянным на всем участке движения пули внутри канала ствола, что особенно важно при проектировании оружия. Вследствие чего нет необходимости в изготовлении толстостенных патронников, способных выдерживать большое давление, без увеличения общего веса оружия.

Большая работа проведена в отношении увеличения начальной скорости пуль для гладкоствольных карабинов специальных и патронов к ним вооруженных подразделений МВД и специальных отрядов для выполнения оперативно тактических мероприятий.

Был разработан патрон с разделенным пороховым зарядом на три части, который называется «Тринар-БП». На *рис. 1* представлены патроны «Тринар» с пулей – а) и зарядом дроби – б).

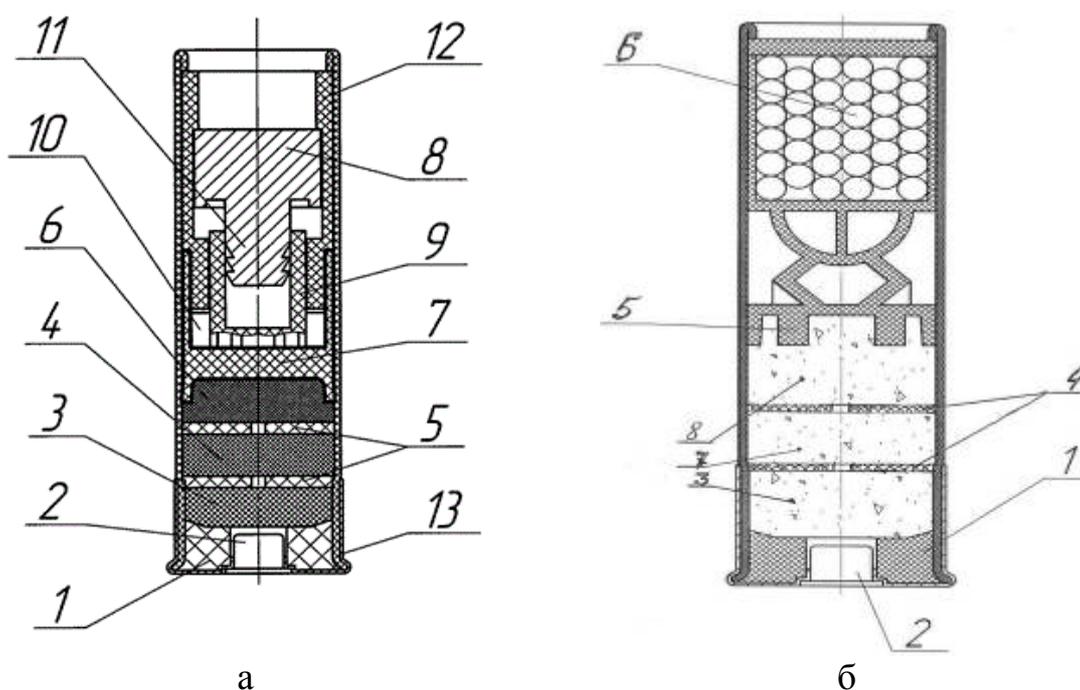


Рис. 1. Патрон «Тринар»

*а* – с пулей: 1 – гильза; 2 – капсюль-воспламенитель; 3, 4, 6 – пороховой заряд, разделенный на три части; 5 – диафрагма с отверстием; 7 – пыж; 8 – пуля; 9 – стабилизатор; 10 – стабилизирующими выступами; 11 – хвостовик пули; 12 – три центрирующих отделяющихся элемента пули; 13 – металлическое основание гильзы;

*б* – с зарядом дроби: 1 – гильза; 2 – капсюль-воспламенитель; 3, 7, 8 – разделенный пороховой заряд на три части; 5 – пластиковый пыж-контейнер; 6 – заряд дроби

Это изобретение защищено патентом РФ № 2536954. Разделенный пороховой заряд на части позволяет увеличивать скорость за счет увеличения полной массы метательного заряда, состоящего из разных порохов с раз-

ной навеской. Такой заряд разделен между собой картонными диафрагмами, предотвращающими мгновенное срабатывание всего объема заряда. Данный метод увеличения начальной скорости отлично зарекомендовал в патронах к гладкоствольным ружьям.

Из ранее имеющегося опыта взаимодействия со специалистами ФКУ НПО «СТиС» МВД России сформулированы основные предварительные требования к патронам «Тринар-БП»

– патрон «Тринар-БП» при стрельбе из баллистического ствола ( $L=500$  мм) на дистанции 50 м должен обеспечивать рассеяние  $P_{100} \leq 10$  см. Одновременно с этим разница между наименьшим и наибольшим значением в баллистической группе из 10 выстрелов, не должна превышать 25 м/с;

– патрон должен обеспечивать безотказность механизмов перезарядки;

– длина патрона «Тринар-БП» в сборе должна лежать в пределах (59–68) мм.

Для определения пробивной способности испытания патронов «Тринар-БП» необходимо проводить на дистанции 20 м по стальной плите (материал Ст 3) толщиной 10 мм и на дистанции 50 м – толщиной 6 мм.

Рассмотрев патент на изобретения РФ № 2151369, решено было исследовать влияние начальной скорости полета бронебойной пули на эффективность пробития стальной преграды. Испытанию были подвергнуты пули типа ПБМ пистолета Макарова. Из результатов исследования становится ясно, что увеличение начальной скорости с 500 до 600 м/с приводит к увеличению количества пробитий стальной преграды с 38 до 60%.

Аналогичную картину можно получить, применяя разделенный пороховой заряд в боеприпасе 12,7x55 мм. Для выяснения более точных результатов необходимо провести исследования.

**2. Капсюль-воспламенитель с высокой степенью безотказности.** Используемые капсюли-воспламенители в патронах к стрелковому оружию должны обеспечивать надежное срабатывание ударно-воспламенительного состава с минимальным временем при производстве выстрела.

Такие требования объясняются необходимостью поражать быстро движущиеся цели, за счет сокращения времени от приведения оружия к выстрелу до поражения цели. Для повышения надежности и чувствительности срабатывания предложена формула оптимального сочетания геометрических размеров капсюльного гнезда гильзы и капсюля воспламенителя типа «Бердан», наковаленка гильзы патрона выполняется такой высоты, чтобы вершина наковаленки гильзы углублена в капсюльном гнезде относительно торца шляпки гильзы патрона на величину «Д», равную величине «С» максимальной высоты воспламенительного состава с герметизирующей мембраной с учетом допуска, плюс на величину толщины стенки металлического колпачка и плюс на величину «Н», заданной на патрон по углублению капсюля-воспламенителя типа «Бердан» относительно торца

шляпки гильзы с учетом допуска, при этом величина «А» глубины капсюльного гнезда равна величине «В» высоты металлического колпачка с учетом допуска плюс величина «Н», заданная на патрон по углублению капсюля-воспламенителя типа «Бердан» относительно торца шляпки гильзы с учетом допуска, т.е. должны выполняться требования по формулам:

$$\langle A \rangle = \langle B \rangle + \langle H \rangle \text{ и } \langle D \rangle = \langle C \rangle + \langle H \rangle.$$

В ходе этой работы был задан вопрос: как влияет сила удара бойка при наколе капсюля-воспламенителя на инициирующую способность и срабатывании всего заряда пороха? Ответ такой: величина удара бойка практически одинаковая и она достаточная, чтобы наколоть капсюль-воспламенитель, который в свою очередь передает импульс на заряд пороха, обеспечивающий эффективное срабатывание всего объема пороха. Варьируя величиной глубины утопания капсюля-воспламенителя в капсюльном гнезде, можно удалять от наковаленки, тогда возникает затяжной выстрел или вовсе не происходит (осечка), либо приближать, тогда растет вероятность преждевременной вспышки из-за повышенной чувствительности или может привести к выкрашиванию ударно-воспламенительного состава.

**3. УВС экологически чистый.** Изобретение относится к средствам инициирования, а именно: к ударным составам снаряжения капсюлей-воспламенителей патронов стрелкового и охотничьего оружия. Состав должен быть работоспособен при температурах от  $-50$  до  $+50$  °С и с высокой степенью надежности инициировать пороховой заряд в патроне.

В настоящее время используют ударно-воспламенительные составы на основе соединений свинца и ртути, при срабатывании выделяются токсичные соединения, которыми вредно дышать. А также выделяющиеся газы корродируют канал ствола. Применение таких составов неприемлемо в закрытых помещениях и тирах. На замену устаревших составов приходит эра экологически чистых, неоржавляющих канал ствола составов на основе: тетразена; динитробезофуросоната калия; одноосновного стифната калия; инертного сенсibiliзатора (мраморной крошки) по патенту РФ № 2144523.

Капсюли-воспламенители, снаряженные данным составом, полностью отвечают требованиям, предъявляемым к неоржавляющим составам капсюлей-воспламенителей, не теряют своих рабочих характеристик в течение всего гарантийного срока хранения, надежно воспламеняют пороха, используемые для снаряжения стрелкового оружия.

**Вывод.** На основании имеющегося опыта можно сказать, что патроны «Тринар-БП» хорошо зарекомендовали себя как высокоскоростные патроны. Принцип повышения начальной скорости путем деления заряда на несколько частей не новый, но был реализован и запатентован впервые в

патронах с двойным делением заряда (Бинары), а затем разделен на три части стал называться «Тринар».

Полученный эффект достаточно хорошо изучен и его можно применить в патроне комплекса ШАК-12 для повышения начальной скорости. Предполагается, что с увеличением скорости улучшатся баллистические характеристики; настильность, дальность прямого выстрела, точность выстрела вследствие плавного ступенчатого разгона пули внутри канала ствола.

Применение рекомендаций по капсулированию гильзы повысит надежность с 99.7 до 99.8% и уменьшит время срабатывания, а экологически чистый неоржавляющий ударно-воспламенительный состав снизит вредное воздействие на человека и окружающую среду. В совокупности эти направления должны улучшить патрон 12,7x55 мм, что станет надежнее в его использовании.

### Литература

1. Трофимов В.Н., Трофимов А.В. Современные охотничьи боеприпасы для гладкоствольного оружия. Пули. Пулевые патроны: справочник. М.: Дом Рученькиных, 2007.
2. Кислин М.А., Зыков В.А. Пулевой патрон для гладкоствольных ружей, патент на изобретение RU 2537016, 13.06.2013.
3. Кутенков В.Г. Пуля «Бабочка комбинированная» и патрон для гладкоствольных ружей, патент на изобретение RU 2465544, 23.05.2011.
4. Гуськов А. В. Внешняя баллистика: учеб. пособие / А.В. Гуськов, К.Е. Милевский, А.В. Сотенко: 2-е изд. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017.
5. Патрон 12,7x55 мм СЦ-130: СЦ-130 ПТ, СЦ-130 ПТ2, СЦ-130 ВПС, СЦ-130 ПУ [Электронный ресурс]. URL: <http://sniper-weapon.ru/boepripsy/237-patron-12-7kh55-mm-sts-130-sts-130-pt-sts-130-pt2-sts-130-vps-sts-130-pu/> (дата обращения: 16.10.2019).
6. Патрон СЦ-130 ВПС – Memo-randum.net [Электронный ресурс]. URL: <https://memo-randum.net/katalog/patrony/patron-sts-130-vps/> (дата обращения: 16.10.2019).
7. Автомат штурмовой АШ-12 [Электронный ресурс]. URL: [https://pikabu.ru/story/avtomat\\_shturmovo\\_y\\_ash12\\_4994655](https://pikabu.ru/story/avtomat_shturmovo_y_ash12_4994655) (дата обращения: 16.10.2019).

### References

1. Trofimov V.N., Trofimov A.V. Modern hunting ammunition for smooth-bore weapons. Bullets Bullet cartridges: a guide. M.: Ruchenkin Publishing House, 2007.
2. Kislin M.A., Zykov V.A. Bullet cartridge for smoothbore guns, patent for invention RU 2537016, 06/13/2013.
3. Kutenkov V.G. Bullet "Combined Butterfly" and cartridge for smoothbore guns, patent for invention RU 2465544, 05.23.2011.
4. Guskov A.V. External ballistics / A.V. Guskov, K.E. Milevsky, A.V. Sotenko: 2nd ed. Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2017.
5. Cartridge 12.7x55 mm SC-130: SC-130 PT, SC-130 PT2, SC-130 VPS, SC-130 PU [Electronic resource]. URL: <http://sniper-weapon.ru/boepripsy/237-patron-12-7kh55-mm-sts-130-sts-130-pt-sts-130-pt2-sts-130-vps-sts-130-pu/> (date of access: 10.16.2019)
6. Cartridge SC-130 VPS - Memo-randum.net [Electronic resource]. URL: <https://memo-randum.net/katalog/patrony/patron-sts-130-vps/> (accessed: 10/16/2019).

7. Assault rifle ASH-12 [Electronic resource]. URL: [https://pikabu.ru/story/avtomat\\_shturmovoy\\_ash12\\_4994655](https://pikabu.ru/story/avtomat_shturmovoy_ash12_4994655) (accessed: 10/16/2019).

## ПРОВЕДЕНИЕ ДРЕНАЖНЫХ ИСПЫТАНИЙ НА АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ

**Ю.М. Коляян, Д.К. Кененбаева, В.В. Козюкова, М.В. Гаркаев,  
С.А. Тыртышный, Н.А. Большаков**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
yu1anw@mail.ru

**Ключевые слова:** дренажные испытания, прямоточный воздушно-реактивный двигатель, сверхзвуковой поток, датчики давления.

**Аннотация.** В работе предложен экспериментальный способ получения распределения давлений вдоль стенки канала проточного тракта модели прямоточного воздушно-реактивного двигателя. Спроектировано и изготовлено зондирующее устройство, позволяющее осуществлять измерение величины статического давления в восьми точках, расположенных вдоль стенки канала с шагом 5 мм. Для используемых тензметрических датчиков проведена предварительная тарировка. Для обработки и получения градуировочных зависимостей составлена программа на языке C<sup>++</sup>. С использованием изготовленного зонда проведены дренажные испытания в рамках серии экспериментов по обтеканию модели прямоточного воздушно-реактивного двигателя набегающим потоком с числом Маха  $M = 6$ . Получены значения статического давления для каждой точки, построено распределение величины вдоль стенки канала.

## DRAINAGE TESTS IN THE NEAR-WALL FLOW ZONE OF A RAMJET ENGINE WORKING CHAMBER ON THE AERODYNAMIC FACILITY

**Yu. Kolayan, D. Kenenbayeva, V. Kozyukova, M. Garkaev, S. Tyrtyschnyy,  
N. Bolshakov**

National research Tomsk State University, Russian Federation  
yu1anw@mail.ru

**Keywords:** drainage tests, ramjet engine, supersonic flow, pressure sensors.

**Abstract.** In this paper a method for obtaining a pressure distribution on the wall on working duct of ramjet engine is described. The device for measuring static pressure inside a duct of a ramjet engine designed and constructed. Preliminary tests for the static pressure sensors were carried out. A program for acquiring calibration curves is compiled, using the C<sup>++</sup> language. The experimental study for supersonic flow around ramjet engine model with Mach number  $M = 6$  using the constructed device for drainage measurements is successfully completed.

С каждым годом увеличивается разнообразие экспериментальных исследований в аэродинамических трубах [1, 2], и к их использованию прибегают не только авиастроители. Строители метро хотят знать сопротивление, оказываемое воздухом при движении поезда в тоннеле, степень вентиляции вагонов; инженеры, занимающиеся автомобилестроением, уделяют особое внимание аэродинамическим свойствам моделей, влияющим на топливную экономичность и курсовую устойчивость.

Растет интерес к исследованию обтекания и определению аэродинамических характеристик тел различной формы, а результаты экспериментальных исследований используются для проверки физических и математических моделей, применяемых для расчёта сложных внешних и внутренних течений.

Целью данной работы является экспериментальное получение распределения давлений в канале проточного тракта осесимметричной модели прямого воздушно-реактивного двигателя.

Из основных задач можно выделить:

1. Градуировка датчиков, используемых для регистрации и измерения давления;
2. Написание программного кода для автоматизации процесса получения градуировочных зависимостей методом наименьших квадратов и получение уравнений для каждого датчика;
3. Проведение серии экспериментов с использованием разработанного зонда для дренажных испытаний;
4. Обработка результатов эксперимента и получение распределения давления вдоль стенки проточного тракта модели.

Эксперименты проводились в аэродинамической трубе кратковременного действия – модельной аэродинамической установке [3]. Исследуемая модель – прямооточный воздушно-реактивный двигатель [4] – размещалась в рабочей части, после чего производилось ее обтекание равномерным сверхзвуковым потоком. Для пуска установки основной клапан включался с пульта управления и рабочий газ из баллонов поступал в электрический нагреватель, затем в форкамеру и соответствующее осесимметричное сопло [5].

Для измерения давления в осесимметричном канале был спроектирован и изготовлен зонд (рис. 1, а). Статическое давление измерялось в восьми точках на стенке проточного тракта модели ПВД: дренажные отверстия соединялись трубками с тензодатчиками типа ТДМ2-А.

Была проведена градуировка датчиков: осуществлялось их нагружение давлением известной величины и регистрировались отклики каждого из восьми датчиков. Для автоматизации обработки зарегистрированных значений написана программа на языке C++, позволяющая получить коэффициенты для градуировочных зависимостей методом наименьших квадра-

тов. Полученные зависимости были использованы для пересчета экспериментально зарегистрированных сигналов.

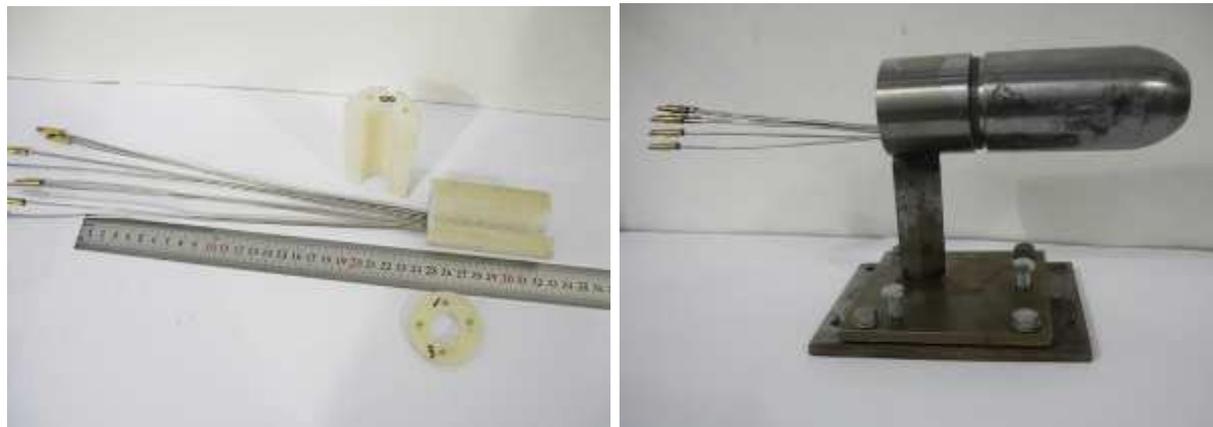


Рис. 1. Зонд для дренажных испытаний: *а* – внешний вид конструкции; *б* – модель ПВРД с зондом, размещенным в проточной части

Проведена серия экспериментов с использованием разработанного зонда для дренажных испытаний. Зонд размещался в проточной части осесимметричной модели ПВРД (рис. 1, б) [2], затем производилось обтекание модели равномерным сверхзвуковым потоком со скоростью, соответствующей числу Маха  $M = 6$ . Были зарегистрированы сигналы с каждого датчика и получены распределения давления вдоль стенки проточного тракта ПВРД. В настоящее время планируется проведение серии аналогичных экспериментов для случаев обтекания модели потоками с числами Маха  $M = 5$  и  $M = 7$ .

### Литература

1. Саленко С.Д., Гостеев Ю.А., Обуховский А.Д. Аэродинамические исследования типовых многобалочных конструкций // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20. №. 4. С. 451–460.
2. Евграфов А.Н., Шведов С.Б. Снижение расхода топлива легкового автомобиля с прицепом путем улучшения его обтекаемости // Труды НАМИ. 2013. №. 254. С. 89–94.
3. Звезгинцев В.И. Газодинамические установки кратковременного действия. Ч. I. Установки для научных исследований. Новосибирск: Параллель, 2014. 551 с.
4. Савкина Н.В., Фараонов В.В., Маслов Е.А. Экспериментально-теоретическое исследование газодинамики в проточной части модельного гпврд при обтекании сверхзвуковым потоком // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики-2017. 2018. С. 35–45.
5. Скибина Н.П., Савкина, Н.В., Фараонов В.В., Маслов Е.А. Комплексный подход к решению задачи высокоскоростного обтекания тела в импульсной аэродинамической установке и проверка согласованности полученных результатов // Вестник Томского

### References

1. *Salenko S.D., Gosteev Y.A., Obukhovskiy A.D.* Aerodynamic studies of typical multi-beam structures. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2013. Т. 20. № 4. С. 441–450.
2. *Evgrafov A.N., Shvedov S.B.* The reduction in fuel consumption of the car with a trailer by improving its aerodynamics // *Trudy NAMI*. 2013. №. 254. Pp. 89–94.
3. *Zvegintsev V.I.* Gas dynamic installation of short duration. Part I. Installations for scientific research. Novosibirsk: Parallel, 2014. 551 s.
4. *Savkina N.V., Faraponov V.V., Maslov E.A.* Experimental-theoretical investigation of the gas dynamics of the flow part of the model hrabe in supersonic flow // *Aktual'nye problemy sovremennoj mehaniki sploshnyh sred i nebesnoj mehaniki-2017*. 2018. Pp. 35–45.
5. *Skibina N.P., Savkina N.V., Faraponov V.V., Maslov E.A.* An integrated approach to solving the problem of high-speed flow around a body in a pulsed aerodynamic facility and validation of the obtained results. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika. Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 59. Pp. 118–129. DOI: 10.17223/19988621/59/12

## ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ТОЛЩИНА ПРЕГРАД И ЕЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ В БРОНЕБАЛЛИСТИКЕ

**Ю.В. Попов, В.А. Марков, В.И. Пусев, В.В. Селиванов**

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия  
popov.yulian@mail.ru

**Ключевые слова:** бронебаллистика, преграда, относительная толщина, деформирование, разрушение, пробитие.

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы бронебаллистики, связанные с попытками классифицировать виды деформирования и разрушения преград при пробитии и проникании. Показано, что опубликованные варианты классификации не сопровождались относительной толщиной преград, определяемой отношением толщины преграды к диаметру ударника. В связи с этим в ряде случаев оценка толщин преград носит или гуманитарно-эмоциональный характер, или является ошибочной количественной оценкой. Приведены соответствующие примеры, а классификации дополнены относительными толщинами преград. Рассмотрены особенности оценки процессов пробития и проникания для калиберных и подкалиберных ударников, а также для кумулятивных струй. Это позволит избежать ошибок и бронебоязни.

# THE RELATIVE THICKNESS OF THE BARRIERS AND ITS FUNDAMENTAL IMPORTANCE IN ARMORED BALLISTICS

Yu. Popov, V. Markov, V. Pusev, V. Selivanov

Bauman Moscow State Technical University, Russian Federation  
popov.yulian@mail.ru

**Keywords:** armor ballistics, barrier, relative thickness, deformation, destruction, penetration.

**Abstract.** The issues of armor ballistics related to attempts to classify the types of deformation and destruction of barriers during penetration and penetration are considered. It is shown that the published classification options were not accompanied by the relative thickness of the obstacles, determined by the ratio of the thickness of the barrier to the diameter of the impactor. In this regard, in some cases, the assessment of the thickness of the obstacles is either humanitarian-emotional in nature, or is an erroneous quantitative assessment. Corresponding examples are given, and the classifications are supplemented by the relative thickness of the barriers. The features of evaluating the processes of penetration and penetration for caliber and sub-caliber projectiles, as well as for cumulative jets, are considered. This will avoid errors and armor fear.

**Введение.** Создание экранов и защитных устройств от действия высокоскоростных ударников связано с исследованием процессов проникания и пробития (под прониканием обычно понимается движение ударника в преграде без выхода его из последней, а пробитие означает полный проход ударника через преграду), которые наряду с расчетными методами изучаются в силу своей сложности с привлечением экспериментальных методов. Экспериментальные данные в ряде работ обобщаются и систематизируются, а представленные попытки классификации видов деформирования и разрушения преград должны были содействовать развитию аналитических моделей пробития и проникания, которые не могут в полной мере учитывать многообразие физических особенностей процессов пробития и проникания. Однако они не сопровождались относительной толщиной преград  $h/d$  ( $h$  – толщина преграды,  $d$  – диаметр ударника), что обесценивало их научно-техническую значимость [1, 2].

**Основная часть.** В результате работы по пробитию относительно тонких преград или соответствует первоисточникам, или те же работы необоснованно противопоставляются. В данной работе на основе анализа экспериментальных и расчетных данных классификация видов пробития металлических преград дополнена относительными толщинами следующим образом [3]: тонкие преграды –  $h/d < 0.5$  (образование лепестковой пробоины; область применения теории тонких оболочек); средние преграды –  $0.5 < h/d < 1.5$  (пластическое расширение пробоины или выбивание пробки; область применения формулы Жакоб-де-Марра); толстые и полу-

бесконечные преграды –  $h/d > 1.5$  (образование радиальных трещин и разрушение).

Отсутствие подобных оценок привело к тому, что в литературе появляются утверждения о том, что «очень тонкие пластинки редко применяются при бронировании», а область применения тонких пластин ограничена только элементами динамической защиты танков и элементами защиты космических аппаратов. При этом мера «тонкости» и «очень тонкости» не указывается, что позволяет отнести подобные оценки к гуманитарно-эмоциональным, которые не представляют инженерно-технической ценности. Более того, указанные утверждения являются ошибочными.

Следует учитывать, что приведенная классификация связана с калиберными ударниками и основана на «артиллерийском подходе», когда толщина пробиваемой преграды или глубина каверны при проникании может измеряться в диаметрах ударника, который совпадает с внутренним диаметром (калибром) ствола баллистической установки. Подобный подход будет нефизичным для подкалиберных ударников.

Известно, что рассмотренные калиберные бронебойные снаряды могли пробивать броню относительной толщиной  $h/d = 1.2...1.3$ , а подкалиберные относительной толщиной  $h/d = 2...3$ . Однако в пробитии преграды участвовал только бронебойный сердечник, диаметр которого для подкалиберных снарядов с неотделяемым поддоном катушечной или обтекаемой формы составлял  $dc = 0.4d$ . Тогда в диаметрах сердечника относительная толщина пробиваемой преграды будет  $h/dc = 5...7$ . У современных бронебойных подкалиберных снарядов с отделяемым поддоном относительная толщина пробиваемой преграды может достигать  $h/dc = 20$  и более.

Аналогичная ситуация характерна для оценки результатов пробития или проникания ударных ядер или кумулятивных струй. Так, для современных кумулятивных снарядов и авиабомб диапазон относительных толщин преград при «артиллерийском подходе» составляет  $h/d = 3.6...4.0$ . Если принять, что диаметр кумулятивной струи  $dc = 0.05d$ , то указанный диапазон пробиваемых толщин можно пересчитать, и он составит  $h/dc = 73...80$ .

**Заключение.** Таким образом, относительная толщина пробиваемой преграды является важнейшей и даже фундаментальной характеристикой бронебаллистики, а ее правильное применение позволяет избегать не только ошибок, но и бронебоязни.

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

### Литература

1. Гольдсмит В. Удар. М.: Стройиздат, 1965, 448 с.
2. Backman M.E., Goldsmith W. The mechanics of penetration projectiles into targets // Int. J. Engng. Sci., 1978. Vol. 16, № 1. Pp. 2–94.

3. Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И. О фундаментальном значении относительной толщины преград в бронебаллистике // Труды Международной конференции «XVII Харитоновские тематические научные чтения». Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Саров, 23–27 марта 2015 г. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. С. 572–577.

### References

1. Goldsmith W. Impact. London: Arnold, 1960, p 448
2. Backman M.E., Goldsmith W. The mechanics of penetration projectiles into targets // Int. J. Engng. Sci., 1978. Vol. 16, № 1. Pp. 2–94.
3. Markov V.A., Ovchinnikov A.F., Pusev V.I. On the fundamental value of the relative thickness of barriers in armored ballistics // Proc. of the International conference 17th Khariton Readings (Sarov: Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics Publ.), 2015. Pp. 572–577.

## ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МОДЕЛЬНОЙ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЫСОКОПЛОТНЫХ ТОПЛИВ

**К.С. Рогаев, А.Н. Ищенко, В.З. Касимов, В.В. Буркин,  
А.С. Дьячковский, А.Д. Сидоров, Е.Ю. Степанов**

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

**Ключевые слова:** горение топлив, высокоплотные топлива, ствольные системы, газодинамика, внутренняя баллистика, присоединенный заряд.

**Аннотация:** Как было показано ранее в работах авторов, модернизация порохового метательного заряда возможна путем применения топлив в виде присоединенного заряда, выталкивающего снаряд в стволе. Преимущества данной технологии заключается в увеличении плотности заряжания и массы метательного заряда, и, следовательно, в увеличении энергии метательного заряда. Использование данной технологии приводит к перераспределению энергии продуктов сгорания в заснарядном пространстве. В данной работе проведено исследование возможности повышения дульной скорости снаряда при сохранении максимального давления за счет использования новых пастообразных топлив в условиях 30-миллиметровой баллистической установки. Проведено сравнение по баллистическим параметрам выстрела классической схемы заряжания и схемы с высокоплотными топливами в качестве ПЗ. При помощи математической модели произведена оценка предельных возможностей схемы заряжания с ПЗ состоящего из трех видов высокоплотных топлив в условиях модельной 30-миллиметровой баллистической системы.

# ESTIMATION OF ULTIMATE MODEL BALLISTIC INSTALLATION CAPABILITIES USING HIGH-DENSITY PROPELLANTS

**K. Rogaev, A. Ishchenko, V. Kasimov, V. Burkin,  
A. Diachkovskiy, A. Sidorov, E. Stepanov**

National research Tomsk State University, Russian Federation  
rogaev@ftf.tsu.ru

**Keywords:** propellants combustion, high-density propellants, barrel systems, gas dynamics, internal ballistics, travelling charge.

**Abstract:** In accordance with the early works of the authors, the modernization of the propellant charge is possible using propellant like a traveling charge (TC) pushing a projectile in the barrel. The advantages of this technology are increasing the loading density and propellant mass, and therefore to increase the energy of the propellant. The use of this technology leads to the redistribution of the combustion products' energy in the space behind the projectile. In this work, it was studied the possibility of increasing the muzzle velocity of the projectile, while maintaining the maximum pressure by the use of new pasty propellants, in a 30-mm Ballistic installation. A comparison of the ballistic parameters for the classical shot scheme and scheme with high-density propellants as TC was made. Using the mathematical model, the maximum capabilities of the loading scheme with TC consisting of three types of high-density propellants under the conditions of the model 30-mm ballistic system are estimated.

Разработка ствольных систем, основанных на новых физических принципах метания, является актуальной научной задачей [1, 2]. Перспективным направлением в данной области является применение схемы заряжания с присоединенным зарядом (ПЗ), состоящим из высокоплотных быстрогорящих топлив. Основная цель этого направления, с одной стороны, разработка топлив с требуемыми характеристиками, с другой – определение режимов эффективного применения ПЗ. Включение данных топлив в компоновку метательного заряда позволяет повысить среднюю плотность заряжания и общую энергетику метательного заряда. Горение высокоплотных топлив в режиме ПЗ приводит к перераспределению энергии продуктов сгорания в зарядном пространстве, что позволяет увеличить дульную скорость снаряда без повышения максимального давления на дно канала ствола. Наряду с перечисленными преимуществами появляется возможность использования реактивного подгона снаряда в канале ствольной установки. По оценкам, проведенным специалистами НИИ ПММ ТГУ, использование метательного заряда с включением ПЗ, при сохранении максимального давления на дно канала ствола может обеспечить прирост скорости снаряда, по сравнению с классической схемой выстрела, до 30 %.

В рамках данной работы проведена оценка предельных возможностей модельной баллистической установки с использованием ПЗ состоящего из

трех видов модельных высокоплотных топлив, при ограничении максимальных давлений по длине канала ствола.

В исследовании под высокоплотными топливами подразумеваются модельные топлива, размещаемые в стволе за снарядом, имеющие плотность более  $1.5 \text{ г/см}^3$  и твердое физическое состояние (моноблок). Моноблок горит по свободному торцу, его диаметр равен диаметру ствола.

В работе используется программный комплекс, разработанный сотрудниками НИИ ПММ ТГУ [3], в основе которого лежит математическая модель, базируемая на основных допущениях механики многофазных сред, и предусматривает наличие в метательном заряде произвольного количества фракций частиц, а также наличие в составе заряда моноблочных элементов, которые горят по своим законам и диспергируют на отдельные частицы дополнительной фракции.

Закон горения ПЗ определяется в математической модели как степенная зависимость от давления и выглядит следующим образом:

$$U_{\Gamma} = B_1 \cdot P^{\nu}, \quad (1)$$

где  $B_1$  – коэффициент в законе скорости горения;  $P$  – давление в газе на фронте горения;  $\nu$  – показатель степени.

Высокоплотные топлива воспламеняются позже порохового заряда. В качестве параметра начала горения моноблока в импульс давления на

фронте горения  $I_1 = \int_{t_0}^{t_1} P dt$  (импульс начала горения топлива). В реализо-

ванном программном комплексе для топлив используется обобщение зависимости (1), при этом послыное горение ПЗ стоит из произвольного числа стадий, каждая из которых горит по своему закону:

$$U_{\Gamma} = 0, \quad \text{при } I < I_1,$$

$$U_{\Gamma 1} = B_{11} \cdot P^{\nu}, \quad \text{при } I \geq I_1 - \text{закон горения топлива МВТ-1};$$

$$U_{\Gamma 2} = B_{12} \cdot P^{\nu}, \quad \text{при } I \geq I_1 \text{ и } m_{\text{МВТ-1}} = 0 - \text{закон горения топлива МВТ-2};$$

$$U_{\Gamma 3} = B_{13} \cdot P^{\nu}, \quad \text{при } I \geq I_1 \text{ и } m_{\text{МВТ-2}} = 0 - \text{закон горения топлива МВТ-3}.$$

В качестве модельной баллистической установки в работе рассматривается ствольная установка калибром 30 мм, длиной ствола 3 м и камерой заряжания  $371 \text{ см}^3$ . В качестве основного метательного заряда располагаемого в камере заряжания используется зерненный семиканальный порох. В качестве ограничения использована эпюра допустимых значений максимального давления для ствола-моноблока [4]. Расчетным образом произведено моделирование выстрела с использованием классической схемы заряжания (рис. 1).

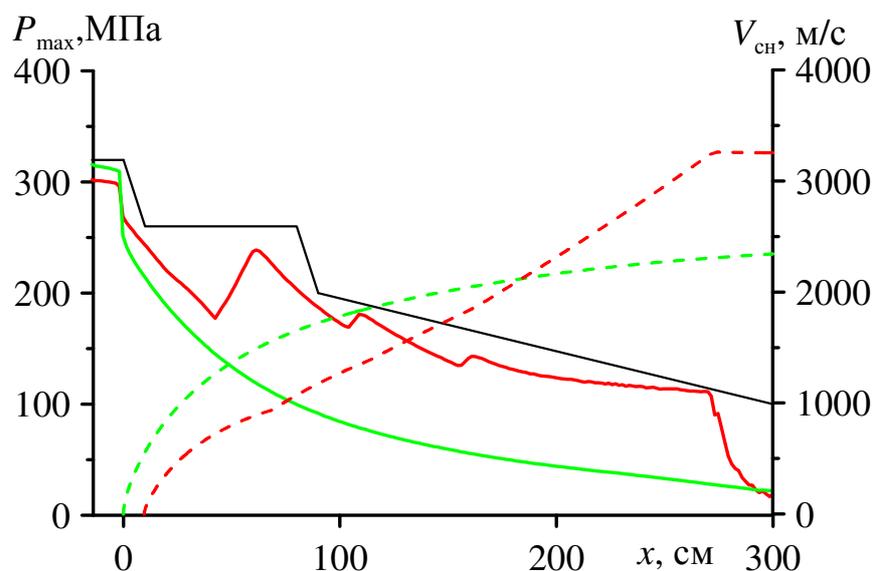


Рис. 1. Эпюры максимальных давлений и скорость снаряда по длине ствола: — — — — скорость снаряда; — — — — эпюра давления; — — — — классическая схема заряжания; — — — — схема заряжания с ПЗ; — — — — эпюра допустимого давления

Для оценки предельных возможностей модельной баллистической установки с использованием ПЗ, состоящего из трех видов модельных высокоплотных топлив, при ограничении максимальных давлений по длине канала ствола проведено теоретическое параметрическое исследование, в ходе которого были определены следующие параметры:  $I_1$ ,  $B_{11}$ ,  $B_{12}$ ,  $B_{11}$ . Определенные параметры позволяют получить наибольший прирост дульной скорости до 39 %, в сравнении с классической схемой заряжания при сохранении максимального давления на дно канала ствола и без превышения эпюры допустимых давлений по длине ствола. Данные параметры могут быть использованы для формулировки рекомендаций по модернизации высокоплотных топлив используемых в качестве ПЗ [5].

Результаты проведенной работы позволили провести оценку предельных возможностей модельной установки с использованием высокоплотных топлив, а также сформировать рекомендации по модернизации высокоплотных топлив для получения большего прироста дульной энергии снаряда.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-00028).

### Литература

1. Ikuta K Two stage travelling charge accelerator for high velocity // SciTechnol Energy. 2004. Вып. 65. №1. С. 25–27.
2. 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.

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. Орлов Б.В., Ларман Э.К., Маликов В.Г. Устройство и проектирование стволов артиллерийских орудий. М.: Машиностроение, 1976. 432 с.

5. Rogaev K., Ishchenko A., Burkin V., Kasimov V., Diachkovskii A., Samorokova N., Zyкова A. Rifleshotupgradingbyusingmodelpaste-like propellant // AIP Conference Proceedings Proceedings of the X All-Russian Conference "Fundamental and Applied Problems of Modern Mechanics", FAPMM 2018. 2019. С. 020014-1–020014-6.

## References

1. Ikuta K. Two stage travelling charge accelerator for high velocity. *SciTechnol Energy*. 2004. Vol. 65, No. 1. Pp. 25–27.

2. 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. Pp. 051002-1–051002-6.

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. Orlov B.V., Larman E.K., Malikov V.G. Arrangement and design of artillery barrels. *Moscow: Mechanical engineering*. 1976. 432 p. (Rus.).

5. Rogaev K., Ishchenko A., Burkin V., Kasimov V., Diachkovskii A., Samorokova N., Zyкова A. Rifleshotupgradingbyusingmodelpaste-like propellant. AIP Conference Proceedings Proceedings of the X All-Russian Conference Fundamental and Applied Problems of Modern Mechanics, FAPMM 2018. 2019. Pp. 020014-1–020014-6.

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ И ТЕПЛООБМЕНА НА СТРУКТУРУ ТЕЧЕНИЯ В ТРАКТЕ МОДЕЛЬНОГО ПРЯМОТОЧНОГО ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Н.П. Скибина, В.В. Фарапонов, Е.А. Маслов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
uss.skibina@gmail.com

**Ключевые слова:** математическое моделирование, сверхзвуковые течения, гиперзвуковые течения, прямоточный воздушно-реактивный двигатель, экспериментальное исследование.

**Аннотация.** В работе представлено численное исследование влияния турбулентности и процесса теплообмена на структуру течения в проточном тракте осесимметричной модели прямоточного воздушно-реактивного двигателя. Скорость внешнего потока, набегающего на модель, принимала значения, соответствующие числам Маха  $M = 5$  и  $M = 6$ . Начальные и граничные условия для численного решения поставленной задачи выбирались в соответствии с проведенными ранее аэродинамическими испытаниями.

Рассмотрены различные комбинации граничных условий на поверхности модели, турбулентный и ламинарный режим течения в набегающем потоке газа. Проведено качественное и количественное сравнение результатов решения каждой задачи с экспериментальными данными. Проанализировано влияние турбулентности и теплообмена на формирование отрывов потока в воздухозаборной части модели и ударно-волновые структуры в проточном тракте рассматриваемого двигателя.

## NUMERICAL INVESTIGATION TURBULENCE AND HEAT TRANSFER PROCESS EFFECTS ON THE FLOW STRUCTURE IN THE WORKING DUCT OF RAMJET ENGINE

N. Skibina, V. Faraponov, E. Maslov

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

**Keywords:** mathematical modelling, supersonic flows, hypersonic flows, ramjet engine, experimental measurements.

**Abstract.** In the paper presents numerical investigation of turbulence and heat transfer process effects on the flow structure in working duct of an axisymmetric model of ramjet engine. The oncoming free stream velocity around model assumed values corresponding to the Mach numbers  $M = 5$  and  $M = 6$ . The initial and boundary conditions for the numerical solution of the problem were chosen in accordance with the previously performed aerodynamic tests.

Various combinations of boundary conditions on the surface of the ramjet model, cases flow around in turbulent and the laminar regimes in an oncoming gas stream are considered. Qualitative and quantitative comparison of the results of numerical solving for each case with experimental data was carried out. The effect of turbulence and heat transfer on the appear of shock stall in the air intake part of the model and the of shock wave structures in working duct the engine under consideration are analyzed.

Прямоточные воздушно-реактивные двигатели (ПВРД) рассматриваются в качестве перспективных силовых установок для гиперзвуковых летательных аппаратов. Основной особенностью двигателей данного типа является отсутствие на борту транспортного средства емкостей с окислителем, что положительным образом сказывается на массово-габаритных характеристиках. Большую практическую значимость носит изучение течения газа в камере сгорания ПВРД, а именно: его структуры, распределения газодинамических параметров на стенках и в потоке, взаимного влияния протекающих процессов.

Целью данной работы является численное исследование влияния характера течения и процесса теплообмена на структуру потока в проточном тракте осесимметричной модели прямоточного воздушно-реактивного двигателя. Рассматривались скорости набегающего потока в числах Маха  $M = 5$  и  $M = 6$ .

Среди поставленных задач можно выделить.

1. Математическое моделирование реальных аэродинамических испытаний с использованием ранее разработанного подхода [1] к изучению обтекания тел, размещенных в рабочей части используемой экспериментальной установки [2].

2. Получение полей плотности, скорости (в числах Маха), давления и температуры.

3. Сравнение результатов численных расчетов с экспериментальными данными.

4. Анализ влияния теплообмена и характера набегающего потока на структуру и параметры течения в воздухозаборном устройстве и проточном тракте двигателя.

В рамках использования методики, предложенной в работе [1], численное решение задачи обтекания модели прямого воздушного реактивного двигателя сводится к классической задаче внешнего обтекания [3] 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. 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  $T = 293.15$  К,  $P = 101325$  Па.

По результатам проверки сеточной сходимости для проведения серии расчетов была выбрана сетка с числом элементов  $1.2 \cdot 10^6$ . Решение задачи производилось методом конечных объемов в вычислительном комплексе Ansys Fluent [4].

В рамках численного исследования рассмотрены следующие случаи.

1. Обтекание теплоизолированной модели (отсутствуют тепловые потоки через поверхность модели) турбулентным потоком.

2. Обтекание с учетом сопряженного процесса теплообмена между корпусом модели и турбулентным набегающим потоком газа.

3. Обтекание с учетом процесса теплообмена между корпусом модели и ламинарным набегающим потоком газа.

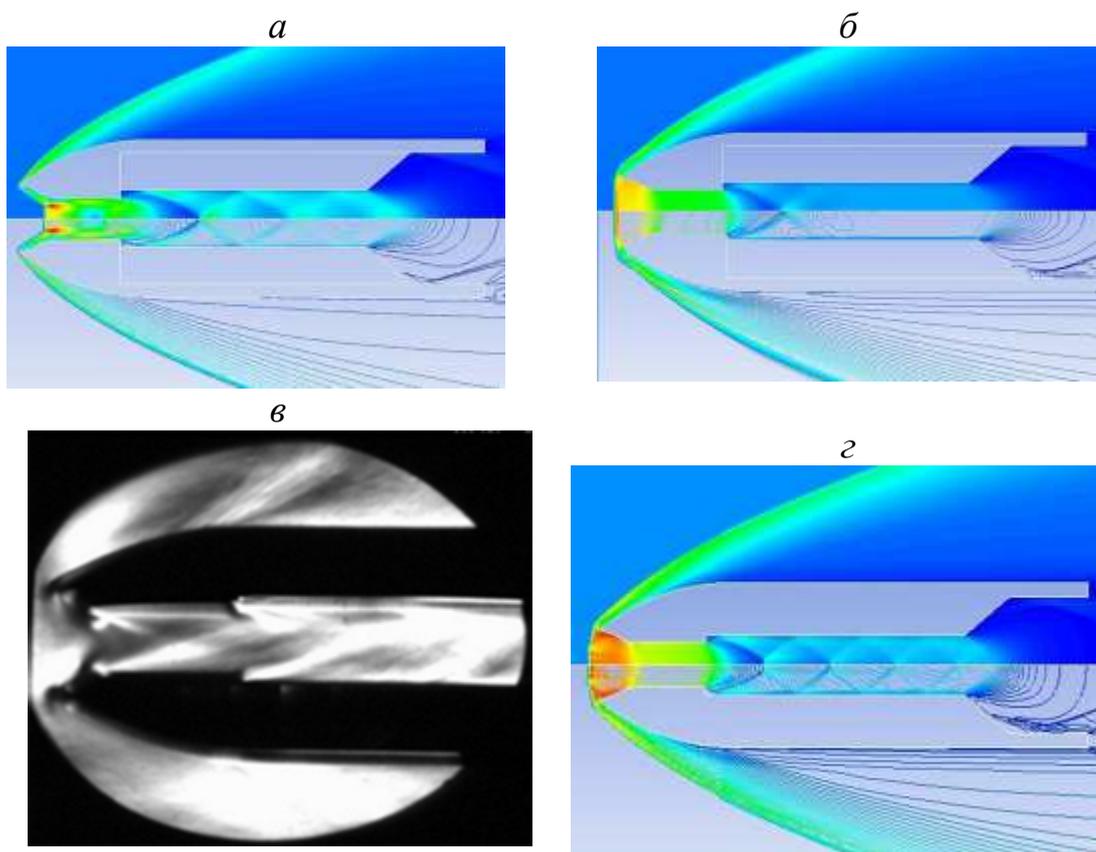


Рис. 1. Поля плотности:  
*а* – фрагмент видеоряда теневой визуализации обтекания модели (скорость потока  $M = 5$ ); *б* – случай обтекания теплоизолированной модели;  
*в* – обтекания теплопроводной модели турбулентным потоком;  
*г* – обтекание теплопроводной модели ламинарным потоком

Для качественного сравнения результатов решения с результатами эксперимента были рассмотрены и проанализированы полученные поля плотности (рис. 1).

Максимальное совпадение между результатами эксперимента и расчета получено для случая обтекания модели турбулентным потоком, когда при решении учитывается сопряженный процесс теплообмена (рис. 1, в). В данном случае при рассмотрении векторных полей скорости выявлено наличие зон отрывного течения в воздухозаборной части модели, которые отсутствуют в случае обтекания теплоизолированной модели (рис. 1, б) и при обтекании теплопроводной модели в ламинарном режиме (рис. 1, г). Изменяется также структура течения в проточном тракте двигателя: на рис. 1, б отчетливо видна серия скачков уплотнения, форма и количество которых отличаются от полученной экспериментально структуры потока (рис. 1, а). При ламинарном обтекании (рис. 1, г) скачки по длине проточного тракта отсутствуют. При этом относительное рассогласование между расчетом и экспериментом по величине скорости в точке за уступом в канале составило от 2 до 6%.

Проведен анализ влияния турбулентного характера течения и сопряженного теплообмена на структуру потока рабочего газа в проточном тракте ПВРД 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 [5].

Таким образом, турбулентный характер течения и процесс теплообмена влияют на изменения, происходящие в пограничном слое на стенке внутреннего осесимметричного канала, и влияют на формирование «особых» зон течения газа. Также при турбулентном характере течения в набегающем потоке нагрева головной части идет на 35% интенсивнее, чем при ламинарном режиме течения.

### Литература

1. Скибина Н.П., Савкина Н.В., Фарапонов В.В., Маслов Е.А. Комплексный подход к решению задачи высокоскоростного обтекания тела в импульсной аэродинамической установке и проверка согласованности полученных результатов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2019. №. 59. С. 118–129. DOI: 10.17223/19988621/59/12.
2. Звезинцев В.И. Газодинамические установки кратковременного действия. Ч. I. Установки для научных исследований. Новосибирск: Параллель, 2014. 551 с.
3. 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. гос. ун-та, 2019. 134 с. (Труды Томского государственного университета. Серия физико-математическая, Т. 303). DOI: 10.17223. 978-5-7511-2582-0/2.
4. 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).
5. Чжен П., Голубинский А.И. Отрывные течения / пер. с англ. Т. 1. М.: Мир, 1972.

### References

1. Skibina N.P., Savkina N.V., Faraponov V.V., Maslov E.A. An integrated approach to solving the problem of high-speed flow around a body in a pulsed aerodynamic facility and validation of the obtained results. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 59. Pp. 118–129. DOI: 10.17223/19988621/59/12.
2. Zvegintsev V.I. Gas dynamic installation of short duration. Part I. Installations for scientific research. - Novosibirsk: Parallel, 2014. 551 s.
3. 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 in-

jection into the boundary layer // Works of Tomsk State University / Physical and Mathematical Series. 2019. Т 78 Vol. 303: Current Issues of Continuum Mechanics and Celestial Mechanics / ed. by M. Orlov. Tomsk: Tomsk State University Publishig House. Pp. 24–33. DOI: 10.17223.978-5-7511-2582-0/2.

4. *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 Bauman. Seriya «Estestvennye nauki». 2014. №. 1 (52).

5. *Chang P.K.* Separation of flow. Elsevier, 2014.

## ВОПРОС О СТАБИЛИЗАЦИИ ДАВЛЕНИЯ ФОРСИРОВАНИЯ ПРИ ВЫСТРЕЛЕ

**М.С. Хребтова, А.В. Гуськов, К.Е. Милевский**

Новосибирский государственный технический университет, Россия  
maria.khrebtova@yandex.ru

**Ключевые слова:** ведущий поясок нового типа, давление форсирования, стабилизация.

**Аннотация.** Представлены результаты расчетной оценки затрат энергии на врезание ведущего пояска в нарезы канала ствола при выстреле. Показано, что переход к конструкции ведущего пояска нового типа обеспечивает уменьшение указанных затрат энергии практически вдвое, что приводит к стабилизации давления форсирования при выстреле и, как следствие, к уменьшению рассеивания боеприпаса.

## THE FORCING PRESSURE STABILIZATION DURING SHOT

**M. Khrebtova, A. Guskov, K. Milevsky**

Novosibirsk State Technical Univercity, Russian Federation  
maria.khrebtova@yandex.ru

**Keywords:** a new type of leading belt, forcing pressure, stabilization.

**Abstract.** The paper presents results of the energy expenditures evaluation for cutting the leading belt in barrel channel grooves during shooting are presented. It is shown that the artillery shell with a new type of leading belt provides a reduction of the indicated energy expenditures by almost half, which leads to stabilization of the boost pressure during shot and, as a result, to an ammunition dispersion reduction.

Поиск способов повышения технических характеристик (точность, дальность и т.д.) артиллерийского снаряда (АС) при уменьшении его стоимости – одна из актуальных задач проектирования. Возможным решением является изменение конструкции ведущего пояска (ВП).

Влияние конструкции ВП на протекающие при выстреле процессы заключается в том, что часть энергии пороховых газов, затрачиваемая на врезание боеприпаса в нарезы канала ствола (КС), изменяется в зависимости от материала, формы, размеров ВП и допусков (диаметр ВП, ширина ВП и т.д.) [1]. С одной стороны, эта часть энергии расходуется на формирование необходимого профиля ведущего пояска, то есть пластическую деформацию материала ВП, для обеспечения ведения по нарезам канала ствола, а с другой стороны – на создание необходимого давления форсирования пороховыми газами в момент завершения формирования профиля ВП, то есть наибольшего импульса, обеспечивающего максимальный разгон снаряда [2, 3].

Конструкции ВП с рассеиванием геометрических параметров ВП в пределах допуска влияют на изменение количества этой части энергии, что сказывается на рассеивании скорости снаряда от выстрела к выстрелу.

Таким образом, управляя конструкцией ВП, можно обеспечить минимизацию рассеивания величины давления форсирования при выстреле, тем самым повышая точность стрельбы (кучность).

Целью работы является оценка влияния конструкции ВП на затраты части энергии пороховых газов при формировании профиля ВП в канале ствола. Это достигается путем установления того, насколько изменится диапазон расхода энергии, затрачиваемой на продавливание ВП в канале ствола для двух конструкций: типового ведущего пояска и ВП нового типа, который имеет вид нескольких кольцевых выступов.

В соответствии с изложенной в [4, 5] методикой, была рассчитана зависимость контактных напряжений в ВП типовой формы от координаты сечения  $x$  для большого наклепа материала. Расчеты показали, что количество энергии, затрачиваемой на деформацию ВП, соответствует интегралу по кривой зависимости контактных напряжений от координаты сечения  $x$ . Получено, что если для типового ВП энергия составляет  $X$  Дж, то для ведущего пояска нового типа из того же материала – около  $0.46X$  Дж.

В соответствии с расчетами энергии, затрачиваемой на деформацию ведущих поясков с учетом допуска, можно сделать следующие выводы.

Для ВП штатного вида в канале ствола с 2% нарезкой энергия изменяется в пределах от  $X$  до  $1.02X$  (2%). В то время как для ВП нового типа в районе –  $0.46X$  до  $0.47X$  (1%) от общей энергии пороховых газов. Для штатного ВП, в канале ствола с 1% нарезкой от калибра боеприпаса, значения будет изменяться в районе –  $X$  до  $1.01X$  (1%), у ВП нового типа в пределах от  $0.463X$  до  $0.468X$  (0,5%).

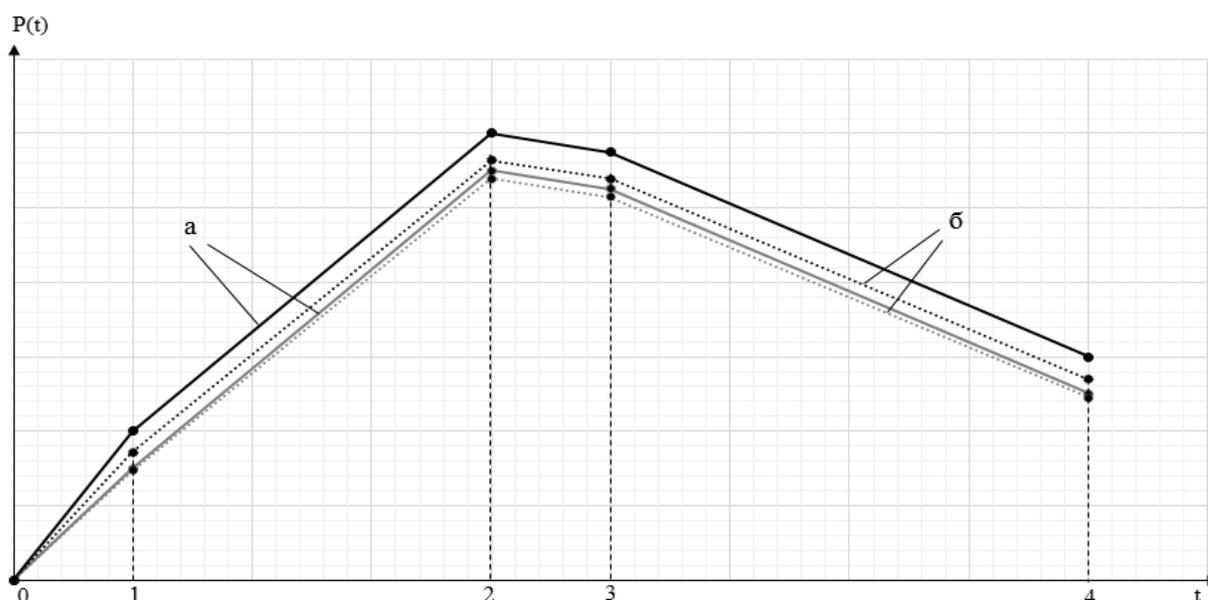


Рис. 1. Изменение давления  $P$  в канале ствола при выстреле в зависимости от времени  $t$ :

$0$  – начало горения заряда;  $1$  – начало движения снаряда;  $2$  – достижение максимума давления;  $3$  – окончание горения пороха;  $4$  – момент вылета из канала ствола;  
 $a$  – типовой ВП;  $b$  – ВП нового типа

Изменение давления в канале ствола при выстреле с учетом влияния допусков на диаметральные размеры ВП в зависимости от времени представлено на рис. 1. Для каждого из типов ведущего пояска (типовой «а» и нового типа «б») представлен диапазон изменения давления ограниченный двумя кривыми изменения давления, соответствующие давлениям, возникающим при максимальных (максимальный допуск на изготовление) диаметральным размерам ВП и при минимальных (минимальный допуск на изготовление). Каждая из кривых имеет несколько опорных точек: начала движения снаряда (1), достижения максимума давления (2), окончания горения пороха (3) и момент вылета (4). За давление форсирования принимается давление в точке начала движения снаряда.

При варьировании диаметральным размерам ВП возникающие в канале ствола давления будут изменяться соответственно. Так, оценка [5] показала, что для типового ВП значения изменяются от  $X$  (минимальные диаметральные размеры ВП) до  $1.13X$  (максимальные диаметральные размеры ВП) – 13% разброс, а для ВП нового типа – от  $0.98X$  до  $1.04X$  – 6.5% разброс.

Таким образом, переход к конструкции нового типа обеспечивает меньшее рассеивание энергии при выстреле и тем самым повышает кучность.

В ходе проведенной работы было определено влияние конструкции ВП на процессы, протекающие при выстреле, проведено сравнение по усилию формирования боевых выступов. Исследовано воздействие допуска диа-

метра ВП на изменение величины форсирования и на затраты энергии при врезании боеприпаса в нарезы КС.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке ВП и подборе таких геометрических характеристик кольцевых выступов ВП нового типа, чтобы обеспечить наименьшее воздействие на разброс величины форсирования при выстреле, и, как следствие, на давление в канале ствола, а также дульную скорость.

### Литература

1. *Селиванов В.В.* (общ. ред.) Средства поражения и боеприпасы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 982 с.
2. *Капустин А.И.* Передовая технология и новые материалы в производстве боеприпасов. Боеприпасы, 1989, №1. С. 69–74.
3. *Барашков В.Н.* Численное моделирование напряженно-деформированного состояния ведущих устройств метаемых сборок / В.Н. Барашков // Теоретическое и экспериментальное исследование высокоскоростного взаимодействия тел; под ред. А.В. Герасимова. Томск: Том. гос. ун-т, 2007. С. 484–567.
4. *Ермолаев С.И.* Внешняя баллистика / С.И. Ермолаев, Л.Б. Комаров, Е.В. Чурбанов. Л.: Военно-морская академия кораблестроения и вооружения им. Крылова, 1958. 718 с.
5. *Хребтова М. С.* Конструкция и материал ведущего пояса и их влияние на величину давления форсирования при выстреле / М.С. Хребтова, А.В. Гуськов, К.Е. Милевский, А.В. Гуськов // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 9 ч., Новосибирск, 2–6 дек. 2019 г. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. Ч. 9. С. 318–321.
6. *Балаганский И.А.* Экспериментально-теоретические исследования быстропротекающих процессов / И.А. Балаганский, Л.А. Мерзжиевский, А.В. Гуськов, К.Е. Милевский, В.В. Андреев, Ю.О. Поляков, А.В. Виноградов. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. 262 с. ISBN 978-5-7782-2897-9

### References

1. *Selivanov V.V.* (commonly. Ed.) Means of destruction and ammunition / M.: Publishing House of MSTU. N.E. Bauman, 2008. 982 s.
2. *Kapustin A.I.* Advanced technology and new materials in the production of ammunition. - Ammunition, 1989, No. 1. Pp. 69–74.
3. *Barashkov V.N.* Numerical modeling of the stress-strain state of the leading devices of the missile assemblies / V.N. Barashkov // Theoretical and experimental study of high-speed interaction of bodies; under the editorship of A.V. Gerasimov. Tomsk: Tom. State Univ., 2007. S. 484–567.
4. *Balagansky I.A.* Experimental and theoretical research of fast processes / I.A. Balagansky, L.A. Merzhievsky, A.V. Guskov, K.E. Milevsky, V.V. Andreev, Yu.O. Polyakov Vinogradov A.V. Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2016. 262 Pp. ISBN 978-5-7782-2897-9
5. *Ermolaev S.I.* External ballistics / S.I. Ermolaev, L.B. Komarov, E.V. Churbanov. L.: Naval Academy of Shipbuilding and Arms Krylova, 1958. 718 p.
6. *Khrebtova M. S.* Design and material of the driving belt and their influence on the magnitude of the boost pressure during firing / M.S. Khrebtova, A.V. Guskov, K.E. Milevsky; scientific hands. A.V. Guskov // Science. Technology. Innovation: Sat scientific papers: No-

## **НЕКОТОРЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ДВИЖЕНИЮ ИНЕРТНЫХ УДАРНИКОВ В ВОДЕ**

**А.В. Чупашев, А.Н. Ищенко, В.В. Буркин, А.С. Дьячковский**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
ChupashevAV@Gmail.com

**Ключевые слова:** движение в воде, ударник, гидробаллистическая трасса, суперкавитация, сила сопротивления.

**Аннотация.** Движению в воде при скоростях, превышающих сотни метров в секунду, сопутствует явление суперкавитации, позволяющее значительно уменьшить тормозящее воздействие, оказываемое со стороны воды на тело путем уменьшения поверхности взаимодействия. В работе представлены некоторые экспериментальные результаты по изучению движения инертных ударников с разной массой и геометрией под водой в широком диапазоне скоростей. Приводится сравнение полученных результатов с расчетом.

## **SOME EXPERIMENTAL RESULTS ON THE MOTION OF INERT STRIKERS IN WATER**

**A. Chupashev, A. Ischenko, V. Burkin, A. Diachkovskiy**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
ChupashevAV@Gmail.com

**Keywords:** moving in water, inert striker, hydroballistic track, supercavity, drag force.

**Abstract.** Moving in water at speeds are exceeded of hundreds meters per second are accompanied with supercavity phenomena, which allows extremely decrease drag force influence from water side via interaction area decreasing. In this work some experimental results on movement of inertial projectiles investigation with various masses and geometries under water in wide velocity range are shown. A comparing of obtained data with calculations is considered.

В ходе экспериментальных работ [1] по изучению особенностей движения ударников в суперкавитационном режиме обтекания и сопутствующих этому процессу явлений, производятся измерения различных параметров, характеризующих процесс, в том числе и скорость ударников по мере их перемещения в толще воды.

При движении в суперкавитационном режиме обтекания характерно наличие газопаровой полости, внутри которой движется ударник, время от

времени задевая границы полости. Таким образом, основное тормозящее воздействие со стороны воды сосредотачивается на носу ударника (кавитатор) и в местах касания корпусом ударника внутренних стенок каверны [2, 3].

Работы производились на гидробаллистической трассе НИИ ПММ ТГУ [4]. Ударники изготавливались в виде усеченных конусов из стали или сплава вольфрам–никель–железо (ВНЖ) и имели массу 11–151 г при длине 85–185 мм. Метание производилось в диапазоне скоростей  $V_0 = 342 \dots 1093.6$  м/с.

В табл. 1 показаны основные характеристики ударников и начальные скорости их метания:  $V_0$  – начальная скорость ударника в воде;  $m$  – масса ударника;  $D_n$  – диаметр кавитатора ударника.

*Таблица 1. Начальная скорость движения и характеристики ударников*

$V_0$ , м/с	342.1	593.6	1087.0	1093.6
$m$ , г	11.38	150.86	55.96	53.70
$D_n$ , мм	2.00	3.17	1.98	2.95

Для прогнозирования изменения скорости ударника по ходу траектории требуется определить тормозящее воздействие водной среды. При расчете силы сопротивления движению ударника со стороны воды, трением в результате глиссирования корпуса ударника по внутренней поверхности каверны было решено пренебречь, учитывалась только площадь кавитатора ударника. Сила сопротивления рассчитывалась по формуле [2]:

$$W = C_x S_n \frac{\rho V^2}{2},$$

где  $S_n$  – площадь кавитатора;  $\rho$  – плотность воды;  $V$  – скорость ударника,  $C_x$  – коэффициент сопротивления. При движении с большими скоростями на малых глубинах, коэффициент сопротивления принимался  $C_x \approx 0.82$  [2].

На *рис. 1* представлены экспериментальные и расчетные зависимости скорости ударника от пройденного пути в воде. Символы соответствуют экспериментальным значениям скорости ударника в соответствующем месте на траектории. Для каждого эксперимента пунктиром приведен расчет на основе параметров ударника из табл. 1. Кружки соответствуют диаметру кавитатора 3 мм, ромбами показаны скорости для ударников с кавитатором 2 мм.

Начальная скорость ударников определялась на выходе из ускорителя датчиком дульной скорости с относительной погрешностью не более 1 %, последующие по ходу траектории значения скорости определялись с применением высокоскоростной видеорегистрации, величина относительной

погрешности в опытах находилась в диапазоне 2–3 %. Величина озвученных погрешностей на графике не превышает размеры символов.

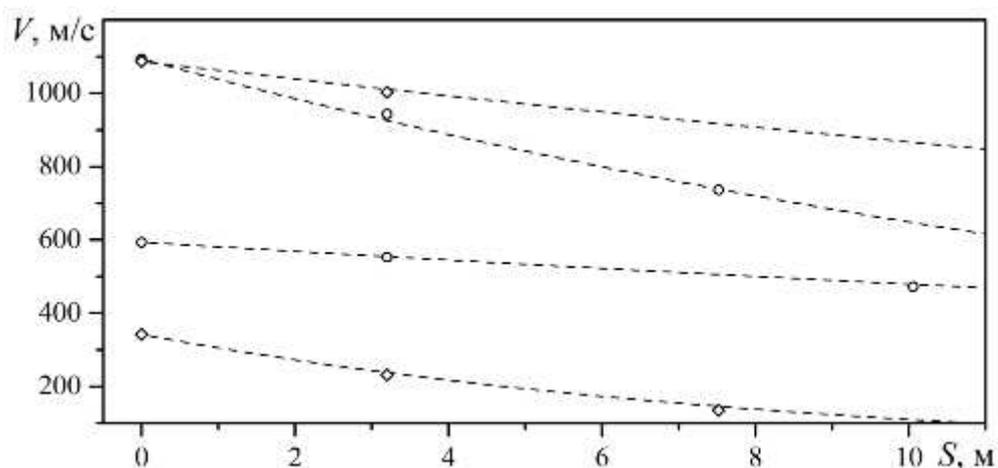


Рис. 1. Зависимость скорости ударников от пройденного пути в воде

На графике наблюдается хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных на различных участках траектории: максимальное отклонение экспериментальной скорости от расчета не превысило 3%.

Для рассматриваемого типа ударников на дистанции порядка 10 м получается, что трение, возникающее за счет глиссирования корпуса о внутреннюю поверхность каверны, не оказывает выраженного воздействия на скорость, и его влиянием можно пренебречь с целью упрощения и ускорения производимых расчетов.

В статье использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта № 9.9036.2017/8.9 в рамках государственного задания Минобрнауки России.

### Литература

1. Буркин В.В., Акиншин Р.Н., Афанасьева С.А., Борисенков И.Л., Ищенко А.Н., Хабидуллин М.В., Чупашев А.В., Югов Н.Т. Особенности высокоскоростного проникания и движения суперкавитирующих кинетических ударников в воде. 2018. Т. 91, №3. С. 701–708.
2. Логвинович Г.В. Гидродинамика течений со свободными границами. Киев: Наук. думка, 1969. 208 с.
3. Савченко Ю.Н., Семенко В.Н., Путилин С.И. Нестационарные процессы при суперкавитационном движении тел // Прикладная гидромеханика. 1999. Т. 1 (73), № 1. С. 79–97.
4. Буркин В. В., Ищенко А.Н. Майстренко И.В., Фуфачев В.М., Дьячковский А.С., Бураков В.А., Корольков Л.В., Степанов Е.Ю., Чупашев А.В., Робаев К.С., Саммель А.Ю., Сидоров А.Д. // Гидробаллистический стенд. Патент на изобретение. Заявка № 2017135871 от 09.10.2017.

## References

1. *Burkin V.V., Akinshin R.N., Afanas'eva S.A., Borisenkov I.L., Ishchenko A.N., Khabibullin M.V., Chupashev A.V., and Yugov N.T.* Features of high-velocity penetration and motion of supercavitating kinetic strikers in water. On the effect of elastic compressibility and hardening of the material on the solution of the elasticplastic problem for a thick-walled pipe under the action of internal or external pressure. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics* 2018, Vol. 91, No. 3. Pp. 655–662.
2. *Logvinovich G.V.* in *Hydrodynamics of free-boundary flows* (“Naukova Dumka”, 1969), p. 128. (Rus.)
3. *Savchenko Yu., Semenenko V., Putilin S.* Non-stationary processes in supercavitational motion of bodies. *Applied hydromechanics*. Vol. 1, 1 (73). Pp. 79–97. (Rus.)
4. *Burkin V.V., Ischenko A.N., Maistrenko I.V., Fufachev V.M., Diachkovskiy A.S., Burakov V.A., Korolkov L.V., Stepanov E.Y., Chupashev A.V., Rogaev K.S., Sammel A.Y., Sidorov A.D.*, RU Patent “Hydroballistic track”, request № 2017135871 from 09.10.2017. (Rus.)

## **Секция 4**

### **Баллистика и Небесная механика**

#### Подсекция 4.1 Небесная механика

Председатель:

к.ф.-м.н., Т.Ю. Галушина

Космический мусор и кометы,  
Динамика околоземных объектов,  
Вековые резонансы,  
MEGNO-анализ

## **Session 4**

### **Ballistics and celestial mechanics**

#### Subsection 4.1 Celestial mechanics

Chair:

Ph.D., Tatiana Galushina

Space debris  
Near-Earth object dynamics  
MEGNO analysis  
Astronomy, Observations and Techniques



## Подсекция 4.2 НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА

### ПОИСК ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ И ОЦЕНКА СКРЫТОЙ ЭНЕРГИИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩЕЙ РАСШИРЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ

**М.В. Астафурова**

НИУ «Высшая школа экономики», Россия  
astafurova.maria@mail.ru

**Ключевые слова:** Вселенная, пространство, расширение Вселенной, энергия расширения, физический вакуум, пространственно-электромагнитная модель.

**Аннотация:** В основу исследования положена пространственно-электромагнитная модель физического вакуума. На основе данной модели определены составляющие внутренней энергии элементарной ячейки физического вакуума, установлены аналитические выражения для каждой из этих составляющих и проведен расчет их численных значений. Одна из составляющих энергии физического вакуума обусловлена свойством материи, которое мы называем пространством или протяженностью. Эта энергетическая составляющая является источником сил, направленных на расширение пространства Вселенной.

### SEARCHING FOR THE PHYSICAL NATURE AND EVALUATING THE HIDDEN ENERGY THAT DETERMINES THE EXPANSION OF THE UNIVERSE

**M. Astafurova**

Higher School of Economics, Moscow, Russian Federation  
astafurova.maria@mail.ru

**Keywords:** Universe, space, universe expansion, expansion energy, physical vacuum, spatial-electromagnetic model.

**Abstract.** The study is based on the spatial-electromagnetic model of the physical vacuum. Based on this model, the components of the internal energy of the unit cell of the physical vacuum are determined. Analytical expressions for each of these components are established and their numerical values are calculated. One of the components of the energy of the physical vacuum is due to the property of matter, which we call space. This energy component is a source of forces aimed at expanding the space of the Universe.

**Введение.** В настоящее время существует ряд научных проблем, не поддающихся решению на основе принятых теоретических представлений. К таким проблемам относится, в частности, физическая природа энергии, определяющей расширение пространства Вселенной.

С точки зрения современных теоретических представлений континуум Вселенной рассматривается как материальный пространственно-

временной континуум. Данное рассмотрение составляет концептуальный базис общей теории относительности (ОТО), которая является теоретической основой современной космологии [1]. Согласно ОТО гравитационные эффекты связаны с кривизной пространственно-временного континуума [2]. Тензор массы в уравнениях ОТО обуславливает вокруг физического объекта определенную геометрию пространства-времени. Поскольку распределение масс в объеме Вселенной неизвестно, при расчетах пренебрегают фактом локализации материальных тел и считают вещество Вселенной равномерно распределенным по всему объему.

Построенная А. Эйнштейном первоначальная модель Вселенной описывала ее как статическую и неизменную физическую систему. Для обеспечения стационарности модели в уравнения ОТО была введена особая космологическая константа, которая компенсировала всемирное тяготение массы вещества, то есть обеспечивала существование сил антигравитации. Однако в 1922 г. российский математик и физик А.А. Фридман показал, что Вселенная не может быть стационарной и должна либо сжиматься, либо расширяться [3]. В 1929 г. американский астроном Э. Хаббл опубликовал данные астрономических наблюдений, свидетельствующие о расширении Вселенной. Поскольку экспериментальные данные показывали, что Вселенная не является стационарной системой, Эйнштейн отказался от космологической константы и назвал ее введение в уравнения ОТО досадным промахом.

Однако встал вопрос о природе сил, определяющих расширение Вселенной. В настоящее время принято считать, что материальный континуум Вселенной содержит, кроме вещества, скрытую «энергию физического вакуума», воздействие которой противоположно воздействию гравитации. Эта гипотетическая энергия генерирует силы, раздвигающие пространство Вселенной.

**Цель и задача работы:** Определение физической природы энергии расширения пространства Вселенной и оценка ее значения.

**Методология исследования.** Использование новой теоретической концепции, согласно которой материальный континуум Вселенной рассматривается как пространственно-электромагнитный континуум; логико-математический анализ экспериментальных данных и выполнение теоретических расчетов на основе пространственно-электромагнитной модели физического вакуума [4].

*Описание используемой модели.* Физический мир рассматривается как пространственно-электромагнитный волновой континуум и как совокупность волновых объектов (осцилляторов). Вещество и физический вакуум – взаимосвязанные формы этого континуума. Наименьший («абсолютный») осциллятор является элементарной ячейкой физического вакуума. Физический вакуум представлен в модели как волновой векторный континуум. Свойства физического вакуума характеризуют электромагнитный

(**Q**) и пространственный (**R**) векторы. Число составляющих вектора **R** ( $f_R$ ) равно мерности наблюдаемого пространства ( $f_R = 3$ ). Число составляющих вектора **Q** ( $f_Q$ ) соответствует двум реально существующим видам электрических зарядов и магнитных полюсов ( $f_Q = 2$ ).

**Ход исследования и полученные результаты.**

*Внутренняя энергия абсолютного осциллятора.* Будем рассматривать абсолютный осциллятор как изолированную замкнутую систему. Внутренняя энергия этой системы ( $E_{abc}$ ) равна сумме энергий взаимодействия всех ее структурных компонентов:

$$E_{abc} = E_Q + E_{QR} + E_R, \quad (1)$$

где  $E_Q$ ,  $E_{QR}$ ,  $E_R$  – энергии взаимодействия соответственно: составляющих вектора **Q**; вектора **Q** с вектором **R**; составляющих вектора **R**.

*Энергия физического вакуума, определяющая расширение Вселенной.* Взаимодействие векторов **Q** и **R** и взаимодействие составляющих вектора **Q** порождает силы, направленные на сжатие абсолютного осциллятора. Взаимодействие составляющих вектора **R** порождает силы, направленные на расширение абсолютного осциллятора. В условиях изолированной замкнутой системы эти силы уравниваются друг друга.

Энергетическая составляющая  $E_R$  является источником сил, направленных на расширение абсолютного осциллятора. Следовательно, именно эта энергия, обусловленная свойствами пространства, является энергетическим источником расширения Вселенной.

*Аналитические выражения для составляющих внутренней энергии абсолютного осциллятора и оценка их численных значений.*

Будем рассматривать составляющие вектора **Q** как квазизаряды противоположного знака. Эти квазизаряды взаимосвязаны и находятся в состоянии непрерывного колебательного движения в пределах сферы радиусом  $R_{abc} = 2,135 \cdot 10^{-17}$  м (радиус элементарной ячейки физического вакуума).

Энергия взаимодействия этих квазизарядов равна работе по их полному разделению с образованием электрона и позитрона или, что эквивалентно, энергии аннигиляции электрона и позитрона ( $E_0$ ), то есть:

$$E_Q = E_0 = 2m_e c^2, \quad (2)$$

где  $m_e$  – масса электрона;  $c$  – скорость света.

Величина  $E_Q = 1,022$  МэВ.

Энергия взаимодействия векторов **Q** и **R** равна

$$E_{QR} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{2R_{abc}}. \quad (3)$$

где  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная;  $e$  – заряд электрона.

Величина  $E_{QR} = 33,723$  МэВ.

Из условия устойчивости абсолютного осциллятора с необходимостью следует, что

$$E_R = E_Q + E_{QR}. \quad (4)$$

То есть величина  $E_R = 34,745$  МэВ.

Физический принцип, на основе которого может быть получено аналитическое выражение для энергии  $E_R$ , неизвестен. Используем для построения искомого выражения метод аналогий. Примем в качестве рабочей гипотезы, что составляющие вектора  $\mathbf{R}$  являются носителями скрытой массы физического вакуума и напишем выражение для энергии  $E_R$  в виде

$$E_R = m_R \cdot v^2, \quad (5)$$

где  $m_R$  – скрытая масса;  $v$  – скорость распространения пространственных волн.

Источником пространственных волн является колебательное движение пространственной компоненты структуры физического вакуума (в случае абсолютного осциллятора – колебательное движение составляющих вектора  $\mathbf{R}$ ). Вопрос о численном значении величины  $v$  остается открытым. В отсутствие экспериментальных данных скорость распространения пространственных волн может быть условно принята равной скорости света.

Величину  $m_R$  можно рассматривать как минимальную скрытую массу физического вакуума. Полученное на основе пространственно-электромагнитной модели значение величины  $m_R$ , равное в единицах энергии  $34.745$  МэВ/ $c^2$ , совпадает со значением минимальной массы  $m_0 = 34.75$  МэВ/ $c^2$ , которое было рассчитано независимым методом на основе анализа спектра масс элементарных частиц [5]. Полученный результат можно рассматривать как доказательство того, что физическая природа массы покоя адронов взаимосвязана со свойствами пространства и им обусловлена.

**Заключение.** В ходе настоящего исследования, основанного на использовании новой теоретической модели, определены составляющие внутренней энергии физического вакуума, установлены аналитические выражения для каждой из этих составляющих и проведен расчет их численных значений. Одна из составляющих энергии физического вакуума обусловлена свойством материи, которое мы называем пространством. Именно эта

энергетическая составляющая является источником сил, направленных на расширение пространства Вселенной. Показано также, что со свойствами пространства взаимосвязана природа инертной массы.

### Литература

1. *Архангельская И.В., Розенталь И.Л., Чернин А.Д.* Космология и физический вакуум. М.: КомКнига, 2006. 216 с.
2. *Алексеев С.О., Памятных Е.А., Урсулов А.В., Третьякова Д.А., Ранну К.А.* Введение в общую теорию относительности, ее современное развитие и приложения. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 380 с.
3. *Фридман А.А.* Мир как пространство и время. 4-е изд. М.: Изд-во «ЛКИ», 2007. 112 с.
4. *Астафурова М.В., Добрецов С.Л., Астафуров В.И.* Пространственно-электромагнитная модель физического вакуума и ее приложения // Труды XII международной конференции «Забабахинские научные чтения. ЗНЧ-2014» (2–6 июня 2014 г., ВНИИТФ, г. Снежинск). Оpubл. в журн.: ФЭН-НАУКА. 2014. № 11 (38). С. 5–12.
5. *Астафурова М.В., Маренный А.М.* Обоснование существования минимальной массы и расчет ее численного значения // Образовательные ресурсы и технологии. 2014. № 1 (4). С. 262–269. URL: [http://www.muiv.ru/vestnik/pdf/pp/ot\\_2014\\_1\\_262-269.pdf](http://www.muiv.ru/vestnik/pdf/pp/ot_2014_1_262-269.pdf)

### References

1. *Arkhangelskaya I.V., Rosenthal I.L., Chernin A.D.* Cosmology and physical vacuum. Moscow: KomKniga, 2006. 216 p. (Rus.)
2. *Alekseev S.O., Pamyatnykh E.A., Ursulov A.V., Tretyakova D.A., Rannu K.A.* Introduction to the general theory of relativity, its modern development and applications. Yekaterinburg: Ural University, 2015. 380 p. (Rus.)
3. *Friedman A.A.* The world as space and time / 4th ed. M.: Publishing House "LKI", 2007. 112 p. (Rus.)
4. *Astafurova M.V., Dobretsov S.L., Astafurov V.I.* Spatial-electromagnetic model of physical vacuum and its applications. Proceedings of the 12th International Conference "Zababakhin scientific talks. ZST-2014" (June 2-6, 2014, VNIITF, Snezhinsk). Publ. in Journal: ФЭН-НАУКА – ФЭН-SCIENCE. 2014. № 11 (38). Pp. 5–12. (Rus.)
5. *Astafurova M.V., Marennyy A.M.* Substantiation of existence of minimum mass and calculation of its numerical value. *Obrazovatel'nyye resursy i tekhnologii – Educational resources and technologies.* 2014. № 1 (4). Pp. 262–269. (Rus.). URL: [http://www.muiv.ru/vestnik/pdf/pp/ot\\_2014\\_1\\_262-269.pdf](http://www.muiv.ru/vestnik/pdf/pp/ot_2014_1_262-269.pdf)

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ОКОЛОЗЕМНОГО ОРБИТАЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА В ОБЛАСТИ РЕЗОНАНСА 1:4 СО СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

**Е.В. Блинкова, Д.С. Красавин**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
zbizk322@mail.ru

**Ключевые слова:** динамика околоземных объектов, орбитальный резонанс, вековые апсидально-нодальные резонансы, MEGNO-анализ.

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования динамической структуры околоземного орбитального пространства в области резонанса 1:4 со скоростью вращения Земли. В результате численного моделирования выявлены зоны действия в ней пяти компонент орбитального резонанса и апсидально-нодальных вековых резонансов низких порядков. Построены карты распределения выявленных резонансов. Динамическая структура орбитального пространства исследована также с использованием быстрой ляпуновской характеристики MEGNO. Области исследования характеризуются наличием участков пространства, где действуют резонансы различных типов, что приводит к хаотизации движения объектов.

## RESEARCH OF DYNAMIC STRUCTURE OF NEAR-EARTH ORBITAL SPACE IN THE FIELD OF RESONANCE 1:4 WITH EARTH ROTATION SPEED

**E. Blinkova, D. Krasavin**

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

**Keywords:** near-Earth object dynamics, orbital resonance, secular apsidal-nodal resonances, MEGNO analysis.

**Abstract:** The paper presents the results of a study of the dynamic structure of near-Earth orbital space in the resonance region 1:4 with the Earth's rotation speed. As a result, it was found that the actions of five-component orbital resonance and apsidal-nodal secular resonances of low orders. The distribution maps of the revealed resonances are constructed. The dynamic structure of the orbital space was also investigated using the fast Lyapunov characteristic of MEGNO. Areas of study are characterized by the presence of sections of space where resonances of various types act, which leads to the randomization of the movement of objects.

Работа посвящена актуальной теме исследования динамической структуры околоземного орбитального пространства в области резонанса 1:4 со скоростью вращения Земли. Эта область околоземного космического про-

странства мало изучена. В то же время она может быть использована как для развертывания спутниковых систем связи и навигации, так и для паркинга отработавших объектов системы ГЛОНАСС. Для той и другой задач необходимо знание динамической структуры данной области.

Целью данной работы является детальное исследование динамической структуры области резонанса 1:4 со скоростью вращения Земли и особенностей долговременной орбитальной динамики объектов, движущихся в этой области. Исследование выполняется путем численного и численно-аналитического моделирования.

Для реализации поставленной цели решены следующие задачи:

- исследована динамическая структура орбитального пространства с использованием быстрой ляпуновской характеристики MEGNO [1] и построена соответствующая динамическая карта области;
- произведен анализ резонансных возмущений, действующих на движение объектов, населяющих рассматриваемую орбитальную область;
- выявлены особенности динамической эволюции орбит под действием резонансов.

Численное моделирование движения объектов осуществлялось на кластере «СКИФ Cyberia» НИ ТГУ при помощи усовершенствованного программного комплекса «Численная модель движения систем ИСЗ». В процессе моделирования учитывались возмущения от гармоник геопотенциала до 10 порядка и степени, а также возмущения от Луны и Солнца.

Для оценки хаотичности и определения интервала предсказуемости движения использовался комплекс программ [2], разработанный для MEGNO-анализа орбитальной эволюции объектов. Выявление и исследование влияния орбитального и вековых резонансов на динамику объектов проводились по методике, кратко изложенной в [3].

Численный эксперимент осуществлялся в диапазоне наклонов от 0 до 180 градусов и в диапазоне больших полуосей от 16 720 до 16 750 км для области резонанса 1:4.

Выявлены следующие типы, действующих в данной области, устойчивых резонансных соотношений, связанных с Луной и Солнцем:

$$\begin{aligned} \psi_7 &= (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_L) + 2\dot{\omega} + 2\dot{\omega}'_L, & \psi_8 &= (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_L) - 2\dot{\omega} - 2\dot{\omega}'_L, & \psi_{13} &= (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) + \dot{\omega}'_{S,L}, \\ \psi_{14} &= (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) - \dot{\omega}'_{S,L}, & \psi_{15} &= (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) + 2\dot{\omega}'_{S,L}, & \psi_{16} &= (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) - 2\dot{\omega}'_{S,L}, \\ \psi_{17} &= (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}), & \psi_{18} &= \dot{\omega} - \dot{\omega}'_L, & \psi_{19} &= \dot{\omega} + \dot{\omega}'_L. \end{aligned}$$

При использовании данной области околоземного космического пространства для развертывания спутниковых сетей или паркинга отработавших объектов, нужно учитывать сложность динамической структуры области.

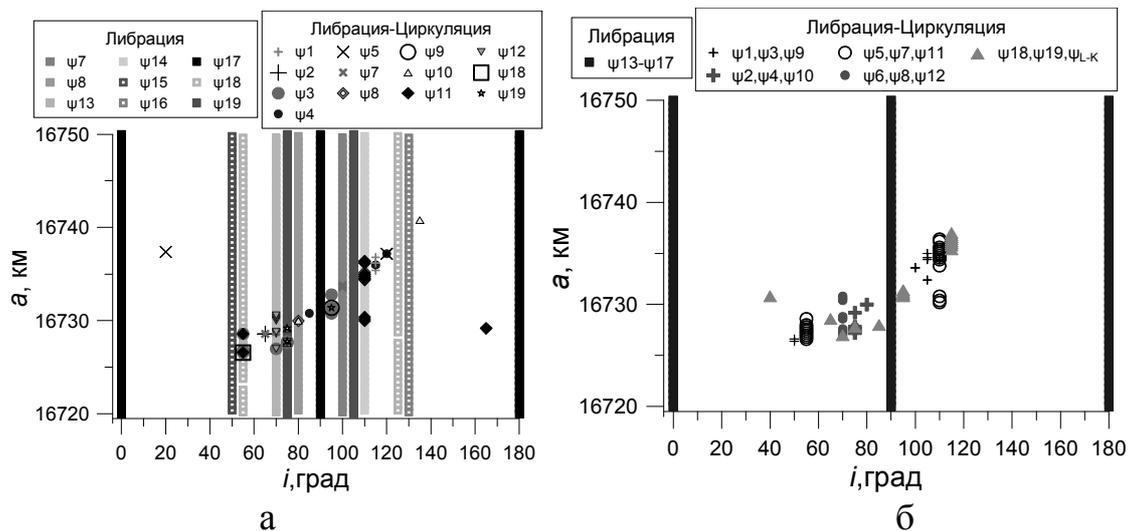


Рис. 1. Карта распределения вековых апсидально-нодальных резонансов связанных: *а* – с Луной; *б* – с Солнцем

Для примера на *рис. 1* представлена карта распределения вековых апсидально-нодальных резонансов области 1:4. Большинство объектов этой области имеют регулярные орбиты, за исключением зон совместного действия неустойчивых апсидально-нодальных резонансов, связанных с Солнцем и Луной. Это приводит к быстрой хаотизации движения объектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 18-32-00735 мол\_а.

### Литература

1. *Cincotta P.M., Girdano C.M., Simo C.* Phase space structure of multi-dimensional systems by means of the mean exponential growth factor of nearby orbits // *Physica D* 2003. Vol. 182. Pp. 151–178.
2. *Александрова А.Г., Бордовицына Т.В., Чувашов И.Н.* Численное моделирование в задачах динамики околоземных объектов // *Изв. вузов. Физика.* 2017. Т. 60, № 1 С. 69–76.
3. *Бордовицына Т.В., Томилова И.В., Красавин Д.С.* Орбитальная эволюция околоземных объектов в условиях пересечения резонансов различных типов // *Изв. вузов. Физика,* 2018, № 6. С. 106–113.

### References

1. *Cincotta P.M., Girdano C.M., Simo C.* Phase space structure of multi-dimensional systems by means of the mean exponential growth factor of nearby orbits // *Physica D* 2003. Vol. 182. Pp. 151–178.
2. *Bordovitsyna T.V., Aleksandrova A.G., Chuvashov I.N.* Numerical modeling in problems of near – Earth object dynamics // *Russian Physics Journal,* 2017. Vol. 60. No. 1. Pp. 80–89.
3. *Bordovitsyna T.V., Tomilova I.V., Krasavin D.S.* Orbital evolution of near-earth objects under conditions of intersections of resonances of different types // *Russian Physics Journal,* Vol. 61, No. 6, October, 2018. Pp. 1121–1128.

# О ДИНАМИКЕ АСТЕРОИДА 469219 КАМО`ОАЛЕВА

С.А. Гурьянов, Т.Ю. Галушина

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
magicboys2000@gmail.com

**Ключевые слова:** 469219 Камо`оалева, динамика, эволюция, орбитальный резонанс, апсидально-нодальные резонансы, сближения.

**Аннотация.** Ряд коорбитальных астероидов Земли испытывают повторяющиеся переходы между динамическими состояниями квазиспутников и «подков». Данная работа посвящена недавно обнаруженному астероиду (469219) Камо`оалева, который в настоящее время является квазиспутником нашей планеты, но в будущем совершает переход в класс «подков». Изучена его динамика, в частности рассмотрены сближения с Землей, орбитальные и вековые резонансы, а также хаотичность движения объекта. Одной из целей исследования орбитальной эволюции был ответ на вопрос, долго ли он будет квазиспутником Земли, и когда происходит переход в другое динамическое состояние.

## ON THE DYNAMICS OF THE ASTEROID 469219 KAMO`OALEWA

S. Guryanov, T. Galushina

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
magicboys2000@gmail.com

**Keywords:** 469219 Kamooalewa, dynamics, evolution, mean motion resonances, apsidal-nodal resonances, close approaches.

**Abstract.** A number of Earth's co-orbital asteroids experience repeated transitions between the dynamic states of quasi-satellites and horseshoes. This paper is devoted to the recently discovered asteroid (469219) Kamooalewa, which is currently a quasi-satellite of our planet, but in the future makes the transition to the class of horseshoes. Its dynamics was studied, in particular, we considered approaches to the Earth, orbital and secular resonances, as well as, the chaosity of the object. One of the purposes of the orbital evolution study was to answer the question of how long it will be a quasi-satellite of the Earth and when the moment of transition to another dynamic state occurs.

Астероид (469219) Камо`оалева (предварительное обозначение 2016 НОЗ), обнаруженный в 2016 году, движется в орбитальном резонансе 1:1 с Землей и в настоящее время входит в ряд квазиспутников нашей планеты, но его состояние неоднократно переключается между конфигурациями квазиспутника и «подковы». Сегодняшнее квазиспутниковое состояние объекта началось почти 100 лет назад и закончится примерно через 300 лет [1]. Орбитальное решение, доступное в настоящее время для этого астероида, очень надежное, и наши вычисления показывают, что он может быть долгосрочным компаньоном для нашей планеты.

В самом начале рассмотрения динамики объекта было решено провести анализ влияния различных возмущающих факторов на движение астероида. Рассматривалось действие больших планет, Плутона, Луны, Цереры, Паллады, Весты; сжатия Солнца, Земли и Юпитера; релятивистских эффектов от Солнца, больших планет, Плутона и Луны. В результате проведенного анализа обнаружено, что наиболее значимое влияние на динамику изучаемого астероида оказывают гравитационные силы Земли, Луны, больших планет и релятивистские эффекты (РЭ) Солнца.

Следующим шагом в исследовании было изучение хаотичности и эволюции астероида «Kamo`oalewa», а также тестовых частиц, распределенных по нормальному закону в пределах начальной доверительной области. Все расчеты проведены путем численного интегрирования дифференциальных уравнений движения и результирующие данные получены при помощи программного обеспечения ИДА [2]. Интервал времени исследования выбран исходя из точности вычислений, рассматривали время на 8000 лет в будущее и настолько же в прошлое. Параллельно с изучением эволюции объекта изучалась возможная хаотичность в его поведении. Для выявления хаотичности мы использовали параметр MEGNO (Mean Exponential Growth factor of Nearby Orbit), который представляет собой взвешенную по времени интегральную форму ляпуновского характеристического числа.

Для обнаружения и дальнейшего изучения орбитальных резонансов применялись такие резонансные характеристики как критический (или резонансный) аргумент [3]

$$\beta = k_0 \lambda_0 - k_j \lambda_j - (k_0 - k_j) \omega_0, \quad (1)$$

и его первая производная по времени – резонансная щель [4]

$$\alpha \approx k_0 n_0 - k_j n_j. \quad (2)$$

Здесь  $\lambda_0, \lambda_j$  – средние долготы астероида и планеты;  $\omega_0$  – аргументы перигелия астероида;  $k_0, k_j$  – целые положительные числа;  $n_0, n_j$  – средние движения астероида и планеты.

На *рис. 1* представлены результаты исследования астероида в виде графиков для некоторых параметров и характеристик объекта. В частности, показаны сближения с Землей (*a*), эволюция резонансной щели (*b*), критического аргумента (*в*) и параметра MEGNO (*г*). Видно, что  $MEGNO < 2$  практически на всем интервале исследования, т.е. орбита может рассматриваться как регулярная на рассматриваемом временном интервале. Что касается сближений (*рис. 1, a*), то они присутствуют на всем интервале исследования, однако расстояние до Земли меняется. Результаты исследова-

ния резонансных характеристик представлены на *рис. 1, б, в*. Резонансная щель колеблется около нуля с небольшой амплитудой, но при тесных сближениях амплитуда увеличивается. Критический аргумент либрирует около нуля, что в настоящее время говорит о принадлежности астероида к классу квазиспутников Земли, но также на графике видно, что спустя какое-то время значение характеристики изменится в сторону повышения амплитуды колебаний и смены их центра, что повлечет за собой переход объекта в класс «подков».

Помимо всего выше сказанного проводилась работа по выявлению апсидально-нодальных резонансов для изучаемого объекта. Под апсидально-нодальным резонансом обычно понимают соизмеримость, возникающую между скоростями прецессий орбит астероида и планеты ( $\dot{\omega}$ ,  $\dot{\omega}'$ ,  $\dot{\Omega}$ ,  $\dot{\Omega}'$ ) [5].

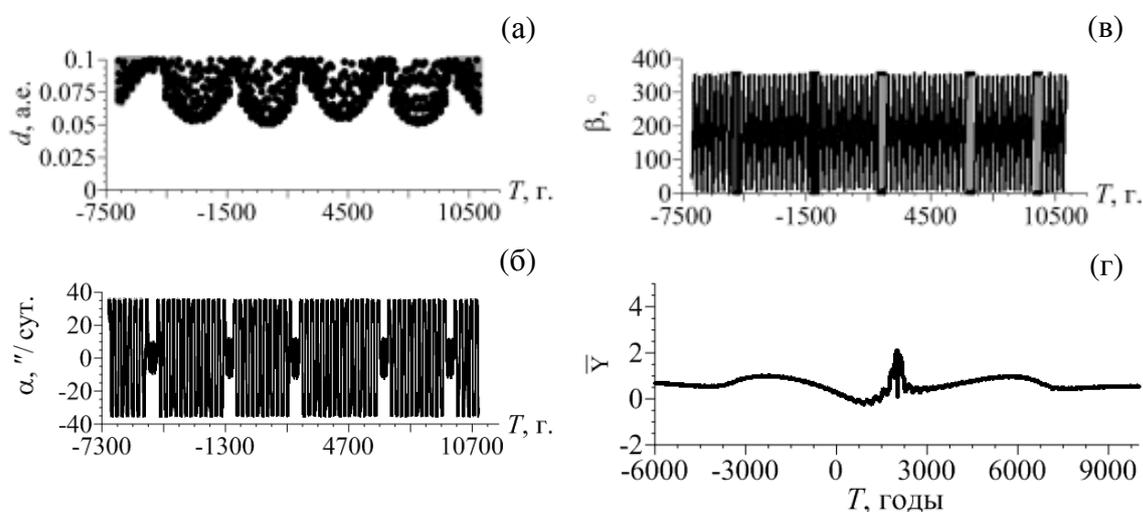


Рис. 1. Астероид (469219) Камо`оалева: сближения с Землей (*a*), *d* – расстояние между объектом и Землей; эволюция резонансной щели (*б*) и критического аргумента (*в*); эволюция параметра MEGNO (*г*). Серым фоном показана эволюция для тестовых частиц, черным выделена эволюция для номинальной орбиты

Благодаря изучению эволюции параметров орбиты астероида и исследования хаотичности движения, можем сказать, что орбита объекта является устойчивой на большом интервале времени; Исследование также показало наличие тесных сближений с Землей, но не настолько тесным, чтобы считать объект потенциально опасным. Исследование резонансных характеристик продемонстрировало, что объект действительно движется в резонансе 1:1 с Землей и в текущее время является квазиспутником Земли. Резонансные аргументы для большинства групп вековых соотношений либрируют на рассматриваемом интервале времени, что позволяет сделать вывод об устойчивости вековых резонансов для данного объекта.

## Литература

1. *C. de la Fuente Marcos, R. de la Fuente Marcos*, 2016. Asteroid (469219) 2016 HO<sub>3</sub>, the smallest and closest Earth quasi-satellite, MNRAS 462, 3441–3456 (2016).
2. *Galushina T., Bykova L., Letner O., Baturin A.* IDA software for investigating asteroid dynamics and its application to studying the motion of 2012 MF7 // *Astronomy and Computing* 29 (2019) id. 100301.
3. *Мюррей К., Дермотт С.* Динамика Солнечной системы. М.: Физматлит, 2009. 588 с.
4. *Гребеников Е.А., Рябов Ю.А.* Резонансы и малые знаменатели в небесной механике. М.: Наука, 1978. 128 с.
5. *Бордовицына Т.В., Томилова И.В., Чувашов И.Н.* Влияние вековых резонансов на долговременную орбитальную эволюцию неуправляемых объектов спутниковых радионавигационных систем в области МЕО // *Астрон. вестник*. 2012. Т. 46. № 5. С. 356–368.

## References

1. *C. de la Fuente Marcos, R. de la Fuente Marcos*, 2016. Asteroid (469219) 2016 HO<sub>3</sub>, the smallest and closest Earth quasi-satellite, MNRAS 462, 3441–3456 (2016).
2. *Galushina T., Bykova L., Letner O., Baturin A.* IDA software for investigating asteroid dynamics and its application to studying the motion of 2012 MF7 // *Astronomy and Computing* 29 (2019) id. 100301.
3. *Murray, C.D., Dermott, S.F.*, 1999. *Solar System Dynamics*. Cambridge University Press. Pp. 592.
4. *Grebenikov E.A., Ryabov Y.A.*, 1978. Resonances and Small Denominators in Celestial Mechanics. М.: Nauka, p. 128 (in Rus.).
5. *Bordovitsyna T.V., Tomilova I.V., Chuvashov I.N.*, 2012. The effect of secular resonances on the longterm orbital evolution of uncontrollable objects on satellite radio navigation systems in the MEO region. *Sol. Syst. Res.* 46 (5), 329–340.

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТА ЯРКОВСКОГО НА ДВИЖЕНИЕ АСТЕРОИДА 504181 2006 TC

**О.Н. Летнер, Т.Ю. Галушина**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
oksana.letner@gmail.com

**Ключевые слова:** 504181 2006 TC, орбитальная эволюция, тесные сближения, эффект Ярковского, апсидально-нодальные резонансы.

**Аннотация.** В работе исследована динамика астероида 504181 2006 TC, имеющего малое перигелийное расстояние. Получена оценка влияния эффекта Ярковского (ЭЯ) не только на его движение, но и на динамику всех астероидов с малыми перигелийными расстояниями, известных на июнь 2019. Для большинства астероидов учет влияния ЭЯ приводит к уменьшению размера доверительной области, наибольшее влияние он оказывает на движение 504181 2006 TC. Построена орбитальная эволюция астероида на

интервале времени ( $-5000, 4000$ ) лет и выявлены особенности его движения: многократные и тесные сближения с планетами внутренней группы, вековые резонансы и проявление хаотичности. Учет ЭЯ оказывает значительное влияние на эволюцию большой полуоси  $a$ , на количество сближений астероида с планетами и на расстояние до планет во время сближений.

## INFLUENCE EVALUATION OF THE YARKOVSKY EFFECT ON MOTION OF THE ASTEROID 504181 2006 TC

**O. Letner, T. Galushina**

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

**Keywords:** 504181 2006 TC, the orbital evolution, close approaches, the Yarkovsky effect, apsidal-nodal resonances.

**Abstract.** We Study the dynamics of the asteroid 504181 2006 TC, having a small perihelion distance. The influence estimate of the Yarkovsky effect is obtained for the dynamics of all asteroids with small perihelion distances known on June 2019. For the most asteroids taking into account the effect leads to decrease of the confidence region size. It has the greatest impact on the motion of the 504181 2006 TC. The orbital evolution of the asteroid on the time interval ( $-5000, 4000$ ) years is constructed. We revealed the following features of its motion: the multiple and close approaches with planets of the inner group, the secular resonances, and manifestation of the chaoticity. The Yarkovsky effect has a significant impact on the evolution of the semimajor axis  $a$ , on number of approaches of asteroid with planets, and on the distance to planets during approach.

Работа посвящена исследованию динамики астероида 504181 2006 TC и оценки влияния эффекта Ярковского (ЭЯ) на его движение. Эффект представляет собой явление, связанное с дополнительным ускорением астероида за счёт теплового излучения от нагревшейся днём и остывающей ночью его неравномерной поверхности. ЭЯ может оказывать значительное влияние на динамику астероидов, имеющих малые перигелийные расстояния, так как такие астероиды регулярно подходят близко к Солнцу. Исследуемый объект относится к этой группе и имеет перигелийное расстояние 0.135 а.е.

Выбор пал на 504181 2006 TC неслучайно. По предварительной оценке эффект Ярковского оказывает на его движение наибольшее влияние из 40 астероидов с малыми перигелийными расстояниями, известных на июнь 2019 года. В качестве параметра для учета эффекта использовалось трансверсальное ускорение  $A_2$  [1], которое, в свою очередь, определялось из условия минимума среднеквадратической ошибки представления наблюдений  $\sigma$ . Исследование показало, что для большинства астероидов учет влияния ЭЯ приводит к уменьшению размера доверительной области.

Динамика астероида 504181 2006 ТС подробно исследована на интервале времени  $(-5000, 4000)$  лет, подобрана модель сил и построена его орбитальная эволюция с учетом ЭЯ и без него. В процессе исследования были выявлены сближения астероида со всеми планетами внутренней группы. Эволюция кеплеровских элементов орбиты 2006 ТС, за исключением большой полуоси  $a$ , для двух моделей сил отличается незначительно. На *рис. 1* представлены графики эволюции большой полуоси и сближений астероида с Меркурием.

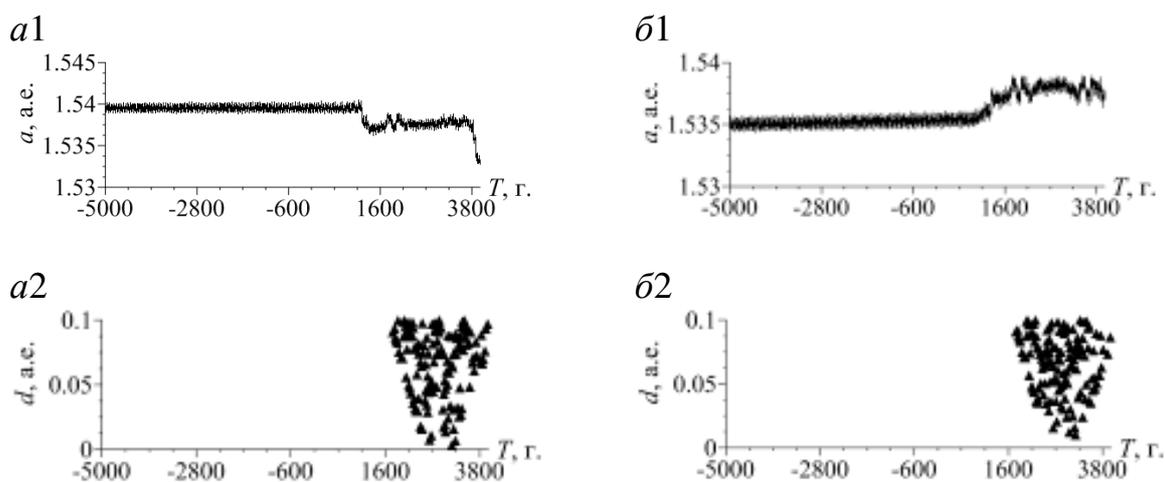


Рис. 1. Орбитальная эволюция астероида 504181 2006 ТС без учета эффекта Ярковского (*а*) и с его учетом (*б*): (*а1*, *б1*) – эволюция большой полуоси  $a$ ; (*а2*, *б2*) – сближения с Меркурием ( $d$  – расстояние от астероида до Меркурия)

Из *рис. 1* видно, что эффект Ярковского оказывает влияние на эволюцию большой полуоси, что, по-видимому, приводит к разному количеству и качеству сближений астероида с планетами. Например, без учета ЭЯ 2006 ТС испытывает 135 сближений с Меркурием, а самое тесное сближение с планетой произойдет в 2636 году (0.007 а.е.). В то же время с учетом ЭЯ астероид испытывает 128 сближений, а самое тесное из них произойдет в 2651 году (0.012) а.е. Таким образом, без учета эффекта астероид подходит ближе к Меркурию, нежели с его учетом.

Так как тесные и/или многократные сближения астероида с планетами могут приводить к проявлению хаотичности в его движении, мы оценили время предсказуемости с помощью индикатора OMEGNO (Orthogonal Mean Exponential Growth factor of Nearby Orbit) [2]. Эволюция этого параметра показала, что сближения астероида с Меркурием приводят к проявлению хаотичности в его движении.

Поскольку резонансная динамика играет большую роль в орбитальной эволюции астероидов, в работе был рассмотрен весь спектр апсидально-нодальных резонансов до 6-го порядка включительно (20 резонансов). Подробная методика выявления вековых резонансов описана в работе [3]. В

качестве характеристик векового резонанса рассматриваются резонансный аргумент  $\psi$  и его первая производная по времени, резонансное соотношение  $\dot{\psi}$ . Резонанс возникает, когда  $\dot{\psi} \approx 0$ , а критический аргумент  $\psi$  либрирует в пределах 360 градусов.

Для всех планет были построены графики поведения резонансных характеристик с использованием специально разработанных нами скриптов, позволяющих автоматизировать процесс. Оказалось, что для планет характеристики ведут себя схожим образом. Для шести из рассмотренных резонансов наблюдается циркуляция резонансного аргумента, то есть резонанс отсутствует. Для остальных 14-ти имеет место либрационное поведение аргумента.

Все расчеты выполнялись с использованием программного комплекса ИДА [4], в который была добавлена возможность автоматического определения параметра  $A_2$  и его учета при численном интегрировании уравнений движения астероидов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-10022).

### Литература

1. *Farnocchia D. et al.* Near Earth Asteroids with measurable Yarkovsky effect // *Icarus*. 2013. Vol. 224. Is. 1. Pp. 1–13.
2. *Shefer V.A., Koxsin A.M.* Fast Lyapunov indicators OFLI and OMEGNO: their relationship and special features // *Russ. Phys. J.* 2016. Vol. 59. No. 1. Pp. 71–75.
3. *Бордовицына Т.В., Томилова И.В., Чувашов И.Н.* Влияние вековых резонансов на долговременную орбитальную эволюцию неуправляемых объектов спутниковых радионавигационных систем в области МЕО // *Астрон. вестник*. 2012. Т. 46. № 5. С. 356–368.
4. *Galushina T., Bykova L., Letner O., Baturin A.* IDA software for investigating asteroid dynamics and its application to studying the motion of 2012 MF7 // *Astronomy and Computing*. 2019. Vol. 26.

### References

1. *Farnocchia D. et al.* Near Earth Asteroids with measurable Yarkovsky effect // *Icarus*. 2013. Vol. 224. Is. 1. Pp. 1–13.
2. *Shefer V.A. and Koxsin A.M.* Fast Lyapunov indicators OFLI and OMEGNO: their relationship and special features // *Russ. Phys. J.* 2016. Vol. 59. No. 1. Pp. 71–75.
3. *Bordovitsyna, T.V., Tomilova, I.V., Chuvashov, I.N., 2012.* The effect of secular resonances on the longterm orbital evolution of uncontrollable objects on satellite radio navigation systems in the MEO region. *Sol. Syst. Res.* 46 (5), 329–340.
4. *Galushina T., Bykova L., Letner O., Baturin A.* IDA software for investigating asteroid dynamics and its application to studying the motion of 2012 MF7 // *Astronomy and Computing*. 2019. Vol. 26.

# МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕКОВЫХ РЕЗОНАНСОВ В ДИНАМИКЕ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ВЫТЯНУТЫХ ОРБИТАХ

**Н.А. Попандопуло, А.Г. Александрова, Т.В. Бордовицына**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
nikas.popandopulos@gmail.com

**Ключевые слова:** методика, вековые резонансы, вытянутая орбита, спутники Земли.

**Аннотация.** Представлена модифицированная методика выявления вековых резонансов в динамике околоземных объектов. Специфика методики состоит в использовании для вычисления вековых частот точных формул вместо традиционно используемых приближенных аналитических формул, полученных для орбит с малыми эксцентриситетами. Полученная методика позволяет исследовать орбиты с любыми эксцентриситетами, но наиболее интересно ее применение к исследованию движения по орбитам с большими или быстро растущими эксцентриситетами. Сравнение результатов, полученных по точным и приближенным формулам, дается на примере исследования резонанса Лидова–Козаи.

## METHODOLOGY FOR RESEARCH OF SECULAR RESONANCES IN THE DYNAMICS OF NEAR EARTH ECCENTRIC-ORBITING OBJECTS

**N. Popandopulo, A. Aleksandrova, T. Bordovitsyna**

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

**Keywords:** methodology for calculating, secular resonances, eccentric orbit, near-earth objects.

**Abstract.** A modified technique for identifying secular resonances in the dynamics of near-Earth objects is presented. The specificity of the technique consists in using exact formulas to calculate secular frequencies instead of the traditionally used approximate analytical formulas obtained for orbits with small eccentricities. The obtained technique allows to explore orbits with any eccentricity, but its application to the study of motion in orbits with large or rapidly growing eccentricities is most interesting. A comparison of the results obtained with using precise and approximate formulas is given by the example of the study of the Lidov–Kozai resonance.

Проблема исследования влияния вековых резонансов на динамику ИСЗ в последнее время стала очень актуальной, поскольку это влияние приводит к значительному изменению орбит, сопряженному с ростом их эксцентриситетов. Традиционно [1, 2] при таких исследованиях вековые частоты

вычисляются с помощью приближенных аналитических формул, которые получены для орбит с малыми эксцентриситетами.

Целью данной работы было получение универсальных формул для вычисления вековых частот, одинаково пригодных для исследования орбит с любыми эксцентриситетами, в том числе и быстрорастущими.

Поскольку численное моделирование движения объектов является основным методом исследования орбитальной эволюции околоземных объектов, авторы предлагают вычислять вековые частоты спутника по точным формулам; используются уравнения Ньютона–Эйлера:

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{r \sin u}{p \sin i} W; \quad \frac{d\omega}{dt} = -\frac{\cos v}{e} S + \frac{\sin v}{e} \left(1 + \frac{r}{p}\right) T - \frac{r \sin u}{p \operatorname{tg} i} W,$$

где  $S$ ,  $T$ ,  $W$  – возмущающие ускорения, записанные в орбитальной системе координат и связанные с правыми частями уравнений движения, используемыми при численном моделировании, известными соотношениями [3], а вековые частоты возмущающих тел получать с помощью фонда координат больших планет.

Оценка эффективности предложенной методики была проведена на большом количестве примеров численного моделирования динамики объектов, подверженных действию векового резонанса Лидова–Козаи  $\dot{\psi} = \dot{\omega} \approx 0$ . Этот резонанс является наиболее влиятельным и его действие, как правило, сопровождается ростом эксцентриситета [5].

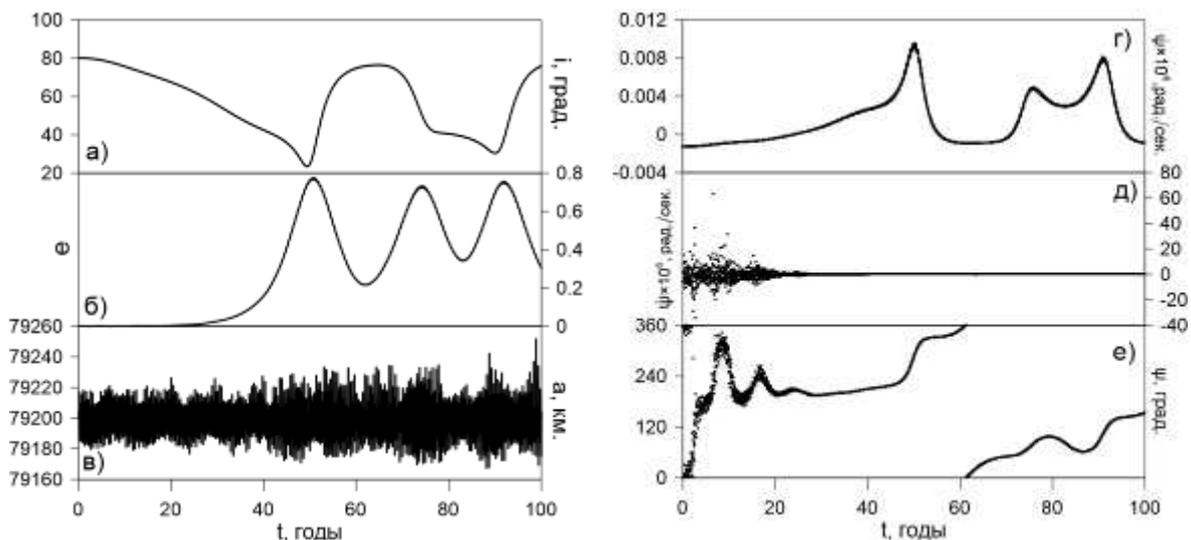


Рис. 1. Исследование динамики высоколетящего околоземного объекта: левая панель – эволюция элементов орбиты:  $a$  – наклона  $i$ ;  $b$  – эксцентриситета  $e$ ;  $c$  – большой полуоси  $a$ ; правая панель – параметры векового резонанса:  $g$  – изменение во времени резонансного соотношения  $\dot{\psi} = \dot{\omega} \approx 0$ , рассчитанное по аналитической методике;  $d$  – изменение того же соотношения, вычисленное по точной методике;  $e$  – эволюция резонансного аргумента

Сопоставление методик показало, что при исследовании объектов со слабым ростом изначально почти нулевого эксцентриситета методики дают одинаково надежный результат.

При исследовании динамики объектов с большим начальным эксцентриситетом новый подход предпочтителен. Кроме того, этот подход может быть полезен в сложных случаях, когда аналитические оценки частот противоречат поведению резонансного аргумента. В случае быстрого роста эксцентриситета, что характерно для высоколетящих объектов на приполярных орбитах, оценки, получаемые точным методом, существенно более надежны. Пример исследования динамики объекта с быстро растущим эксцентриситетом представлен на *рис. 1*.

Начальные параметры спутника следующие: большая полуось  $a = 79200$  км, эксцентриситет  $e = 0.01$ , наклонение  $i = 80^\circ$ . Сравнение методик выполнено для резонанса Лидова–Козаи  $\dot{\psi} = \dot{\omega} \approx 0$ .

Приведенные на *рис. 1* данные наглядно показывают, что в сложных случаях при исследовании орбит с быстрорастущими под действием векового резонанса эксцентриситетами предлагаемая методика дает точные оценки, в то время как приближенная аналитическая методика искажает результаты.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-10022).

### Литература

1. Rosengren A.J., Alessi E.M., Rossi A., Valsecchi G.B. Chaos in navigation satellite orbits caused by the perturbed motion // MNRAS. 2015. Vol. 449. Is. 4. Pp. 3522–3526.
2. Daquin J. et al. The dynamical structure of the MEO region: long-term stability, chaos, and transport // Celest Mech Dyn Astr. Published online 02 January 2016.
3. Бордовицына Т.В., Томилова И.В. Особенности структуры вековых резонансов в динамике околоземных космических объектов // Изв. вузов Физика. 2016. № 3. С. 41–48.
4. Дубошин. Г.Н. Руководство по небесной механике и астродинамике. М.: Физматлит. 1978. 889 с.
5. Александрова А.Г., Бордовицына Т.В., Томилова И.В. Резонанс Лидова–Козаи и его влияние на орбитальную эволюцию околоземных космических объектов // Сборник докладов «М.Л. Лидов – яркое имя в космической науке». М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2016. С. 40–66.

### References

1. Rosengren A.J., Alessi E.M., Rossi A., Valsecchi G.B. Chaos in navigation satellite orbits caused by the perturbed motion // MNRAS. 2015. Vol. 449. Is. 4. Pp. 3522–3526.
2. Daquin J. et al. The dynamical structure of the MEO region: long-term stability, chaos, and transport // Celest Mech Dyn Astr. Published online 02 January 2016.
3. Bordovitsyna T.V., Tomilova I.V. Special features of the structure of secular resonances in the dynamics of near-earth space objects // Rus. Phys. Jour. 2016. Vol. 59, № 3. Pp. 365–373.

4. *Duboshin G.N.* Guide to celestial mechanics and astrodynamics. M.: Fizmatlit. 1978. 889 p.

5. *Aleksandrova A.G., Bordovitsyna T.V., Tomilova I.V.* Lidov-Kozai resonance and its influence on the orbital evolution of near-earth space objects.// Collection of reports "M.L. Lidova bright name in space science". M: IPM im. M.V. Keldysh RAS. 2016. Pp. 40–66.

## АПРОБАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ УЧЕТА ЭФФЕКТА ЯРКОВСКОГО И СВЕТОВОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ДВИЖЕНИЯ АСТЕРОИДОВ

**О.М. Сюсина, Т.Ю. Галушина**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
kleo77@sibmail.com

**Ключевые слова:** астероид, эффект Ярковского, световое давление.

**Аннотация.** В данной работе проведено исследование влияния на вероятностную модель движения астероидов таких малых возмущающих параметров как эффект Ярковского и световое давление. Влияние возмущающих ускорений оценивалось с помощью показателя, основанного на определении смещения доверительных областей, построенных при использовании различных моделей сил. Параметр трансверсального ускорения  $A_2$  для задания эффекта Ярковского определялся из условия минимизации среднеквадратической ошибки представления наблюдений.

## APPROBATION OF THE SOFTWARE FOR TAKING INTO ACCOUNT THE YARKOVSKY EFFECT AND LIGHT PRESSURE IN STUDYING THE ASTEROIDS MOTION

**O. Syusina, T. Galushina**

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

**Keywords:** asteroid, the Yarkovsky effect, light pressure.

**Abstract.** In this paper we study the influence of small perturbing parameters such as the Yarkovsky effect and light pressure on the probability model of asteroids' motion. The influence of disturbing accelerations was estimated using an indicator based on the determination of the displacement of confidence regions, constructed using various models of forces. The transverse acceleration parameter  $A_2$  for setting the Yarkovsky effect was determined on the basis of minimizing the mean square error of the observation representation.

Построение адекватной модели сил при исследовании вероятностного движения астероидов является одной из важных задач небесной механики. Необходимость повышения точности прогноза движения объектов, осо-

бенно сближающихся с Землей, приводит к увеличению интереса к исследованию влияния малых возмущающих ускорений на движение астероидов. В настоящее время все большей популярностью пользуется эффект Ярковского [1, 2].

Целью данной работы было исследование влияния эффекта Ярковского и светового давления на вероятностную модель движения астероидов с малыми перигелийными расстояниями (менее 0.15 а.е.). Для решения данной задачи в программное обеспечение, позволяющее исследовать движение малых тел Солнечной системы, добавлены рассматриваемые возмущения. На примере трех астероидов 2007 PR10, 431760 2008 HE и 2017 AF5 приведем результаты исследования влияния эффекта Ярковского и светового давления на движение объектов. Параметр трансверсального ускорения  $A_2$ , необходимый для учета эффекта Ярковского, определялся из условия минимума среднеквадратической ошибки представления наблюдений  $\sigma$ . В результате данного исследования получены следующие значения параметра: для астероида 2007 PR10  $A_2 = -3.86 \cdot 10^{-13}$  а.е./сут<sup>2</sup>, для 431760 2008 HE  $A_2 = 1.02 \cdot 10^{-13}$  а.е./сут<sup>2</sup>, для 2017 AF5  $A_2 = 3.36 \cdot 10^{-12}$  а.е./сут<sup>2</sup>. Физические параметры, необходимые для учета светового давления, для исследуемых объектов являются неизвестными, поэтому мы были вынуждены использовать грубые оценки. Диаметр объектов определялся из значения абсолютной звездной величины с помощью формулы, приведенной в работе [3], со средним альбедо равным 0.14.

Влияние исследуемых возмущающих ускорений оценивалось с помощью показателя точности моделей сил [4]

$$\varepsilon = \left| \hat{\mathbf{q}} - \hat{\mathbf{q}}^* \right| / \left| \bar{\mathbf{q}} - \hat{\mathbf{q}}^* \right|,$$

где  $\hat{\mathbf{q}}$  и  $\hat{\mathbf{q}}^*$  – оценки параметров орбиты объекта, определяемые для различных моделей движения;  $\bar{\mathbf{q}}$  – точка, лежащая в параметрическом пространстве вдоль направления  $(\hat{\mathbf{q}} - \hat{\mathbf{q}}^*)$  на уровне поверхности доверительной области. Пороговое значение для показателя  $\varepsilon$  задавалось равным 0.01. В рамках данного исследования показатель  $\varepsilon$  вычислялся для двух различных моделей движения: без учета эффекта Ярковского и без учета светового давления. Полная модель включала в себя еще притяжение от восьми больших планет, Плутона, Луны, сжатие Земли и Солнца, релятивистские эффекты от Солнца. В результате мы получили, что для всех объектов показатель точности модели сил  $\varepsilon$  при неучете влияния эффекта Ярковского выше порогового значения (для 2007 PR10  $\varepsilon = 0.71$ , для 431760 2008 HE  $\varepsilon = 0.06$ , для 2017 AF5  $\varepsilon = 0.04$ ). Это говорит о том, что данное возмущающее ускорение следует включать в модель сил при исследовании данных астероидов. Показатель точности модели сил при ис-

следовании влияния светового давления больше порогового значения только для астероида 2007 PR10 (для 2007 PR10  $\varepsilon=0.07$ , для 431760 2008 HE  $\varepsilon=0.005$ , для 2017 AF5  $\varepsilon=1 \cdot 10^{-4}$ ). Наглядное представление смещения доверительных областей при применении различных моделей приведено на *рис. 1*. Здесь черным цветом обозначена начальная доверительная область, построенная на основе полной модели, серым – на основе модели без учета эффекта Ярковского. Как видно из рисунка, неучет эффекта Ярковского приводит к смещению начальных доверительных областей для всех рассматриваемых астероидов. Соответственно, при исследовании движения данных объектов это малое возмущение следует учитывать.

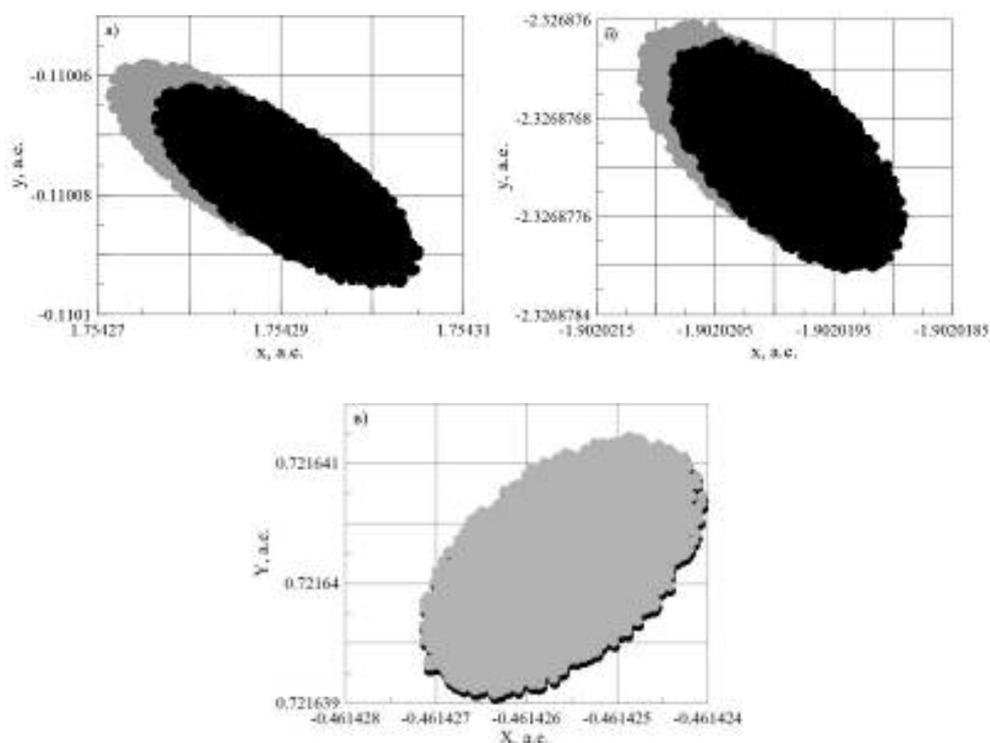


Рис. 1. Начальные доверительные области для *a* – 2007 PR10; *б* – 2008 HE; *в* – 2017 AF5

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-10022).

### Литература

1. *Bottke Jr. et al.* The Yarkovsky and Yorp Effects: Implications for Asteroid Dynamics // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2006. Vol. 34. Pp. 157–191.
2. *Farnocchia, D., Chesley, S.R., Chodas, P.W., et al.* Yarkovsky-driven impact risk analysis for asteroid (99942) // *Apophis*. Icarus. 2013. Vol. 224. Pp. 192–200.
3. *Perna D., Barucci M.A. & Fulchignoni* The near-Earth objects and their potential threat to our planet // *Astron Astrophys Rev*. 2013. 21: 65. <https://doi.org/10.1007/s00159-013-0065-4>.

4. Сюзина О.М., Г.Е. Самбаров Оценивание влияния различных возмущающих ускорений на точность вероятностной модели движения астероида 2011 MD // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики Труды Томского государственного университета. Серия физико-математическая / под ред. М.Ю. Орлова. 2017. С. 131–134.

### References

1. Bottke Jr. et al. The Yarkovsky and Yorp Effects: Implications for Asteroid Dynamics // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2006. Vol. 34. Pp. 157–191.
2. Farnocchia, D., Chesley, S.R., Chodas, P.W., et al. Yarkovsky-driven impact risk analysis for asteroid (99942) // Apophis. Icarus. 2013. Vol. 224. Pp. 192–200
3. Perna D., Barucci M.A. & Fulchignoni The near-Earth objects and their potential threat to our planet // Astron Astrophys Rev. 2013. 21: 65. <https://doi.org/10.1007/s00159-013-0065-4>.
4. Syusina O.M, Sambarov G.E. Estimating the effect of different perturbing accelerations on the precision of probabilistic model of asteroid 2011 MD motion // Current Issues of continuum mechanics and celestial mechanics. Proceedings of Tomsk State University. 2017. Pp. 131–134.

## **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. Хрусталеv

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



# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА

А.В. Азин<sup>1</sup>, С.В. Пономарев<sup>1</sup>, С.В. Рикконен<sup>1</sup>, С.А. Кузнецов<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнева, Россия  
antonazin@mail.ru

**Ключевые слова:** пьезоэлектрический привод, космический аппарат, колебательная система, физическая модель, точность отражающей поверхности.

**Аннотация.** Актуальным вопросом для космической отрасли является создание крупногабаритных трансформируемых рефлекторов для космических аппаратов. Основными критериями являются точность формы отражающей поверхности и вес конструкции. Для регулировки формы отражающей поверхности рефлектора в условиях космического пространства предложена конструкция автономного натяжителя вантового элемента на основе разработанного прецизионного пьезоэлектрического привода. Проведены экспериментальные исследования привода и определены его технические характеристики.

## EXPERIMENTAL STUDY OF A PRECISION PIEZOELECTRIC ACTUATOR

A. Azin<sup>1</sup>, S. Ponomarev<sup>1</sup>, S. Rikkonen<sup>1</sup>, S. Kuznetsov<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Academician M.F. Reshetnev Information Satellite Systems, Russian Federation

**Keywords:** piezo drive, spacecraft, oscillatory system, physical model, reflective surface accuracy.

**Abstract.** The development of spacecraft large-sized reflectors is one of the most urgent issues for the space industry. The reflector structure is to meet such principle criteria as high accuracy in reflective surface configuration and weight. The authors suggest using autonomous cable element tensioner with piezo motors to adjust the shape of the reflector in space conditions. Experimental studies of the drive are carried out and its technical characteristics are determined.

Анализ современных тенденций развития крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов с вантовой формообразующей системой показывает постоянную необходимость увеличения габаритов антенных рефлекторов, что усложняет процесс настройки формы отражающей поверхности (ОП) рефлектора [1–3].

Для решения проблемы настройки формы ОП рефлектора в условиях космического пространства необходимо разработать автономные натяжители вантовых элементов (АНВЭ).

При выполнении проекта разработана конструкция АНВЭ, которая состоит из накопителя энергии (НЭ), блока управления (БУ), блока электропитания (БЭ), радиоканала (РК) и пьезоэлектрического привода (ПП) (рис. 1). Принцип работы АНВЭ: управляющий сигнал поступает от космического аппарата в БУ АНВЭ по РК, через БУ сигнал поступает в НЭ и БЭ для организации работы ПП. Конструкция изготовленного прецизионного ПП и принцип его работы описаны в работе [4].

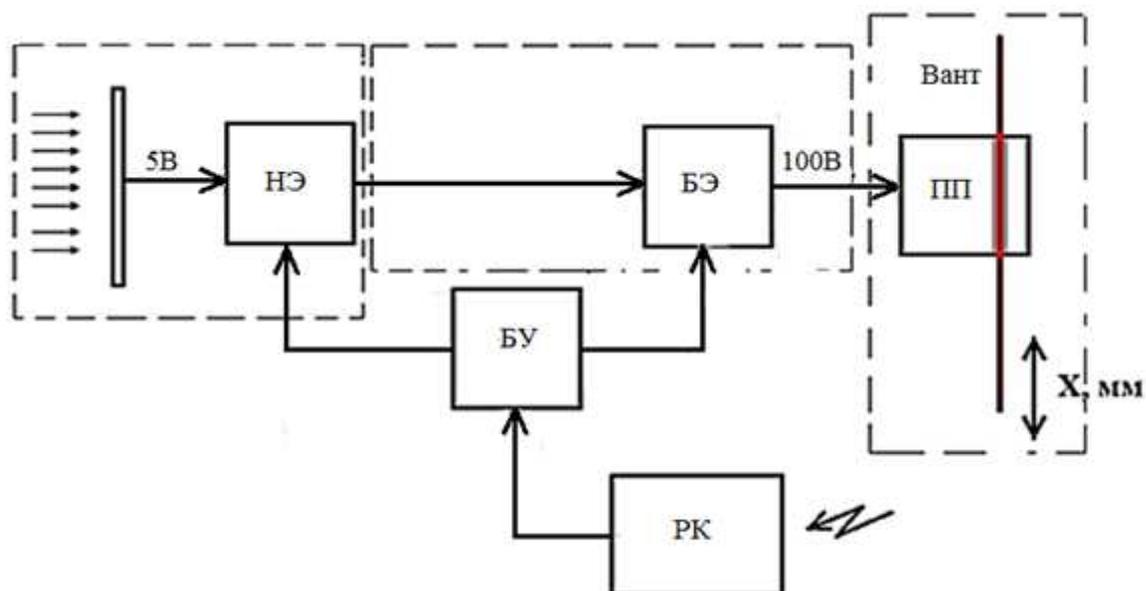


Рис. 1. Блок-схема АНВЭ

Проведены экспериментальные исследования режимов работы разработанного ПП на два типа нагрузки: постоянную (груз) и упругую (упругий элемент). В работе [4] описан порядок экспериментальных исследований и приведен перечень использованного оборудования.

В случае постоянной нагрузки, скорость ПП увеличивается с увеличением амплитуды напряжения сигнала управления, а при увеличении массы груза  $m$  скорость ПП  $V$  уменьшается (например, при  $m=0.5$  кг,  $V=12$  мм/мин; при  $m=1$  кг,  $V=2$  мм/мин) [4]. В случае с упругой нагрузкой, скорость ПП  $V$  уменьшается с увеличением силы сопротивления упругого элемента  $F$  (например, при  $F=0$  Н (режим холостого хода),  $V=6.6$  мм/мин; при  $F=10$  Н,  $V=0.15$  мм/мин; при  $F=12$  Н,  $V=0$  мм/мин (режим короткого замыкания)).

Разработана оригинальная конструкция прецизионного ПП для автономного натяжителя вантовых элементов крупногабаритного трансформируемого рефлектора космического аппарата. По результатам экспериментальных исследований выявлена зависимость скорости ПП от типа оказываемой на него нагрузки.

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

## Литература

1. *Xun G., Peng H., Wu S., Wu Z.* Active Shape Adjustment of Large Cable-Mesh Reflectors Using Novel Fast Model Predictive Control // *J. Aerosp. Eng.* 2018. Vol. 31(4), no. 04018038. DOI: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000858.
2. *Nakamura K., Nakamura N.* Concept Design of 15m class Light Weight Deployable Antenna Reflector for L-band SAR Application // 3rd AIAA Spacecraft Structures Conference, AIAA SciTech Forum(AIAA 2016-0701, San Diego, USA). DOI: 10.2514/6.2016-0701.
3. *Zheng F., Chen M.* New Conceptual Structure Design for Affordable Space Large Deployable Antenna // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation.* 2015. Vol. 63, №. 4. Pp. 1351–1358. DOI: 10.1109/TAP.2015.2404345.
4. *Azin A., Rikkonen S., Ponomarev S., Maritsky N., Kuznetsov S.* Designing a precision motor for the spacecraft reflector control system // *AIP Conference Proceedings.* 2019. Vol. 2103. No. 020001. Doi: 10.1063/1.5099865.

## References

1. *Xun G., Peng H., Wu S., Wu Z.* Active Shape Adjustment of Large Cable-Mesh Reflectors Using Novel Fast Model Predictive Control / *J. Aerosp. Eng.* 2018. Vol. 31(4), no. 04018038. DOI: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000858.
2. *Nakamura K., Nakamura N.* Concept Design of 15m class Light Weight Deployable Antenna Reflector for L-band SAR Application. 3rd AIAA Spacecraft Structures Conference, AIAA SciTech Forum. San Diego, 2016. DOI: 10.2514/6.2016-0701.
3. *Zheng F., Chen M.* New Conceptual Structure Design for Affordable Space Large Deployable Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation.* 2015, Vol. 63. No. 4. Pp. 1351–1358. DOI: 10.1109/TAP.2015.2404345.
4. *Azin A., Rikkonen S., Ponomarev S., Maritsky N., Kuznetsov S.* Designing a precision motor for the spacecraft reflector control system. *AIP Conference Proceedings.* 2019. Vol. 2103. No. 020001. Doi: 10.1063/1.5099865.

## ОБТЕКАНИЕ МОДЕЛИ ЗДАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПОЖАРА

**Е.М. Алексеенко, В.Д. Гольдин**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
osh@mail.tsu.ru

**Ключевые слова:** природные пожары, очаг пожара, тепломассовыделение, турбулентность, излучение.

**Аннотация.** В условиях пожара вблизи здания могут возникнуть ситуации, угрожающие жизни и здоровью людей, находящихся возле здания. В данной статье рассматривается двумерная задача плоского обтекания модели здания при различных вариантах расположения очага пожара на поверхности земли вблизи здания и на его крыше. Расчет проводился с помощью пакета ANSYS FLUENT с использованием реалистичной  $k-\epsilon$  модели турбулентности и математической модели «несжимаемого идеального газа». При расчете учитывался теплообмен излучением между твердыми по-

верхностями. Определены поля скоростей и температур при различных расположениях очага пожара. Определены максимальные скорости восходящего течения и максимальные значения температуры стенки здания, на которую приходит излучение от очага.

## FLOW AROUND A BUILDING MODEL IN A FIRE

E. Alekseenko, V. Goldin

Tomsk State University, Russian Federation  
osh@mail.tsu.ru

**Keywords:** wildland fires, surface fires, fire source, heat and mass input, realizable k- $\epsilon$  turbulence model, radiation.

**Abstract.** In the event of a fire near a building, there may be situations that threaten the life and health of people who are near the building. This article deals with the two-dimensional problem of flat flow around a building model with different variants of the location of the fire source on the ground surface near the building and on its roof. The calculation was performed by the ANSYS FLUENT package using a mathematical model of an "incompressible ideal gas" including a realistic k- $\epsilon$  turbulence model. The calculation took into account the radiative heat transfer between solid surfaces. The fields of velocities and temperatures at different locations of the fire source were calculated. The maximum velocities of the ascending flow and the maximum values of the temperature of the building wall, which receives radiation from the fire source, were determined.

Актуальность проблемы природных пожаров несомненна [1, 2]. Наиболее важной проблемой для людей является возникновение пожаров в непосредственной близости от населенных пунктов, так как пожар может быстро перейти на здания [2]. Очень важно уметь прогнозировать поведение таких пожаров, чтобы принять правильное решение при выборе мер по предотвращению возгораний близлежащих строений и для спасения населения. Для этого необходимо знать значения температуры на поверхности и вблизи зданий, находящихся возле фронта пожара, а также поведение основных газодинамических параметров газового потока вокруг построек при наличии фронта пожара в непосредственной близости с ними.

В данной статье рассматривается двумерная стационарная задача обтекания модели здания бесконечным свободным дозвуковым потоком воздуха в декартовой системе координат в условиях пожара. Расчет проводился в пакете ANSYS FLUENT. Течение рассчитывалось с использованием математической модели «несжимаемого идеального газа» [3], применимой для неизотермических течений с малыми дозвуковыми скоростями; характеристики турбулентности определялись на основе реалистичной «k- $\epsilon$ » модели турбулентности. Учитывался перенос излучения между твердыми поверхностями, а также влияние ветра на картину обтекания. Прогрев стен здания не учитывался.

Расчетная область ограничена входной свободной левой поверхностью, нижней подстилающей поверхностью (поверхностью Земли), поверхностью модели здания, верхней плоскостью и замыкающей правой выходной плоскостью. Размер расчетной области по горизонтали составляет 93.4 м и 50 м – по вертикали. Здание расположено на расстоянии 43.3 м от входной плоскости. Высота здания составляет 10 м, ширина – 6.6 м. Длина здания предполагается намного больше его ширины.

Пожар моделировался путем задания температуры поверхности в области источника тепломассовыделения, равной температуре горения  $T_r = 1200$  К, а также путем задания массового расхода вдуваемого газа от пожара  $(\rho v_n)_w = 2.3 \times 10^{-3}$  кг/(м<sup>2</sup>·с) [1].

В качестве граничных условий на левой входной границе в расчетной области задавались значения скорости и температуры. При этом в отсутствии ветра скорость равна нулю, а при наличии ветра распределение скорости задавалось по логарифмическому закону в зависимости от высоты над поверхностью земли [4]. При этом скорость ветра на высоте 10 м бралась равной 2 м/с. В обоих случаях температура воздуха задавалась равной 300 К.

На верхней и правой границах предполагалось, что давление совпадает с гидростатическим на тех участках этих границ, где наблюдалось течение внутрь области, задавалось значение температуры 300 К.

Рассмотрены три случая расположения пожара: пожар, протяженностью 10 м, расположен на поверхности земли перед моделью здания на расстоянии 5 м от стенки здания; пожар, протяженностью 10 м, расположен на поверхности земли позади модели здания на расстоянии 3.4 м от стенки здания; пожар, протяженностью 6.6 м, расположен на крыше модели здания.

Получены следующие картины обтекания здания: 1) в случае пожара перед моделью здания без учета ветра; 2) в случае пожара перед зданием с учетом ветра; 3) в случае пожара за моделью здания с учетом ветра; 4) в случае пожара на крыше модели здания с учетом ветра.

Результаты расчетов говорят о существенном влиянии ветра на картину обтекания. Определены значения максимальной скорости подъема нагретого газа  $v_{max}$ . Эти величины приведены в таблице. Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными [5].

При пожаре с подветренной стороны воздух между пожаром и стенкой здания и сама стенка здания разогреваются сильнее, чем при пожаре с наветренной стороны. Это объясняется наличием вихря в расчетной области позади модели здания, который переносит прогретые массы воздуха от пожара к стенке модели здания, создавая возвратное течение.

Максимальные значения температуры стенки здания  $T_{max}$ , на которую приходит излучение от очага равны: 1) 825 К; 2) 685 К; 3) 725 К (см. табл.). Откуда следует, что наиболее опасным вариантом является первый случай.

Таблица. Результаты расчетов

Варианты расчетов, №	$v_{\max}$ , м/с	$T_{\max}$ , К
1	13–16	825
2	5.0	685
3	4.28	725
4	3.71	430

Между очагом пожара и стенкой здания во всех первых трех случаях достигаются температуры, угрожающие здоровью и жизни человека, так как ожог первой степени у человека возникает уже при температуре 318 К [1].

Первые три варианта расположения пожара представляют угрозу и для деревянных жилых построек, поскольку при быстром нагреве древесины до температуры выше 603 К может произойти воспламенение и при отсутствии открытого источника тепла (пламени и искр).

В четвертом случае расположения пожара на крыше модели здания на начальном этапе развития пожара в окрестностях здания воздух практически не перегревается. Только на высоте 2 м над кровлей здания максимальная температура воздуха  $T_{\max}$  достигает 430 К. Поэтому в начальный момент существования пожара этот пожар мало угрожает близлежащим постройкам и населению, находящимся на уровне земли.

Пожар, расположенный на поверхности земли возле здания, во всех трех рассмотренных случаях опасен как для здоровья людей, находящихся между зданием и очагом пожара, так и для самого здания, поскольку деревянное здание может легко воспламениться. Пожар, расположенный на крыше здания, не опасен для людей, которые находятся на уровне земли, а также не опасен для близлежащих построек в начальный момент существования пожара.

### Литература

1. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1981. 277 с.
2. Гришин А.М., Фильков А.И. и др. // Пожарная безопасность. 2013. №3. С. 52–58.
3. Лапин Ю.В., Стрелец М.Х. Внутренние течения газовых смесей. М.: Наука, 1989.
4. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1984.
5. Filkov A., Prohanov S. et al. // Proceedings of the Combustion Institute 36 (2017) 3263–3270. DOI: 10.1016/j.proci.2016.06.125.

### References

1. Grishin A.M. Mathematical models of forest fires. Tomsk. Izdatel'stvo Tomsk. Universiteta. 1981. 277 p. (Rus.).
2. Grishin A.M., Filkov F.I. et al. Pozarnaya bezopasnost. 2013. No 3. Pp. 52–58. (Rus.)

3. *Lapin Yu.V., Strelets M.* Internal flows of gas mixtures. Moscow. *Nauka*. 1989. (Rus.)
4. *Matveev L.T.* Course of General meteorology. Atmospheric physics. Leningrad. Hydrometeoizdat. 1984. (Rus.)
5. *Filkov A., Prohanov S. et al.* // Proceedings of the Combustion Institute 36 (2017) 3263–3270. DOI: 10.1016/j.proci.2016.06.125.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОГРАВИТАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИИ В ЗАМКНУТОЙ ПОРИСТОЙ ПОЛОСТИ С МЕДНЫМ РАДИАТОРОМ И ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ

**М.С. Астанина, М.А. Шеремет**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
astanina.marina@bk.ru

**Ключевые слова:** охлаждение электроники, естественная конвекция, пористая среда, нагреватель.

**Аннотация.** В работе проведено математическое моделирование пассивной системы охлаждения тепловыделяющего теплопроводного источника энергии. Система представляет собой замкнутую пористую полость с радиатором в нижней части. Нагреватель находится в центре нижней стенки области. Горизонтальные стенки полости теплоизолированы. Математическая модель формулируется в безразмерных переменных «функция тока – завихренность – температура» и разрешается на основе метода конечных разностей. Полость заполнена ньютоновской теплопроводной жидкостью, вязкость которой зависит от температуры. Особое внимание было уделено анализу влияния геометрических характеристик радиатора на эффективность работы системы охлаждения. В результате были получены распределения линий тока и изотерм, а также значения средней температуры в нагревателе.

## MATHEMATICAL SIMULATION OF THERMOGRAVITATIONAL CONVECTION IN A POROUS CAVITY WITH A COPPER RADIATOR AND A HEAT-GENERATING ELEMENT

**M. Astanina, M. Sheremet**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
astanina.marina@bk.ru

**Keywords:** cooling of electronic devices, natural convection, porous layer, heater.

**Abstract.** Mathematical modeling of a passive cooling system for a heat-generating and heat-conducting element is performed. The system consists of a porous cavity with a radiator in the lower part. The heater is located in the center of the bottom wall of the chamber. The horizontal walls are adiabatic. The mathematical model is formulated in dimensionless variables «stream function – vorticity – temperature» and it is solved on the basis of the finite dif-

ference method. The cavity is filled with a Newtonian heat-conducting fluid, the viscosity of which depends on the temperature. Particular attention has been paid to the analysis of the influence of the geometric characteristics of the radiator. As a result, we have obtained the distribution of streamlines and isotherms inside the cavity, as well as the average temperature within the heated element.

Численные исследования в области конвективного теплообмена являются актуальным направлением разработок в течение долгого времени. Это связано с большим числом практических приложений подобных задач: системы охлаждения электронной техники и аппаратуры, разработка отопительных систем зданий и т.д. [1].

В настоящей работе проводится математическое моделирование процессов конвективного теплообмена в пористой замкнутой полости с тепловыделяющим теплопроводным источником энергии и медным оребрённым радиатором, расположенным в нижней части области. В качестве рабочей среды рассматривается ньютоновская теплопроводная жидкость с зависящей от температуры вязкостью по экспоненциальному закону.

Математическая модель для задачи естественной конвекции строится на основе системы уравнений Обербека-Буссинеска в безразмерной форме с переменными «функция тока – завихренность – температура» [2, 3]. Для решения определяющих уравнений был использован метод конечных разностей [4, 5].

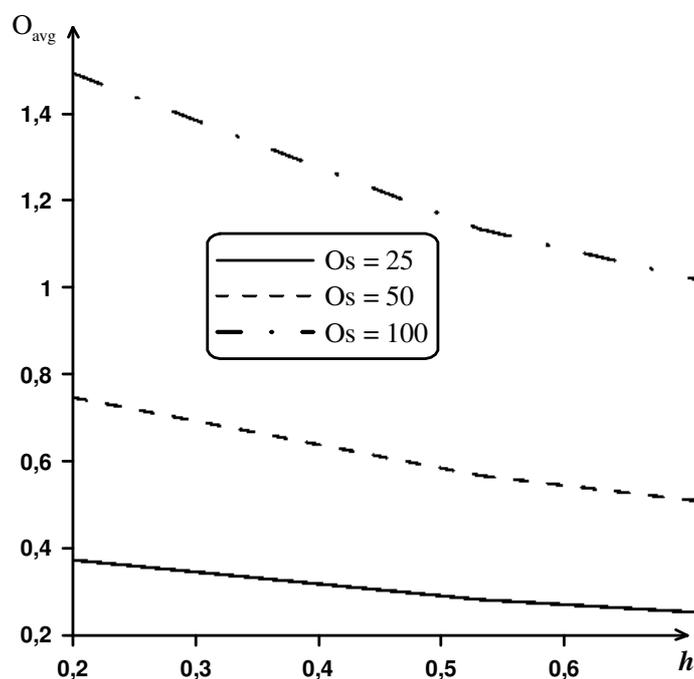


Рис. 1. Зависимость средней температуры от числа Остроградского и высоты ребёр

Численные исследования были проведены для разных значений определяющих параметров. Например, на *рис. 1* показано влияние изменения вы-

240

соты ребер радиатора  $h$  и безразмерного числа  $Os$ , отражающего интенсивность тепловыделения от нагревателя, на среднюю температуру в источнике при остальных фиксированных параметрах. В результате было обнаружено, что увеличение высоты ребер радиатора приводит к снижению температуры источника при любой интенсивности нагрева от источника.

Таким образом, варьирование геометрических характеристик медного оребренного радиатора в пассивной системе охлаждения тепловыделяющего элемента является хорошим инструментом для интенсификации теплопереноса в полости. Предполагается также, что использование жидкости с переменной вязкостью в качестве рабочей среды приведет к аналогичному результату.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ для молодых российских ученых (грант МД-821.2019.8).

### Литература

1. Fusegi T., Hyun J.M., Kuwahara K., Farouk B. A numerical study of threedimensional natural convection in a differentially heated cubical enclosure // International Journal of Heat and Mass Transfer 34 (1991) 1543–1557.
2. Kunes K. Dimensionless Physical Quantities in Science and Engineering. London: Elsevier, 2012.
3. Astanina M.S., Rashidi M.M., Sheremet M.A., Lorenzini G. Effect of porous insertion on convective energy transport in a chamber filled with a temperature-dependent viscosity liquid in the presence of a heat source term // International Journal of Heat and Mass Transfer 144 (2019). 118530.
4. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. М.: Наука, 1984.
5. Umavathi J.C. Influence of temperature-dependent conductivity on convective heat transfer in a vertical duct // International Journal of Fluid Mechanics Research 45(1) (2018). 75–91.

### References

1. Fusegi T., Hyun J.M., Kuwahara K., Farouk B. A numerical study of threedimensional natural convection in a differentially heated cubical enclosure // International Journal of Heat and Mass Transfer 34 (1991). 1543–1557.
2. Kunes K. Dimensionless Physical Quantities in Science and Engineering. London: Elsevier, 2012.
3. Astanina M.S., Rashidi M.M., Sheremet M.A., Lorenzini G. Effect of porous insertion on convective energy transport in a chamber filled with a temperature-dependent viscosity liquid in the presence of a heat source term // International Journal of Heat and Mass Transfer 144 (2019) 118530.
4. Paskonov V.M., Polezhaev V.I., Chudov L.A. Numerical Modeling of heat and mass Exchange Processes. Moscow: Nauka, 1984.
5. Umavathi J.C. Influence of temperature-dependent conductivity on convective heat transfer in a vertical duct // International Journal of Fluid Mechanics Research 45(1) (2018). 75–91.

# РАБОЧАЯ МОДЕЛЬ ФИЗИЧЕСКОГО ВАКУУМА И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

**М.В. Астафурова**

НИУ «Высшая школа экономики», Москва, Россия  
astafurova.maria@mail.ru

**Ключевые слова:** физический вакуум, моделирование, электромагнитное свойство, пространственно-электромагнитная модель, фундаментальные взаимодействия, энергия вакуума, природа массы.

**Аннотация.** Анализ накопленного массива экспериментальных данных приводит к выводу о существовании основополагающего свойства материи, которое в единстве с пространством составляет структурную основу материального континуума. Это свойство, получившее условное название «электромагнитного свойства», проявляется в каждом объекте и процессе физического мира, в частности, в формах электромагнитных волн, электрического, магнитного и электромагнитного полей, электрических зарядов. Таким образом, материальный мир следует рассматривать как пространственно-электромагнитный континуум. Вещество и физический вакуум – взаимосвязанные формы этого континуума. На основе новой модели определены составляющие внутренней энергии физического вакуума и проведен расчет их численных значений. Показано, что природа массы взаимосвязана со свойствами пространства и им обусловлена.

## WORKING MODEL OF PHYSICAL VACUUM AND ITS APPLICATIONS

**M. Astafurova**

Higher School of Economics, Moscow, Russian Federation  
astafurova.maria@mail.ru

**Keywords:** physical vacuum, modeling, electromagnetic property, spatial-electromagnetic model, fundamental interactions, vacuum energy, nature of mass.

**Abstract:** Analysis of the accumulated array of experimental data leads to the conclusion that there is a fundamental property of matter, which, in unity with space, forms the structural basis of the material continuum. This property, received the conventional name of the "electromagnetic property", manifests itself in every object and process of the physical world, in particular, in the forms of electromagnetic waves, electric, magnetic and electromagnetic fields, electric charges. Thus, the material world should be considered as a spatial-electromagnetic continuum. Substance and physical vacuum are interconnected forms of this continuum. Based on the new model, the components of the internal energy of the physical vacuum are determined and their numerical values are calculated. It is shown that the nature of mass is interconnected with the properties of space.

**Введение.** В работах [1, 2] показано, что, поскольку время является внешней характеристикой движения, этот физический параметр нельзя

рассматривать как атрибут материи, ее первичное фундаментальное свойство. Время не существует само по себе, в отрыве от движения, и его нельзя рассматривать в качестве активного действующего начала. Время не может являться источником волновых процессов и образования в природе тел вращения. Следовательно, существует некоторое, не являющееся временем, основополагающее свойство материи, которое в органическом единстве с пространством составляет структурную основу материального континуума. Этот континуум должен обладать внутренней потенцией, обеспечивающей самодвижение и генерацию волновых процессов.

**Цель и задача работы:** показать возможность построения рабочей модели материального континуума, отличной от модели «четырёхмерное пространство-время».

**Методология исследования:** системный анализ накопленного массива экспериментальных данных.

*Поиск основополагающего свойства материи, отличного от пространства и времени.* В поиске искомого свойства обратим внимание на такие явления, как электромагнитные волны, электрическое, магнитное и электромагнитное поле, электрический заряд. Эти явления, в том или ином виде, проявляются в каждом объекте и процессе физического мира. Очевидно, что все подобные явления обусловлены существованием фундаментального свойства материи, являющегося ее неотъемлемым атрибутом. Это свойство, с учетом характера его проявления, предложено называть «электромагнитным свойством». Предполагается, что данное свойство проявляется не только в явном виде (в формах электромагнитных волн и полей и электрических зарядов), но и в скрытых формах, недоступных для регистрации и измерения известными в настоящее время техническими средствами.

*Построение рабочей модели материального континуума.* Физический мир рассматривается как пространственно-электромагнитный континуум. Вещество и физический вакуум – взаимосвязанные формы этого континуума. Примем данную концепцию за основу и будем рассматривать физический вакуум как пространственно-электромагнитный векторный континуум. Свойства этого континуума характеризуют электромагнитный ( $\mathbf{Q}$ ) и пространственный ( $\mathbf{R}$ ) векторы. Вектор  $\mathbf{Q}$  характеризует электромагнитное свойство материи, вектор  $\mathbf{R}$  характеризует пространство (протяженность). Число составляющих вектора  $\mathbf{R}$  ( $f_R$ ) равно мерности наблюдаемого пространства ( $f_R = 3$ ). Число составляющих вектора  $\mathbf{Q}$  ( $f_Q$ ) соответствует двум реально существующим видам электрических зарядов и магнитных полюсов ( $f_Q = 2$ ). С учетом тезиса о всеобщности волнового движения физический мир рассматривается как совокупность волновых объектов (осцилляторов). Наименьший природный осциллятор является элементарной ячейкой физического вакуума. Взаимодействие природных волновых объектов

приводит к формированию иерархических структур. Каждой структурной иерархии соответствует определенное силовое взаимодействие.

*Приложения модели.* На основе пространственно-электромагнитной модели выведены уравнения, связывающие параметры фундаментальных взаимодействий со свойствами физического вакуума [3]. Под свойствами физического вакуума понимается его пространственно-электромагнитная природа и мерность его структурных компонентов. Расчетные значения параметров находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными. Определены составляющие внутренней энергии физического вакуума и проведен расчет их численных значений [4]. Показано, что природа массы взаимосвязана со свойствами пространства и им обусловлена.

**Заключение.** Отказ от пространственно-временной модели и переход к пространственно-электромагнитной модели материального континуума позволяет решить ряд актуальных проблем теоретической физики, ранее не поддающихся решению.

### Литература

1. Станюкович К.П., Колесников С.М., Московкин В.М. Проблемы теории пространства, времени и материи. М.: Атомиздат. 1968. 173 с.
2. Георгиева М.И. О физической реальности пространственно-временного континуума // Труды Всероссийской астрономической конференции «ВАК-2007». Казань: Изд-во КГУ, 2007. С. 416–418.
3. Астафурова М.В. О существовании фундаментального свойства физического мира, отличного от пространства и времени // Новые идеи в философии. 2014. Вып. 1 (22). Т. 2. С. 164–172.
4. Астафуров В.И. Построение функциональной зависимости, связывающей пространственные параметры фундаментальных иерархических структур со свойствами физического вакуума // Ядерная физика и инжиниринг. 2013. Т. 4. № 9–10. С. 862–866.
5. Астафурова М.В., Добрецов С.Л., Астафуров В.И. Пространственно-электромагнитная модель физического вакуума и ее приложения // Забабахинские научные чтения (2–6 июня 2014, ВНИИТФ, Снежинск). Опубл. в журн.: ФЭН-НАУКА. 2014. № 11 (38). С. 5–12.
6. Астафурова М.В., Маренный А.М., Семёнов С.Ю. Моделирование взаимосвязи параметров физического вакуума и расчет его внутренней энергии // Труды XI Всерос. науч. конф. с междунар. участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (27–30 мая 2019, Самара). Т. 1. Самара: СамГТУ, 2019. С. 217–220.

### References

1. Stanyukovich K.P., Kolesnikov S.M., Moskovkin V.M. Problems of the theory of space, time and matter. Moscow: Atomizdat, 1968. 173 p. (Rus.)
2. Georgieva M.I. On the physical reality of the space-time continuum // Transactions of the All-Russian Astronomical Conference [Trudy Vserossiyskoy astronomicheskoy konf. «VAK-2007»]. Kazan': KSU Publishing House, 2007. Pp. 416–418. (Rus.)
3. Astafurova M.V. On the existence of a fundamental property of the physical world, different from space and time // New ideas in philosophy [Novyye idei v filosofii]. 2014. Is. 1 (22). Vol. 2. Pp. 164–172. (Rus.)

4. *Astafurov V.I.* Construction of a functional relation between the spatial parameters of fundamental hierarchical structures and the properties of physical vacuum // Nuclear Physics and Engineering [Yadernaya fizika i inzhiniring]. 2013. Vol. 4. N 9–10. Pp. 862–866. (Rus.)

5. *Astafurova M.V., Dobretsov S.L., Astafurov V.I.* Spatial-electromagnetic model of physical vacuum and its applications // Proceedings of the 12th International Conference "Zababakhin scientific talks. ZST-2014" (June 2–6, 2014, VNIITF, Snezhinsk). Publ. in journal: FӨN-SCIENCE [FӨN-NAUKA]. 2014. N 11 (38). Pp. 5–12. (Rus.)

6. *Astafurova M.V., Marennyy A.M., Semenov S.Yu.* Modeling the relationship of the parameters of the physical vacuum and the calculation of its internal energy // Proceedings of the 11th All-Russian Scientific Conference "Mathematical Modeling and Boundary Value Problems" (May 27–30, 2019, Samara). Vol. 1. Publishing house of Samara State Technical University, 2019. Pp. 217–220. (Rus.)

## ФТОРИРОВАНИЕ ПОРОШКОВ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

**А.Р. Ахмедова, В.Н. Горбачева, А.В. Шваб**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
annsunny2013@gmail.com

**Ключевые слова:** вольфрам, фтор, фторирование, математическая модель, численный метод.

**Аннотация.** В работе представлено математическое моделирование процесса получения гексафторида вольфрама на основе протекания реакции между порошком вольфрама и фтором в химическом реакторе, рабочей зоной которого является цилиндрическая камера. Моделирование этого явления проводится на основе решения уравнений переноса вихря, теплоты и вещества в переменных «функция ток–вихрь». В результате численного решения задачи найдены распределения полей вихря, концентрации и температуры, радиальной и аксиальной составляющих вектора скорости. Достоверность полученных результатов подтверждается сравнением с данными, полученными в переменных «скорость–давление».

## FLUORINATION OF REFRACTORY METAL POWDERS

**A. Akhmedova, V. Gorbacheva, A. Shvab**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
annsunny2013@gmail.com

**Keywords:** tungsten, fluorine, fluoridation, mathematical model, numerical method.

**Abstract.** The paper presents a mathematical modeling of the process of obtaining tungsten fluoride on the basis of the reaction between tungsten powder and fluorine in a chemical reactor. The working area of the reactor is a cylindrical chamber. The numerical solution is based on the solution of the equations of vortex, heat and matter transport in the variables «current function-vortex». As a result of the numerical solution of the problem, the distributions of the vortex fields, concentration and temperature, radial and axial components of the

velocity vector were found. The dependability of the obtained results is confirmed by comparison with the results of the analysis obtained in the variables «speed-pressure».

В настоящее время производство уникальных изделий и покрытий из тугоплавких металлов в ряде случаев возможно только при использовании метода, основанного на осаждении порошков металлов из парогазовой фазы с помощью восстановления гексафторида водородом. Необходимый для этого процесса гексафторид вольфрама предварительно получают фторированием порошка вольфрама в химическом аппарате. В данной работе осуществляется моделирование процессов аэродинамики и тепломассопереноса в химическом аппарате, предназначенного для проведения реакции фторирования порошков тугоплавких металлов [1].

Рабочей зоной химического реактора является цилиндрическая камера с нагреваемой подложкой. Гетерогенная химическая реакция происходит за счет прохождения газообразного фтора над слоем порошка вольфрама, расположенного на подложке [4].

Целью работы является исследование аэродинамики и тепломассопереноса на процесс получения гексафторида вольфрама. Впуск газов в рабочую зону подводится аксиально через верхнее входное отверстие со средней скоростью  $U_{z0}$  и температурой  $T_0$ . Вывод газов осуществляется также аксиально, через два нижних выходных отверстия.

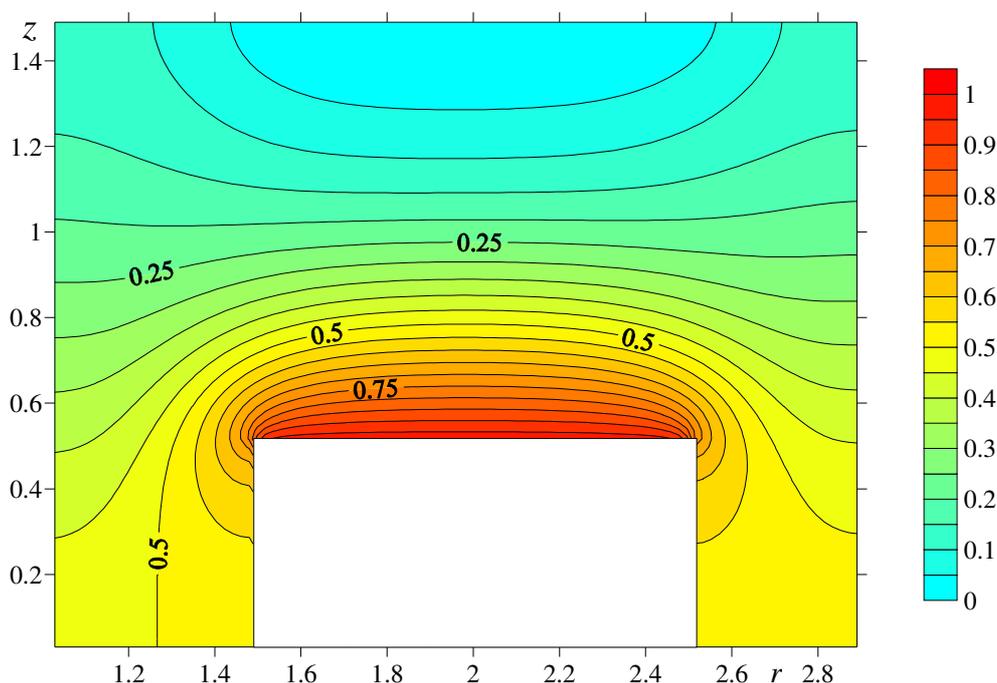


Рис. 1. Распределение изолиний температуры при параметрах течения:  
 $Gr=0$ ,  $Pr=0.9$ ,  $Re=5$

Процесс фторирования проходит при малых скоростях смеси газов для полноты проведения химической реакции, поэтому можно считать среду

246

несжимаемой. Численное решение задачи основывается на решении уравнений переноса вещества и теплоты [2]. Решение уравнений Навье–Стокса проводилось в переменных «функция ток–вихрь» [3]. Учет влияния изменения плотности проводился на основе подхода Буссинеска, который основывается на постоянстве плотности в инерционных слагаемых, а изменение плотности за счет изменения температуры в силе Архимеда учитывается термической подъемной силой.

В результате численного решения было получено распределение полей концентрации, температуры, вихря и радиальной и аксиальной составляющих вектора скорости, а также показано влияние геометрических параметров и критериев Рейнольдса, Грасгофа и Прандтля на картину течения бинарной смеси. Достоверность численного решения проверялась сравнением результатов решений в переменных «функция ток–вихрь» и «скорость–давление».

Разработанная математическая модель может быть использована для оптимизации процесса фторирования в химических реакторах, а также для получения новой информации о процессах переноса массы, импульса и энергии.

### Литература

1. Красовский А.И., Чужко Р.К., Трегулов В.Р., Балаховский О.А. Фторидный процесс получения вольфрама. М.: Наука, 1981. 261 с.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: учеб. для вузов. 7-е изд., испр. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
3. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат. 1984. 152 с.
4. Ахмедова А.Р., Горбачева В.Н., Шваб А.В. Моделирование аэродинамики и концентрационной диффузии в химическом аппарате // Инновации в атомной отрасли: проблемы и решения: материалы науч.-практ. конф. Северск, 2019. М.: Изд-во НИЯУ МИФИ, 14 с.

### References

1. Krasovskiy A.I., Chuzhko R.K., Tregulov V.R., Balakhovskiy O.A. Ftoridnyy protsess polucheniya volframa [Tungsten Fluoride Process]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 261 p.
2. Loytsyanskiy L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza: ucheb. dlya vuzov [Fluid and gas mechanics]. Moscow, Drofa Publ., 2003, 840 p.
3. Patankar S. Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti [Numerical methods for solving heat transfer and fluid dynamics problems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 152 p. (in Rus.)
4. Akhmedova A.R., Gorbacheva V.N., Shvab A.V. Modelirovaniye aerodinamiki i kontsentratsionnoy diffuzii v khimicheskom apparate [Modeling of aerodynamics and concentration diffusion in a chemical apparatus] // Proc. Conf. “Innovatsii v atomnoy otras-li: problemy i resheniya”, Seversk, 2019. Moscow, NRNU MEPhI Publ. Pp. 14.

# ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИИ ГЛУБИННОЙ СТРУКТУРЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ СИБИРСКОГО КРАТОНА

**А.Ж. Ахметов, И.Ю. Смолин**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
ayan.akhmetov93@gmail.com

**Ключевые слова:** численное моделирование, земная кора, верхняя мантия, напряженно-деформированное состояние.

**Аннотация.** В данной работе выполнено численное исследование распределения напряжений и деформации в глубинной структуре земной коры и верхней мантии на территории Якутско-Вилуйской крупной изверженной провинции, входящей в область Сибирского Кратона. В рамках решения данной проблемы получена двумерная компьютерная модель глубинной структуры с использованием геологического профиля «Кратон – 1980». Для описания прочностных свойств использована модель «Cratonic jelly sandwich». Было выявлено, что накопление пластической деформации происходит на глубине 40–45 км. Полосы локализованных пластических деформаций сосредоточены в районах Линденской впадины и Хапчагайского поднятия, где расположены залежи нефти и газа. Характер распределения сдвиговых напряжений определяется кривизной слоёв земной коры. Распределение горизонтальных напряжений зависит от принятой модели распределения прочностных свойств земной коры по глубине.

## NUMERICAL STRESS AND STRAIN ANALYSIS OF THE DEEP STRUCTURE OF EARTH'S CRUST AND UPPER MANTLE OF SIBERIAN CRATON

**A. Akhmetov, I. Smolin**

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
ayan.akhmetov93@gmail.com

**Keywords:** Numerical simulation, earth's crust, upper mantle, state of stress and strain.

**Abstract.** In this work, a numerical investigation of the stress and strain distribution in the deep structures of earth's crust and upper mantle in the Yakutsk-Vilyui large igneous province that is a part of the Siberian Craton was realized. To solve the problem, a two-dimensional computer model of the deep structure was constructed using the geological profile "Craton-1980". The "Cratonic jelly sandwich" model was used to describe the strength properties. It was found that the accumulation of plastic strain occurs at the depth of 40–45 km. The bands of localized plastic strains are concentrated in the areas of the Linden depression and the Khapchagai uplift where oil and gas deposits are located. 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 adopted model of the the lithosphere strength properties distribution as a function of depth.

В настоящее время ввиду бурного развития компьютерных технологий стало возможным исследование геотектонических процессов с помощью численного моделирования. В основе понимания природных явлений, таких как субдукция, растяжения, сжатия и сдвиги лежит фундаментальное представление о движениях континентальных плит, которые в свою очередь возникают в результате глубинных процессов мантийного слоя Земли [1].

Целью данной работы является исследование геотектонических процессов на территории Якутско-Вилуйской среднепалеозойской крупной изверженной провинции (КИП), которую в ряде источников называют Вилуйской синеклизой, играющую важнейшую роль в анализе и предвидении техногенных процессов, возникающих во время ведения подземных работ. Для того чтобы решить данную проблему в первую очередь необходимо создать структурную модель исследуемого участка. Далее используя эту геометрическую модель необходимо провести численное моделирование процесса растяжения и проанализировать результаты.

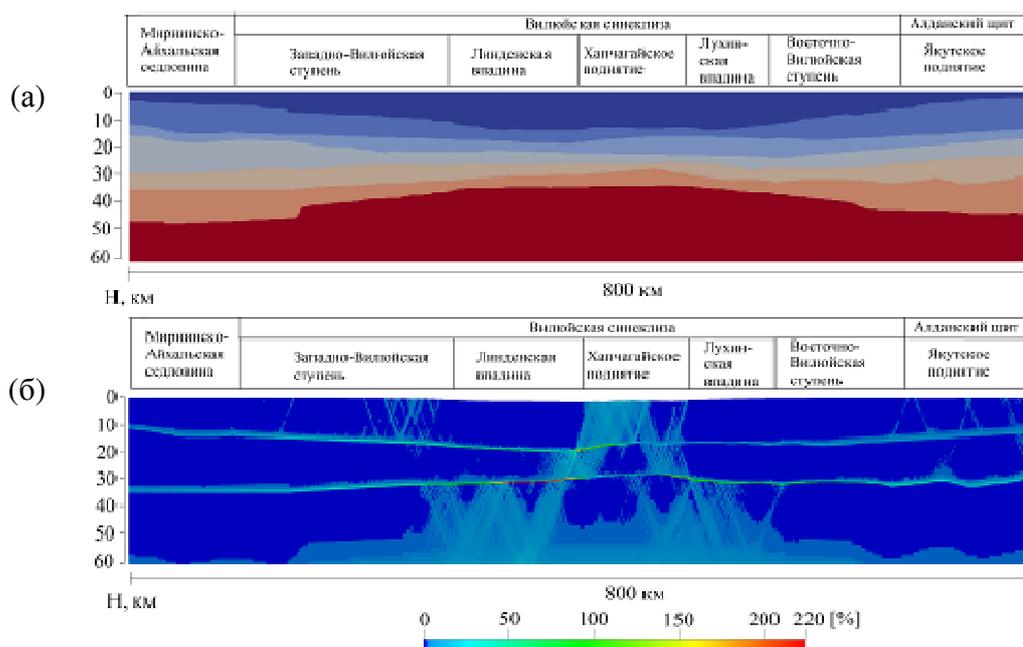


Рис. 1. Компьютерная двумерная структурная модель (а), локализация неупругой деформации участка Якутско-Вилуйской КИП на основе геологического профиля (б) «Кратон-1980»

На рис 1, а представлена геометрическая модель участка Якутско-Вилуйской КИП, построенная нами на основе геологического профиля «Кратон-1980», проходящего по данной области и полученного методом глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) сотрудниками ГЕОНа за период 70–80-х гг. XX века [2, 3].

В рамках представленной работы были использованы данные по структурным моделям слоёв земной коры и верхней мантии до глубин порядка

60 км. Структурные особенности профиля заключаются 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 выделяются 5 слоёв с неоднородными физико-механическими свойствами.

Для описания прочностных 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].

Полученные в результате моделирования данные о распределении интенсивности неупругой деформации показаны на *рис. 1, б*. В результате анализа выявлено, что накопления пластической деформации происходит на глубине 40–45 км. Полосы локализованных пластических деформаций сосредоточены в районах Линденской впадины и Хапчагайского поднятия, в которых отмечаются залежи нефти и газа.

Характер распределения сдвиговых напряжений определяется кривизной слоёв земной коры. Распределение горизонтальных напряжений зависит от модели распределения прочностных свойств земной коры.

Фундаментальная значимость полученных результатов заключается в том, что они могут быть полезны при исследовании геологических процессов в земной коре. Оценка напряженного состояния земной коры необходима при ведении горных работ в ходе добычи полезных ископаемых. Это обуславливает прикладную значимость полученных результатов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-90034.

#### Литература

1. *Вегенер А.* Происхождение материков и океанов / пер. с нем. П.Г. Каминского; под ред. П.Н. Кропоткина. Л.: Наука, 1984. 285 с.
2. *Козловский Е.А.* Комплексная программа изучения земных недр // Советская геология. 1982. № 9. С. 3–12
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. Pp. 1402–1443.
5. *Wilkins M. L.* Computer Simulation of Dynamic Phenomena. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 246 p.

## References

1. *Wegener A.* The Origin of Continents and Oceans. Dover, New York, 1967. 256 p.
2. *Kozlovsky E.A.* Complexed program of investigation of the earth's interior // Soviet geology. 1982. №9. Pp. 3–12 (in Rus.)
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. Electronic edition. SPb: VSEGEI, 2013. Pp. 21–22. (in Rus.)
4. *Burov E.B.* Rheology and strength of lithosphere // Marine and Petroleum Geology. 2011. 28. Pp. 1402–1443.
5. *Wilkins M. L.* Computer Simulation of Dynamic Phenomena. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 246 p.

## ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ТЕЛА НА ПАРАМЕТРЫ ИЗГИБНО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ПРИ ПОДЛЁДНОМ ДВИЖЕНИИ

**Н.О. Баурин, В.Л. Земляк**

Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема, Россия  
vellkom@list.ru

**Ключевые слова:** лед, погруженное тело, изгибно-гравитационные волны.

**Аннотация.** При решении задачи движения подводного судна вблизи нижней поверхности ледяного покрова корпус субмарины, имеющий сложную геометрию, обычно заменяют на тело вращения упрощенной формы при сохранении основных характеристик. В свою очередь форма поперечного сечения корпуса может оказывать существенное влияние на параметры генерируемых изгибно-гравитационных волн от движения субмарины. В работе выполнено экспериментальное исследование влияния формы поперечного сечения погруженного тела на прогиб и длину изгибно-гравитационных волн.

## INFLUENCE OF FORM OF THE CROSS SECTION SUBMERGED BODY ON THE PARAMETERS FLEXURAL-GRAVITY WAVES IN THE ICE MOTION

**N. Baurin, V. Zemlyak**

Sholom-Aleichem Priamursky State University, Russian Federation  
vellkom@list.ru

**Keywords:** ice, submerged body, flexural-gravitational waves.

**Abstract.** When solving the problem of motion of a submarine vessel near the ice surface the hull of a submarine, having a complex geometry, is usually replaced by the body rotation

of a simplified form while preserving its main characteristics. In its turn, the form of the cross section of the hull can have a significant influence on the parameters of flexural gravity waves generated by submarine vessel motion. The given paper presents the experimental research of influence of a form of cross section on the deflection and the length of flexural gravity waves.

В работе [1] выполнено решение линейной стационарной задачи об обтекании сферы равномерным потоком невязкой жидкости под ледяным покровом, битым льдом, мембраной, а также под свободной поверхностью. Коробкин [2] рассматривает нелинейную задачу о нестационарных волнах, вызванных погруженным эллиптическим цилиндром, движущимся под ледяным покровом. Хейсиным [3] рассмотрена плоская стационарная задача о движении вихря под слоем битого льда. В работе [4] при помощи методов механики сплошных сред изучен процесс разрушения ледяного покрова под действием динамической нагрузки. В теоретических работах погруженные тела имеют круговую форму поперечного сечения, однако у современных подводных судов она может иметь значительно более сложную форму.

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния коэффициента полноты мидель-шпангоута на параметры генерируемых изгибно-гравитационных волн в ледяном покрове.

Для проведения модельных экспериментов было изготовлено три модели подводных судов в масштабе  $\lambda=1:120$ , имеющих одинаковое водоизмещение, относительное удлинение и длину цилиндрической вставки, но различный коэффициент полноты по мидель-шпангоуту. Форма поперечного сечения изменялась от круговой до практически прямоугольной. Модели изготавливались методом послойной печати на 3D принтере.

Экспериментальные исследования движения моделей подводных судов под поверхностью ледяного покрова проводились в ледовом бассейне лаборатории ледотехники Приамурского государственного университета имени Шолом-Алейхема (Россия, г. Биробиджан).

Ввиду отсутствия в бассейне рефрижераторной установки, модельное поле приготавливалось с помощью естественного охлаждения, а эксперименты проводились в ночное время в зимний период года (декабрь 2018 г. – февраль 2019 г.). Обеспечение постоянного температурного режима внутри помещения, где расположена чаша бассейна, благодаря управляемым системам терморегуляции и вентиляции позволяло приготавливать ровное модельное поле льда толщиной не менее 2 мм без проталин в течение 60 мин при постоянном температурном режиме. Для перемещения моделей использовалась управляемая необитаемая буксировочная тележка (рис. 1).

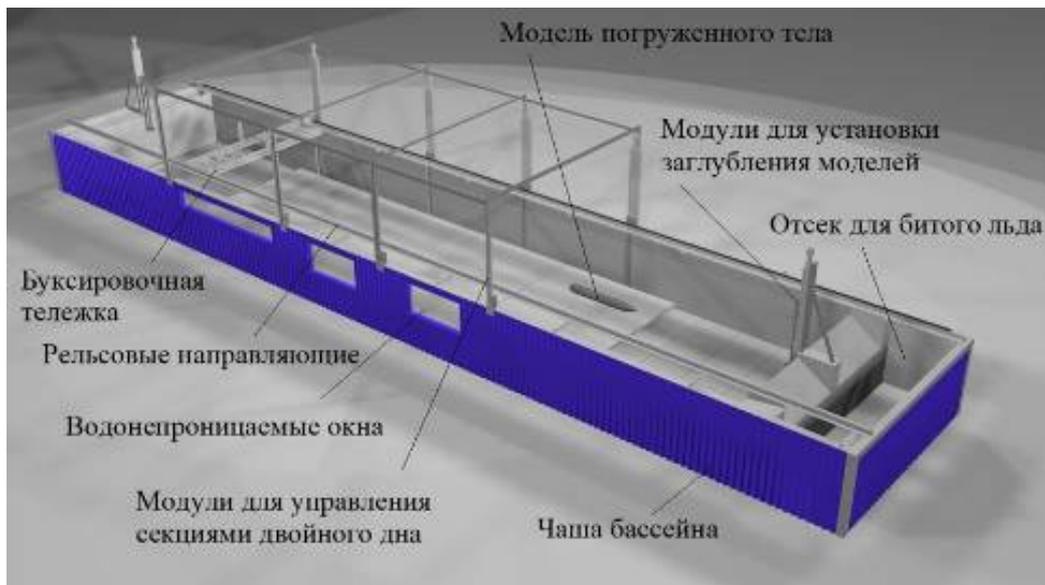


Рис. 1. Схема ледового бассейна

Моделирование естественного ледяного покрова выполнялось с частичным выполнением условий подобия [5]. В качестве критерия разрушения модельного льда использовался коэффициент  $\alpha$ , показывающий зависимость между углом наклона ледяной пластины и ее разрушением. Физико-механические свойства льда определялись путем испытания специально приготовленных в модельном поле консолей П-образной формы.

В результате экспериментов определены параметры изгибно-гравитационных волн. Установлено, что при движении моделей из-за разности давлений и скорости обтекания носовой, центральной и кормовой части тела начинает существенно проявляться влияние вертикальной силы, что приводило к изменению заглубления моделей. На докритическом режиме движения расстояние между моделью и льдом уменьшалось, а при сверхкритическом начинало значительно возрастать.

Форма сечения оказывала влияние и на характер образования трещин в ледяном покрове. Уменьшение отношения высоты корпуса к его ширине приводило к снижению ледоразрушающей способности изгибно-гравитационных волн. Плохо обтекаемая форма тела, увеличивала сопротивление формы корпуса, что влияло на распределение давления воды на поверхности корпуса судна и росту прогибов льда, увеличивая эффективность измельчения льдин. Значительное снижение ледоразрушающей способности изгибно-гравитационных волн происходило с ростом величины заглубления погруженного тела.

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

## Литература

1. *Sturova I.V.* The motion of a submerged sphere in a liquid under an ice sheet // Applied math and mechanics. 2012. Vol. 76. No 3. Pp. 406–417.
2. *Korobkin A.A., Kostukov V.K., Makarenko N.I.* The motion of elliptic cylinder under ice cover // Vestnik, Quart. J. of Novosibirsk State Univ., Series: Math., mech. and informatics. 2012. Vol. 12. No 4. Pp. 76–81.
3. *Хейсин Д.Е.* Динамика ледяного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 216 с.
4. *Орлова Ю.Н.* Исследование процесса подрыва заснеженного ледяного покрова эмульсионной взрывчаткой // Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» 26–28 ноября 2018 г.: Материалы конференции / под ред. М.Ю. Орлова. Томск: Изд-во «Красное знамя». 2019. С. 66–69.
5. *Козин В.М., Онищук А.В., Марьин Б.Н.* Ледоразрушающая способность изгибно-гравитационных волн от движения объектов. Владивосток: Дальнаука, 2005. 191 с.

## References

1. *Sturova I.V.* The motion of a submerged sphere in a liquid under an ice sheet // Applied math and mechanics. 2012. Vol. 76. No 3. Pp. 406–417.
2. *Korobkin A.A., Kostukov V.K., Makarenko N.I.* The motion of elliptic cylinder under ice cover // Vestnik, Quart. J. of Novosibirsk State Univ., Series: Math., mech. and informatics. 2012. Vol. 12. No 4. Pp. 76–81.
3. *Kheisin, D.E.* Dynamics of Ice Cover, Gidrometeoizdat, Leningrad, 1967. 216 p.
4. *Orlova Yu.N.* Snow-covered ice subjected explosive loading. Under results'2019 // All-Russian Youth Scientific Conference "Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics", November 26–28, 2018: The conference proceedings / ed. M.Yu. Orlov. Tomsk: "Izdatelstvo "Krasnoe znamya", 2019. Pp. 66–69.
5. *Kozin V.M., Onishchuk A.V., Mar'in B.N. et al.* The Ice-Breaking Capacity of Flexural-Gravity Waves Produced by Motion of Objects, Dal'nauka, Vladivostok, 2005. 191 p.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ГОРЕНИЯ ПО ПОВЕРХНОСТИ СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА ИЗ ДРЕВЕСИНЫ

**Е.Н. Голубничий<sup>1</sup>, Д.П. Касымов<sup>1,2</sup>, М.В. Агафонцев<sup>1,2</sup>,  
П.С. Мартынов<sup>1,2</sup>, В.В. Перминов<sup>1</sup>, В.В. Рейно<sup>2</sup>,**

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

<sup>2</sup> Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Россия

golubnichii\_egor@mail.ru

**Ключевые слова:** огнестойкость древесины, огнезащитный состав, инфракрасная термография, строительный материал из древесины, горение, пожарная безопасность.

**Аннотация.** В работе представлены результаты экспериментального исследования процесса горения по поверхности вертикально установленного щита из древесного материала (ДСП, ОСП, фанера) при различных условиях внешней среды. В результате использования инфракрасной камеры были получены последовательности термограмм, характеризующих тепловую картину на поверхности образца при вертикальном горении, определена скорость распространения волны горения для случая лабораторного эксперимента и огневых испытаний в условиях открытой местности.

## EXPERIMENTAL STUDY OF VERTICAL FIRE SPREAD ON A SURFACE OF WOOD CONSTRUCTION MATERIAL

Y. Golubnichii<sup>1</sup>, D. Kasymov<sup>1,2</sup>, M. Agafontsev<sup>1,2</sup>, P. Martynov<sup>1,2</sup>,  
V. Perminov, V. Reyno<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Russian Federation  
golubnichii\_egor@mail.ru

**Keywords:** fire behavior of wood, fire retardant, infrared thermography, timber, combustion, fire safety.

**Abstract.** The paper represents the experimental study of combustion over the surface of a vertically-mounted oriented wood-based panels (plywood, chip-board and oriented strand board) under different environmental conditions. The IR thermography was used as a diagnostic method. An infrared camera JADE J530SB was used to obtain the sequences of thermograms characterizing the heat flow pattern on the surface of the sample during vertical combustion and determine the velocity of the combustion wave under laboratory and field conditions. In addition, during the field tests the change in the angle of the combustion front was estimated depending on time.

В настоящее время при исследовании процессов горения и природных пожаров активно применяются современные методы инфракрасной (ИК) диагностики. В частности, в работах [1–3] экспериментально проанализировано влияние различных огнезащитных составов на пожароопасные свойства хвойных и лиственных пород древесины с применением методов ИК-диагностики. Разработка на основе полученных данных методики испытания древесных строительных конструкций на огнестойкость и пожарную опасность с применением термографии даст возможность уменьшить экономическую составляющую при проведении подобных работ при одновременном повышении оперативности получения данных и разрешающей способности.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования процесса горения по поверхности вертикально установленного щита из ориентированно-стружечной плиты, древесно-стружечной плиты и фанеры при различных условиях внешней среды.

**Лабораторный эксперимент.** Исследования проводились на лабораторном испытательном комплексе. Экспериментальное оборудование включало: инфракрасная камера JADE J530SB, с длиной волны 2.5–2.7 мкм, позволяющего регистрировать температуру в диапазоне 300–1500 °С; видеокамера для оценки распространения фронта горения.

В качестве лесного горючего материала бралась хвоя сосны. В момент проведения экспериментов влагосодержание хвои составило 6%. Масса лесного горючего материала равнялась 150 г.

Лабораторный эксперимент проходил следующим образом: подложку с хвоей, расположенную перед образцом древесного строительного материала, установленного вертикально к подложке, поджигали. Съемка поверхности образцов древесных строительных материалов, осуществлялась с помощью инфракрасной камеры.

Теплового воздействия от сгорания насыпки хвои сосны массой 150 г достаточно для возникновения пламени на поверхности образца с последующим устойчивым горением. Получены термограммы мгновенного распределения температуры на поверхности образцов, зафиксированы теплонапряженные участки.

На основании полученных данных скорость распространения волны горения по результатам ИК-диагностики составила  $6.83 \times 10^{-4}$  м/с.

**Огневые испытания на полигоне.** Эксперименты проводились на территории Базового экспериментального комплекса Института оптики атмосферы СО РАН.

В качестве образцов древесных строительных материалов также использовались щиты из ОСП-плиты, ДСП и фанеры, имеющие размеры 0.6×1 м. На *рис. 1* представлен установленный образец.



Рис. 1. Фотографии, полученные при натуральных огневых испытаниях ОСП-плиты

В результате были получены последовательности термограмм, характеризующих тепловую картину на поверхности образца при вертикальном горении. Несмотря на высокий ветер с порывами до 15 м/с, срыва пламени и затухания образцов не наблюдалось, процесс горения протекает очень активно. Кроме того, была произведена оценка изменения угла наклона фронта горения с течением времени. Отмечается, что изменение угла наклона фронта имеет линейный характер на протяжении всего процесса горения.

**Выводы.** В результате проведения экспериментального исследования вертикального горения образца древесного строительного материала было получено:

1. Распределение температуры по поверхности основных материалов из древесины, активно использующихся в строительстве и отделке.

2. С применением ИК-диагностики оценена скорость распространения вертикального фронта горения в лабораторных и естественных условиях.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-00232).

#### Литература/References

1. *Grishin, A.M., Filkov, A.I., Loboda, E.L., Reyno, V.V., Kozlov, A.V., Kuznetsov, V.T., Kasymov, D.P., Andreyuk, S.M., Ivanov, A.I.* A Field experiment on grass fire effects on wooden constructions and peat layer ignition. *Int. J. of W. Fire* 23, 445–449 (2014).
2. *O'Brien, J.J., Loudermilk, E.L., Hornsby, B., Hudak, A.T., Bright, B.C., Dickinson, M.B., Hiers, J.K., Teske, C., Ottmar, R.D.* High-resolution infrared thermography for capturing wildland fire behaviour: RxCADRE 2012. *Int. J. of W. Fire* 25, 62–75 (2016).
3. *Valero, M.M., Jimenez, D., Butler, B., Mata, C., Rios, O., Pastor, E., Planas, E.* On the use of compact thermal cameras for quantitative wildfire monitoring. *Advances in forest fire research*, 1077-1086 (2018).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ

**В.Н. Горбачева, А.Р. Ахмедова, А.В. Шваб**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
wika.gorbacheva@mail.ru

**Ключевые слова:** гексафторид вольфрама, вольфрам, численное моделирование, горизонтальный канал.

**Аннотация.** В работе рассматривается метод получения вольфрама путем осаждения его из парогазовой фазы с помощью восстановления его хлоридов или фторидов водородом при нагреве этой смеси газов. Численное моделирование тепломассопереноса и аэродинамики проводится в химическом реакторе, представляющим собой камеру,

внутри которой располагается горизонтально подложка в виде круглой трубки, на которой происходит гетерогенная химическая реакция. В результате численного исследования было выявлено влияние геометрических и режимных параметров на распределение полей температуры, концентрации и составляющих вектора скорости. Достоверность полученных результатов подтверждается сравнением решения задачи, полученным в переменных «скорость–давление» и в переменных «вихрь–функция тока».

## MODELING OF AERODYNAMICS AND MASS TRANSFER IN A CHEMICAL REACTOR

V. Gorbacheva, A. Akhmedova, A. Shvab

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
wika.gorbacheva@mai.ru

**Keywords:** wolfram hexafluoride, wolfram, numerical modeling, horizontal channel.

**Abstract.** The work simulates the process of obtaining tungsten by deposition ingesting from the vapor gas mixture. The work carried out numerical simulations of aerodynamics and heat-carrying in a cylindrical chemical reactor located horizontally. In the course of the numerical solution of the problem, the distributions of the fields of temperature, concentration and components of speed are obtained. The study revealed the effect of geometric and mode parameters on the above fields. The reliability of the results is confirmed by comparison with the results of the decision obtained in the "speed-pressure" variables.

С развитием химической, космической и атомной промышленности усилилась потребность в использовании тугоплавких металлов. Их химические соединения с другими металлами имеют низкую плотность и обладают высокой жаропрочностью. Коррозионная стойкость тугоплавких металлов, также используется в атомной и космической отрасли. Например, покрытия из ниобия обладает высокой стойкостью к окислению. Кроме того, покрытия на его основе являются износостойкими. Одним из самых востребованных в разных областях промышленности тугоплавких металлов является вольфрам. Однако из-за тугоплавкости этого металла получение вольфрама и придание изделиям из него нужной формы весьма затруднено. В химической технологии наиболее перспективным методом является метод получения вольфрама путем осаждения его из парогазовой фазы с помощью восстановления его хлоридов или фторидов и нагрева этой смеси газов в рабочей камере химического реактора [1]. В данном исследовании рабочая зона химического реактора представляет собой коаксиальный цилиндрический канал, расположенный горизонтально. В центре размещена нагреваемая подложка, имеющая форму стержня. Под действием температуры на поверхности подложки проходит гетерогенная химическая реакция [2]. Высвобожденный металл оседает, а остальные продукты химической реакции выходят из реактора. Сверху и снизу канала имеются воронки, через которые осуществляется впуск стехиометриче-

ской смеси гексафторида вольфрама и выход газа, образованного в ходе химической реакции. Горизонтальное расположение канала позволяет получить более равномерное распределение металла на подложке, в силу ее вращения вокруг оси [3].

Целью работы является исследование процессов аэродинамики и тепломассопереноса. Также проводится моделирование этих процессов и исследование влияния на них режимных параметров.

Рассматривается случай небольших скоростей при описании динамики газов в химическом реакторе, поэтому при движении газов смесь рассматривается как несжимаемая среда. Математическая модель рассматриваемого процесса была получена на основе системы уравнений Навье–Стокса, переноса теплоты, вещества и уравнения неразрывности [4]. В работе численное моделирование аэродинамики и тепломассопереноса бинарной смеси проводилось в полярной системе координат в физических переменных на разнесенной разностной сетке, а также в переменных «функция тока–вихрь». В работе рассматривался случай стационарного решения задачи, который достигался с помощью решения нестационарной задачи эволюционным методом. Система уравнений Навье–Стокса решалась известным методом физического расщепления полей скорости и давления. При решении нестационарных уравнений переноса использовалась неявная обобщенная схема чередующихся направлений в «дельта» форме. Конвективные и диффузионные слагаемые в уравнениях переноса представлялись в разностной форме с помощью экспоненциальной схемы [5].

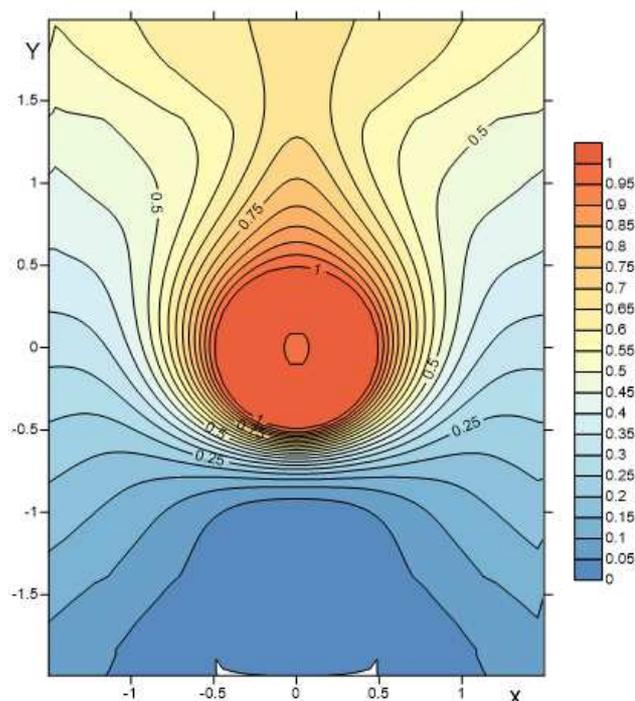


Рис. 1. Распределение изолиний температуры при параметрах течения:  $Gr=1$ ,  $Pr=1$ ,  $Pr_d=1$ ,  $Re=10$

В результате численного исследования было выявлено влияние критериев Рейнольдса, Грасгофа, Прандтля, Шмидта и геометрических разме-

ров химического реактора на распределение полей температуры, концентрации и составляющих вектора скорости. Достоверность полученных численных результатов подтверждается сравнением решений, полученных в переменных «скорость–давление» и в переменных «вихрь–функция тока».

### Литература

1. Красовский А.И., Чужко Р.К., Трегулов В.Р., Балаховский О.А. Фторидный процесс получения вольфрама. М.: Наука, 1981. 261 с.
2. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физ-мат. лит., 1959, 699 с.
3. Ахмедова А.Р., Горбачева В.Н., Шваб А.В. Моделирование аэродинамики и концентрационной диффузии в химическом аппарате // Инновации в атомной отрасли: проблемы и решения: материалы науч.-практ. конф. Северск, 2019. М.: НИЯУ "МИФИ", с. 14.
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: учеб. для вузов. 7-е изд., испр. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
5. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / пер. с англ. М.: Энергоатомиздат. 1984. 152 с.

### References

1. Krasovskiy A.I., Chuzhko R.K., Tregulov V.R., Balakhovskiy O.A. Ftoridnyy protsess polucheniya volframa [Tungsten Fluoride Process]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 261 p.
2. Levich V.G. Physicochemical Hydrodynamics. Moscow: Phys-math. lit., 1959, 699 p.
3. Akhmedova A.R., Gorbacheva V.N., Shvab A.V. Modelirovaniye aerodinamiki i koncentratsionnoy diffuzii v khimicheskom apparate [Modeling of aerodynamics and concentration diffusion in a chemical apparatus]. Proc. Conf. "Innovatsii v atomnoy otras-li: problemy i resheniya", Seversk, 2019. Moscow, NRNU MEPhI Publ., p. 14.
4. Loytsyanskiy L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza: ucheb. dlya vuzov [Fluid and gas mechanics]. Moscow, Drofa Publ., 2003, 840 p.
5. Patankar S. Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti [Numerical methods for solving heat transfer and fluid dynamics problems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 152 p. (in Rus.)

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГОМОГЕННОЙ КОНДЕНСАЦИИ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ С УГЛЕКИСЛЫМ ГАЗОМ

С.А. Груздь, М.А. Корепанов

Ижевский государственный университет им. М.Т. Калашникова, Россия  
lilyna@mail.ru

**Ключевые слова:** математическое моделирование, гомогенная конденсация, сверхзвуковое сопло, оксид алюминия, субокислы алюминия.

**Аннотация.** Рассмотрено течение высокотемпературной диссоциированной смеси паров оксида алюминия и углекислого газа в сверхзвуковом сопле. С помощью математической модели расчета равновесного состава гомогенной смеси получены парциальные давления образующихся веществ, включая кластеры оксида алюминия. Определены реакции объединения субоксидов, которые составляют основную массовую долю, образующихся при конденсации кластеров, полного оксида алюминия. Составлена математическая модель движущегося в сопле сверхзвукового потока в одномерной постановке. Получены расчетные данные по росту радиуса критических зародышей оксида, температуре и суммарному давлению смеси по длине сопла.

## MATHEMATICAL MODEL OF HOMOGENEOUS CONDENSATION OF A MIXTURE OF ALUMINUM OXIDE AND CARBON DIOXIDE

S. Gruzd, M. Korepanov

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russian Federation  
lilyna@mail.ru

**Keywords:** mathematical modeling, homogenous condensation, supersonic nozzle, alumina, aluminum suboxides.

**Abstract.** The flow of a high-temperature dissociated mixture of aluminum oxide and carbon dioxide vapors in a supersonic nozzle is considered. The reactions of combining suboxides are determined, which constitute the bulk of the alumina clusters formed during condensation. A numerical simulation of a flow in a supersonic nozzle in a one-dimensional formulation was done. The obtained data on the quantitative composition of the formed combustion products, including alumina clusters, also have calculated data on the growth of the radius of critical oxide nuclei and the temperature of the mixture along the length of the nozzle. A significant change in the flow parameters in the nozzle is shown, which is caused by the heat generated during condensation. The results obtained are in qualitative agreement with the known experimental data on the size of particles formed during the homogeneous condensation of aluminum oxide.

Моделирование конденсации оксида алюминия  $Al_2O_3$  всегда осложнялось тем, что в газообразном состоянии это вещество не существует [1]. По этой же причине осложнены расчеты получения его кластеров, так как распространенные модели конденсации подразумевают конденсацию вещества без изменения химической формулы. Алюминий широко используется в ракетной технике, как часть состава ракетных топлив, поэтому исследование процесса его горения и связанного с этим образование оксида алюминия является важной и актуальной задачей. Расчеты, связанные с получением состава продуктов сгорания, включают в себя необходимость получения данных по образованию оксида алюминия в движущемся потоке, которые, в свою очередь, осложнены индивидуальными свойствами оксида алюминия [2–3]. Ранее в работах авторов была предложена модель для расчета движущегося насыщенного газа с учетом гомогенной конден-

сации в соплах, но в виду особенности оксида алюминия применить по аналогии эту модель не представляется возможным [4–5].

В представленной работе предложена переработанная методика расчета движения насыщенного газа по соплу с учетом агломератов оксида алюминия.

Газообразные продукты горения конденсируются в макроскопические капли жидкого оксида алюминия, получение термодинамических параметров таких кластеров осложнено тем, что  $Al_2O_3$  в газовой фазе экспериментально не наблюдается, что заставляет менять существующую численную модель гомогенной конденсации. Образование кластеров оксида происходит за счет реакции слипания различных его газообразных окислов, в связи с этим необходимо определить, за счет которых происходит образование оксида алюминия. Для этого необходимо рассчитать состав смеси в равновесном и неравновесном состоянии, что позволит определить поток массы тех компонентов, которые обеспечивают рост зародышей оксида алюминия. При этом равновесным будем считать состав смеси со сформировавшейся конденсированной фазой, которая учитывается как “большая молекула”, состоящая из 1000 молекул  $Al_2O_3$ . А неравновесным – состав смеси, в котором конденсированной фазы нет, а присутствуют лишь агломераты (кластеры) оксида алюминия, состоящие из 4, 7, 11 и т.д. молекул  $Al_2O_3$ . Размерный ряд кластеров представлен по аналогии с рядом Фибоначчи, и при расчете учитываются только те кластеры, парциальные давления которых ниже, чем у предыдущего более мелкого в ряду. Если же парциальное давление кластера  $n$ -го размера становится больше, чем у  $n-1$ -го, то такой кластер считается сверхкритическим и выводится из расчета. Скорость образования сверхкритического кластера определяется по теории быстрой коагуляции Смолуховского в предположении, что сверхкритический кластер образуется за счет столкновения двух докритических. После образования достаточного количества сверхкритических кластеров наступает этап их роста.

Численный эксперимент был проведен в одномерной постановке для конических сопел с тангенсом угла полураствора 0.15, длина сверхзвуковой части 15 см (рис. 1).

Соотношение оксида алюминия и углекислого газа 1:1. Температура в критике сопла 4100 К, плотность смеси  $0.5 \text{ кг/м}^3$ . Моментом начала спонтанной конденсации выбрано концентрация сверхкритических кластеров в количестве  $10^{15} \text{ 1/м}^3$ , что для таких начальных данных наступает при температуре 3987К, скорость образования сверхкритического кластера при этом  $10^{22}$  зародышей в секунду. Радиус сверхкритического кластера в момент начала конденсации составил 5 ангстрем. Характерное для течения в сверхзвуковом сопле падение температуры потока нарушается в момент начала спонтанной конденсации оксида, наблюдается резкий скачок тем-

пературы, который вполне объясним выделением тепла при переходе вещества от газовой фазы к жидкой.

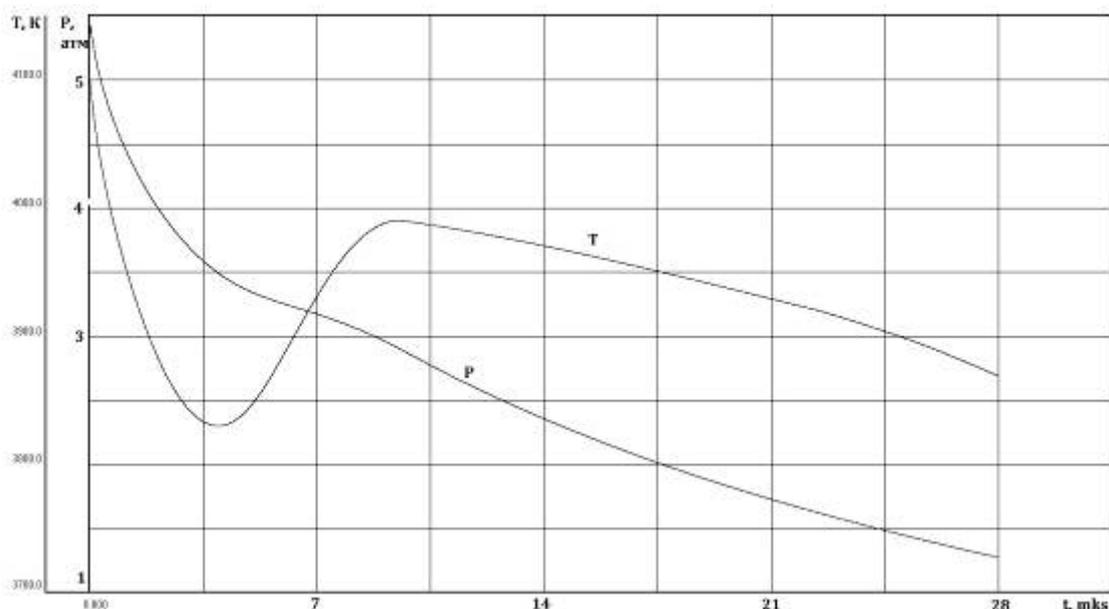


Рис. 1. Изменение температуры и давления по соплу с учетом конденсации оксида алюминия

Рост температуры прекращается в момент, когда замедляется рост размера капель конденсата. Известно, что оксид алюминия, образующийся из газовой фазы, имеет субмикронный размер, а согласно полученным расчетным значениям средний радиус образовавшейся капли оксида алюминия на выходе из сопла достигает размеров порядка 0.1 мкм [1].

Исследования проведены в рамках работ по проекту 13.06.01/18КМА, реализуемому на основании Приказа ректора ИжГТУ им. М.Т. Калашникова от 29 декабря 2018 г. № 1493.

### Литература

1. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В., Логачев В.С., Коротков А.И. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука, 1972. 294 с.
2. Малинин В.И. Внутрикамерные процессы в установках на порошкообразных металлических горючих. Екатеринбург; Пермь: УрО РАН, 2006. 262 с.
3. Бекстед М.В., Лианг У., Паддупаккам К.В. Математическое моделирование горения одиночной алюминиевой частицы (Обзор) // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 6. С. 15–33.
4. Корепанов М.А., Груздь С.А. Моделирование гомогенной конденсации с учетом квазиравновесной концентрации малых агломератов // Химическая физика и мезоскопия. 2014. Т. 16, № 1. С. 63–67.
5. Корепанов М.А., Груздь С.А. Математическое моделирование турбулентных течений с гомогенной конденсацией в сверхзвуковых соплах // Химическая физика и мезоскопия. 2016. Т. 18, № 3. С. 370–380.

## References

1. Pokhil P.F., Belyaev A.F., Frolov Yu.V., Logachev V.S., Korotkov A.I. Gorenje poroshkoobraznykh metallov v aktivnykh sredakh [Combustion of powdered metals in active media]. Moscow: Nauka Publ., 1972. 294 p.
2. Malinin V.I. Vnutrikamernye protsessy v ustanovkakh na poroshkoobraznykh metallicheskikh goryuchikh [Intra-chamber processes in installations on powdered metallic combustible]. Ekaterinburg-Perm: UrO RAN Publ., 2006. 262 p.
3. Beksted M.V., Liang U., Padduppakkam K.V. Matematicheskoe modelirovanie goreniya odinochnoy alyuminievoy chastitsy (Obzor) [Mathematical modeling of the combustion of a single aluminum particle (review)]. Fizika goreniya i vzryva [Combustion, Explosion, and Shock Waves], 2005. Vol. 41, no. 6. Pp. 15–33.
4. Korepanov M.A., Gruzd' S.A. Modelirovanie gomogennoy kondensatsii s uchetom kvaziravnovesnoy kontsentratsii malykh aglomeratov [Modeling homogeneous condensation considering the quasiequilibrium concentration of small agglomerates]. Khimicheskaya fizika i mezoskopiya [Chemical Physics and Mesoscopy], 2014, vol. 16, no. 1. Pp. 63–67.
5. Korepanov M.A., Gruzd' S.A. Matematicheskoe modelirovanie turbulentnykh techeniy s gomogennoy kondensatsiy v sverkhzvukovykh soplakh [Mathematical modeling of turbulent flows with homogeneous condensation in supersonic nozzles]. Khimicheskaya fizika i mezoskopiya [Chemical Physics and Mesoscopy], 2016. Vol. 18, no. 3. Pp. 370–380.

## ТЕРМОУПРУГАЯ ДИФФУЗИЯ В СЛОЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СМЕШАННЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

С.А. Давыдов

Московский авиационный институт, Россия  
xepoн\_93@inbox.ru

**Ключевые слова:** термоупругая диффузия, функция Грина, преобразование Лапласа, многокомпонентная среда, нестационарная задача.

**Аннотация.** Представлен алгоритм решения задачи о распространении одномерных термоупругодиффузионных возмущений в многокомпонентном изотропном слое. Физико-механические процессы в среде описываются локально-равновесной моделью, включающей уравнения движения упругой среды, теплопереноса и массопереноса. На первой границе слоя задаются перемещение, а также тепловой и диффузионные потоки. На второй границе – напряжение вместе с приращениями температуры и концентраций. Начальные условия нулевые. Искомые функции ищутся в интегральной форме, представляющей собой свёртку по времени функций Грина и граничных условий. Учитываются эффекты перекрёстной диффузии и ненулевые времена релаксации. Для нахождения функций Грина используются преобразование Лапласа по времени и разложения в ряды Фурье. Проведён анализ полученных функций Грина. Выполнен тестовый расчёт.

# THERMOELASTIC DIFFUSION IN A LAYER UNDER THE ACTION OF MIXED UNSTEADY PERTURBATIONS

S. Davydov

Moscow Aviation Institute (National Research University), Russian Federation  
xenon\_93@inbox.ru

**Keywords:** Thermoelastic diffusion, Green's function, Laplace transform, multicomponent medium, unsteady problem.

**Abstract.** We present an algorithm for solving the propagation problem of one-dimensional thermoelastic diffusion perturbations in a multicomponent isotropic layer. Physical and mechanical processes in a medium are described by a locally equilibrium model, including the equations of elastic medium motion, heat transfer and mass transfer. At the first boundary of the layer, displacement, as well as heat and diffusion fluxes are known. At the second boundary are the stress along with increments of temperature and concentrations. The initial conditions are zero. The unknown functions are sought in the integral form, which is a convolution in time of the Green's functions and the boundary conditions. The effects of cross diffusion and nonzero relaxation times are considered. To find the Green's functions, the Laplace transform in time and Fourier series expansion are used. The analysis of the obtained Green functions is done. Test calculation completed.

Создание материалов с заранее запрограммированными свойствами и модификация уже имеющихся материалов под новые стандарты качества – одно из актуальных направлений разработок в области технологии обработки конструкционных материалов. Разработка математических моделей воздействия различных факторов на обрабатываемый материал, а также анализ получаемых результатов позволяет рассмотреть большее число вариантов воздействия при минимизации финансовых затрат в сложных высокотехнологических процессах [1].

Существует ряд подходов к созданию математических моделей. Одним из перспективных, дающий возможность наиболее точно аналитически описать рассматриваемый процесс, является построение моделей связанных полей, примером которого является термомеханодиффузия [2, 3]. Модель термомеханодиффузии – это описание взаимодействия полей температуры, перемещения и концентраций.

Большинство имеющихся на сегодняшний день работ посвящено решению статических, квазистатических и стационарных задач термомеханодиффузии [4].

Наибольшие как интерес, так и трудность, представляют нестационарные связанные одномерные и двумерные задачи термомеханодиффузии. В этих работах решение сводится к преобразованию Лапласа по времени, обращение которого сопряжено с большими математическими трудностями.

В связи с этим чаще всего для перехода к оригиналам применяются численные алгоритмы и готовые пакеты вычислительной математики и механики.

Во многих физико-механических процессах, представляющих практический интерес, нередко элементы конструкции работают в условиях смешанных (кинематических и динамических) внешних воздействиях.

В данной работе рассматривается одномерная нестационарная задача термоупругой диффузии для однородного многокомпонентного слоя [5]. На первой границе слоя задаются перемещение, а также тепловой и диффузионные потоки. На второй границе – напряжение вместе с приращением температуры и концентраций. Для описания возмущений, распространяющихся с конечной скоростью, используется локально-равновесная модель связанной термоупругой диффузии, включающая уравнения движения упругой среды, теплопереноса и массопереноса. Начальные условия приняты нулевыми.

Решение задачи ищется в интегральной форме, представляющей собой свёртку по времени функций Грина с функциями, стоящими в правых частях граничных условий [4, 5]. Для нахождения функций Грина используются преобразование Лапласа по времени и разложение в ряды Фурье по пространственной координате. В результате преобразований трансформанты гармоник искомым функций выражаются как рациональные дроби относительно параметра преобразования Лапласа. Их оригиналы находятся с помощью известных теорем и таблиц операционного исчисления [5]. Такой подход позволяет свести к минимуму использование численных алгоритмов и провести анализ полученных функций Грина. Рассмотрен расчётный пример, описывающий процесс поверхностной модификации, на основе технологии ионной имплантации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-31-00437).

### Литература

1. *Князева А.Г.* Введение в термодинамику необратимых процессов: лекции о моделях. Томск: Изд-во «Иван Федоров», 2014. 172 с.
2. *Nowacki W.* Dynamical Problems of Thermodiffusion in Solids // Proc. Vib. Prob. 1974. Vol. 15. Pp. 105–128.
3. *Indeitsev D.A., Semenov B.N., Sterlin M.D.* The Phenomenon of Localization of localization of diffusion process in a dynamically deformed solid. Dokl. Phys. 2012.
4. *Davydov S.A., Zemskov A.V., Akhmetova E.R.* Thermoelastic Diffusion Multicomponent Half-Space under the Effect of Surface and Bulk Unsteady Perturbations. Math. Comput. Appl. 2019, 24, 26.
5. *Davydov S.A., Zemskov A.V.* Unsteady one-dimensional perturbations in multicomponent thermoelastic layer with cross-diffusion effect / J. Phys.: Conf. Ser. 2018, № 1129, 012009

## References

1. *Knyazev A.G.* Vvedenie v termodinamiku neobratimyh processov: lektsii o modelyakh. Tomsk: Publishing House «Ivan Fedorov», 2014. 172 p.
2. *Nowacki W.* Dynamical Problems of Thermodiffusion in Solids // Proc. Vib. Prob. 1974. Vol. 15. Pp. 105–128.
3. *Indeitsev D.A., Semenov B.N., Sterlin M.D.* The Phenomenon of Localization of localization of diffusion process in a dynamically deformed solid. Dokl. Phys. 2012.
4. *Davydov S.A., Zemskov A.V., Akhmetova E.R.* Thermoelastic Diffusion Multicomponent Half-Space under the Effect of Surface and Bulk Unsteady Perturbations. Math. Comput. Appl. 2019, 24, 26.
5. *Davydov S.A., Zemskov A.V.* Unsteady one-dimensional perturbations in multicomponent thermoelastic layer with cross-diffusion effect / J. Phys.: Conf. Ser. 2018, № 1129, 012009

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФТОРИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ВОЛЬФРАМА

**А.А. Журавлев**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
alex\_z\_230796@mail.ru

**Ключевые слова:** гексафторид вольфрама, численное моделирование, граничные условия.

**Аннотация.** Производство уникальных изделий и покрытий из вольфрама в ряде случаев возможно только при использовании процесса восстановления гексафторида вольфрама водородом. Необходимый для этого исходный материал готовят фторированием вольфрама фтором с последующей конденсацией полученного газообразного продукта. Процесс фторирования металлического вольфрама осуществляется в соответствии с химической реакцией. Для описания процесса фторирования порошкообразного металлического вольфрама элементарным фтором записаны системы уравнений Навье–Стокса, переноса теплоты и вещества при наличии гетерогенной реакции на поверхности рабочей зоны химического реактора. Для более полного использования фтора при химической реакции задается очень малая скорость его перемещения по реактору. Однако плотность смеси существенно изменяется за счет изменения концентраций компонентов смеси вследствие протекания химической реакции. Поэтому в работе сделано допущение, что плотность является переменной, но зависящей только от концентраций компонентов смеси. Для решения систем дифференциальных уравнений, типа уравнений переноса скалярной транспортабельной субстанции, в работе использовалась неявная двухслойная схема переменных направлений, предложенная Дугласом и Ганом, и записанная в «дельта» форме.

# NUMERICAL SIMULATION OF THE PROCESS OF FLUORINATION OF METALLIC TUNGSTEN

A. Zhuravlev

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
alex\_z\_230796@mail.ru

**Keywords:** Tungsten hexafluoride, numerical simulation, boundary conditions.

**Abstract.** The production of unique products and coatings from tungsten in some cases is possible only when using the process of reducing tungsten hexafluoride with hydrogen. The necessary starting material for this is prepared by fluorination of tungsten with fluorine, followed by condensation of the resulting gaseous product. The process of fluorination of metallic tungsten is carried out in accordance with a chemical reaction. To describe the process of fluorination of powdered metallic tungsten by elemental fluorine, systems of Navier-Stokes equations are written down, heat and substance transfer in the presence of a heterogeneous reaction on the surface of the working zone of a chemical reactor. For a more complete use of fluorine in a chemical reaction, a very low rate of its movement through the reactor is specified. However, the density of the mixture changes significantly due to changes in the concentrations of the components of the mixture due to a chemical reaction. Therefore, the assumption is made in the work that the density is variable, but depending only on the concentrations of the mixture components. To solve systems of differential equations, such as transport equations of a scalar transportable substance, an implicit two-layer scheme of alternating directions proposed by Douglas and Gan and written in “delta” form was used in the work.

Производство уникальных изделий и покрытий из вольфрама в ряде случаев возможно только при использовании процесса восстановления гексафторида вольфрама водородом. Одним из перспективных тугоплавких материалов, который нашел широкое применение в авиационной, космической, химической и атомной промышленности является, например, вольфрам. В последнее время наиболее перспективным способом получения износостойких покрытий или непосредственно изделий из тугоплавких материалов является метод, основанный на осаждении его из парогазовой фазы с помощью восстановления его фторидов. Для реализации этого способа необходимо предварительное проведение процесса фторирования металлического материала. Необходимый для этого исходный материал готовят фторированием вольфрама фтором с последующей конденсацией полученного газообразного продукта. Для создания математической модели процесса фторирования порошкообразного металлического вольфрама элементарным фтором используем систему уравнений Навье–Стокса, уравнения переноса теплоты и вещества. В модели учитывается наличие гетерогенной реакции на поверхности металлического вольфрама, расположенного в рабочей зоне химического реактора. Для более полного использования фтора при химической реакции задается очень малая скорость его перемещения по реактору. Однако плотность смеси существенно изменя-

ется за счет изменения концентраций компонентов смеси вследствие протекания химической реакции. Поэтому в работе сделано допущение, что плотность является переменной, но зависящей только от концентраций компонентов смеси. Отличительной особенностью рассматриваемой задачи является оригинальная форма представления граничных условий для газовой смеси на поверхности вольфрама. Функциональная зависимость скорости реакции фторирования, а соответственно и изменение концентрации ключевого компонента, строилась в зависимости от температуры смеси и концентрации фтора возле поверхности нижней границы реактора.

Рассматриваемая в работе задача решалась численно на основе метода конечных разностей. Получаемая система алгебраических уравнений разностного аналога дифференциальных уравнений записывалась в неявном виде. Обобщенную неявную двухслойную схему переменных направлений, представленную в «дельта» форме решали с помощью метода прогонки.

Для проверки достоверности результатов численного моделирования были выполнены тестовые расчеты по определению зависимости степени использования фтора для реакции фторирования от продольной координаты.

Хорошее соответствие расчета и экспериментальных данных позволяет сделать вывод об адекватности созданной модели. Эта модель позволяет проводить численные исследования по выбору оптимальных условий осуществления процесса фторирования порошков тугоплавких металлов.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**Н.Р. Зейналова**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
natalizejnalova97@gmail.com

**Ключевые слова:** осевой вентилятор, коэффициент полезного действия, численное моделирование, акустическая энергия.

**Аннотация.** В данной работе проведено численное моделирование расчетных областей осевого двухступенчатого встречного вращения вентилятора местного проветривания с зазором в 3 и 6 мм. Для моделирования течения воздуха через осевой вентилятор решалась система уравнений вязкого несжимаемого газа. Для проведения расчета акустической энергии использовалась формула Проудмана. Построение геометрической области и конечно-объемной сетки выполнено с помощью пакета Gambit. Численное решение математической модели выполнено с помощью пакета Ansys-Fluent. Для аппроксимации конвективных членов уравнений использовалась противопоточная схема второго порядка точности с применением метода Патанкара. Согласование полей скорости и давления осуществлялось по алгоритму SIMPLE на расчетной сетке.

# DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF TWO-STAGE AXIAL COMPRESSOR BASED ON NUMERICAL SIMULATION

N. Zeinalova

National research Tomsk State University, Russian Federation  
natalizejnalova97@gmail.com

**Keywords:** axial fan, efficiency, numerical simulation, acoustic power.

**Abstract.** In this paper, a numerical simulation of the calculated areas of the axial two-stage counter rotation of the local ventilation fan with a tip clearances of 3 mm and 6 mm is performed; To describe the flow of air through an axial fan, a system of equations of a viscous incompressible gas is solved. To calculate the acoustic energy, the Prodman formula is used. The construction of the geometric region and the finite-volume mesh is performed using the Gambit package. The numerical solution of the mathematical model is performed through of the Ansys-Fluent package. To approximate the convective terms of the equations, a second-order precision scheme using the Patancar method is used. Coordination of the velocity and pressure fields is carried out according to the SIMPLE algorithm on the computational grid.

Вентилятор – машина для подачи воздуха или др. газа при давлении не выше  $12\text{--}15 \text{ кН/м}^2$  ( $0.12\text{--}0.15 \text{ кг с /см}^2$ ). Вентиляторы служат для вентиляции зданий и рудников, подачи воздуха в котельные и печные агрегаты и удаления из них дымовых газов, сушки материалов, охлаждения деталей машин и механизмов, создания воздушных завес, пневматического транспортирования сыпучих и волокнистых материалов, обеспечения некоторых технологических процессов, охлаждения радиаторов, конденсаторов, подачи воздуха. Затраты электроэнергии на работу вентиляторов могут быть довольно большими. Воздушная заслонка, регулирующая типа ЗВР, предназначена для регулирования подачи воздуха или газовых смесей в системе вентиляции (в т. ч. рециркуляции) или кондиционирования [1]. Все эти факты в целом позволяют сделать вывод о том, что вентилятор главного проветривания при его проектировании и проверке требует разработки комплексного подхода, учитывающего взаимное влияние аэродинамических, статических и динамических прочностных, тепловых и акустических эффектов [2]. По конструкции и принципу действия вентиляторы делятся на: осевые (аксиальные); радиальные (центробежные); диаметральные (тангенциальные). Осевые вентиляторы предназначены для использования в системах приточной или вытяжной вентиляции жилых, общественных и производственных помещений.

Осевые вентиляторы являются неотъемлемой частью транспортных и технологических установок, применяются в различных отраслях народного хозяйства: горнорудной, шахтах, сельском хозяйстве, электронной промышленности, в быту и т.д. [4]. Осевые вентиляторы нашли широкое применение для проветривания угольных шахт и метро [5].

Рассматривался осевой вентилятор с прямыми лопатками и осевой вентилятор с радиальными лопатками, состоящие из прямого и обратного роторов, направляющей втулки прямого и обратного роторов и корпуса.

Для моделирования течения воздуха через осевой вентилятор решалась система уравнений вязкого несжимаемого газа. Граничные условия для системы уравнений: на входе в область задавалось равенство полного давления газа атмосферному; на выходе из области задавалось статическое давление газа.

Система уравнений вязкого несжимаемого газа решалась численно с использованием метода Патанкара. Конвективные члены уравнений аппроксимировались с помощью противопоточной схемы второго порядка точности. Согласование полей скорости и давления осуществлялось по алгоритму SIMPLE на расчетной сетке. Расчетная область разбивалась на 82207, 171380 и 535716 шестигранных ячеек. Точность расчета контролировалась балансом потоков массы.

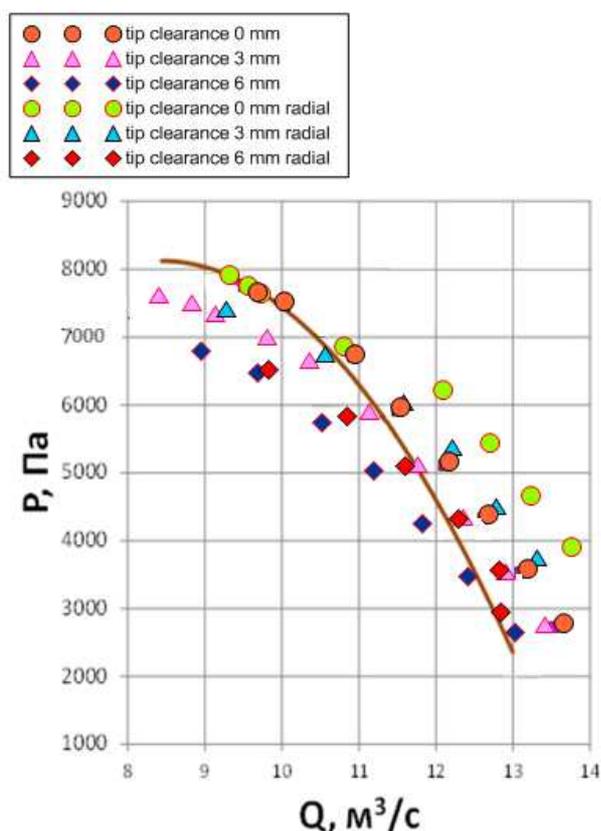


Рис. 1. Зависимость перепада давления от расхода при  $n = 3000$  об/мин

На рис. 1 показан график зависимости перепада давления от расхода для вентиляторов без учета зазора и с учетом зазора в 3 и 6 мм. Сплошная линия демонстрирует результаты экспериментальных данных для вентилятора ВМЭ ВВ 7-2/55 фирмы «Вентпром». При заданном перепаде давления, чем меньше величина зазора, тем больше значение расхода. Из рис. 1 вид-

но, что в области значений расхода в диапазоне от 9 до 11 м<sup>3</sup>/с наблюдается хорошее совпадение с экспериментом для вентилятора без зазора. При дальнейшем уменьшении перепада давления, значение расхода для каждой из кривой становится ближе друг к другу.

Другой важной характеристикой вентилятора является мощность потока, создаваемая ротором. Отношение мощности потока воздуха, создаваемого вентилятором, к мощности вентилятора представляет собой эффективность (к.п.д.) вентилятора, или аэродинамический коэффициент полезного действия.

Из результатов численного моделирования выявлено, что с ростом перепада давления к.п.д. вентилятора увеличивается и достигает своего максимального значения для вентилятора без учета зазора при перепаде давления равным 6763.4 Па. Дальнейшее увеличение перепада давления снижает к.п.д.

Показано, что при увеличении зазора максимальная эффективность смещается в сторону низких давлений, а значение максимума аэродинамической эффективности падает.

Выявлено, что при увеличении зазора интенсивность аэродинамического шума увеличивается. После достижения точки максимума аэродинамической эффективности наблюдается увеличение интенсивности аэродинамического шума в 2 раза.

Показано, что в области значений расхода в диапазоне от 9 до 11 м<sup>3</sup>/с наблюдается хорошее совпадение с экспериментом для вентилятора без зазора. В области значений расхода от 11 до 13 м<sup>3</sup>/с имеет место совпадение расчетных данных для вентилятора с зазором в 3 мм с результатами, полученными фирмой «Вентпром».

## Литература

1. *Пестерева А.Ю., Алтухова Т.А., Цэдашиев Ц.В., Токмакова А.Л., Ханхасаев Г.Ф.* Осевой вентилятор с центробежными лопатками // Актуальные вопросы аграрной науки. 2014. Вып. 2. С. 22–26.
2. *Пикущак Е.В., Миньков Л.Л.* Метод расчета аэродинамического коэффициента полезного действия осевого вентилятора // Вестник Томского государственного университета. 2016. №1(39). С. 90–101.
3. *Пейс А.Ю.* Осевой вентилятор с центробежными лопатками – новая современная конструкция // Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского. 2017.
4. *Мартыненко В.Г., Гриценко Н.И.* Анализ статической и динамической прочности осевого вентилятора с учетом аэродинамических свойств потока и неоднородности температурного поля // Проблемы машиностроения. 2015. Т. 18. №4/1. С. 44–52.
5. *Суханов В.И., Григорьев С.В., Сенников В.Ф., Беликов Н.Л.* Снижение энергозатрат установок с осевыми вентиляторами главного проветривания // Рудник Будущего. 2011. Вып. № 2 (6). С. 110–111.

## References

1. *Pestereva A.Yu., Altukhova T.A., Tsedashiev Ts.V., Tokmakova A.L., Khankhasaev G.F.* Axial fan with centrifugal blades // Irkutsk State Agricultural Academy.
2. *Pikushchak E.V., Minkov L.L.* Method of calculating the aerodynamic efficiency of the axial fan // Bulletin of the Tomsk State University. 2016. No. 1(39). Pp. 90–101.
3. *Pace A.Yu.* Axial fan with centrifugal blades – a new modern design // Irkutsk state Agrarian University named after A.A. Yezhevsky.
4. *Martynenko V.G., Gritsenko N.I.* Analysis of static and dynamic strength of the axial fan taking into account the aerodynamic properties of the flow and inhomogeneity of the temperature field // Problems of mechanical engineering. 2015. Vol. 18. No. 4/1. Pp. 44–52.
5. *Sukhanov V.I., Grigoriev S.V., Sennikov V.F., Belikov N.L.* Reducing the energy consumption of installations with axial fans of the main ventilation // "Rudnik of the Future". 2011. No. 2 (6). Pp. 110–111.

## ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПРИ ПАРНОМ ДВИЖЕНИИ НАГРУЗКИ

**К.И. Ипатов, Е.Г. Рогожникова, В.Л. Земляк, В.М. Козин**

Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема, Россия  
vellkom@list.ru

**Ключевые слова:** лед, нагрузка, изгибно-гравитационные волны.

**Аннотация.** В работе экспериментально исследуется эффективность разрушения ледяного покрова резонансным методом от парного движения нагрузки. Исследования проводились в опытовом ледовом бассейне. Для проведения модельных экспериментов была спроектирована и изготовлена необходимая оснастка и сформирован измерительный комплекс для регистрации колебаний поля модельного льда. В ходе экспериментов с помощью лазерных датчиков вертикальных перемещений записывались профили взволнованной поверхности льда, и фиксировалась скорость движения моделей. В качестве критерия ледоразрушения использовался геометрический критерий, показывающий зависимость между углом наклона ледяной пластины и ее разрушением. На первоначальном этапе исследования была проведена серия экспериментов по определению влияния массы нагрузки на параметры генерируемых в модельном льду изгибно-гравитационных волн. Далее исследовалось влияние расстояния между моделями нагрузки при их парном движении кильватерным строем. Эксперименты показали, что в зависимости от расстояния между моделями наблюдалось либо увеличение, либо уменьшение эффективности разрушения ледяного покрова изгибно-гравитационными волнами, что связано с явлением интерференции – увеличением и уменьшением результирующей амплитуды двух когерентных систем волн генерируемых от движения моделей. В целом можно сделать вывод, что для повышения эффективности резонансного метода разрушения льда изгибно-гравитационными волнами могут быть использованы как повторные проходы одиночной нагрузки по ледяному покрову, так и парное движение.

# THE DEFORMED STATE OF THE ICE COVER WITH THE PAIR MOVEMENT OF THE LOAD

**K. Ipatov, E. Rogozhnikova, V. Zemlyak, V. Kozin**

Sholom-Aleichem Priamursky State University, Russian Federation  
vellkom@list.ru

**Keywords:** ice, load, bending gravitational waves

**Abstract.** In the work, the efficiency of study of the ice cover by the resonant method from the pair movement of the load is experimentally investigated. Studies were conducted in the experimental ice tank. To carry out model experiments, the necessary equipment was designed and manufactured and a measuring complex was formed to record the oscillations of the field of model ice. During the experiments, the profiles of the agitated ice surface were recorded with the help of laser sensors of vertical displacements and the velocity of the models was recorded. As an ice destruction criterion, a geometric criterion was used showing the relationship between the angle of inclination of the ice plate and its destruction. At the initial stage of the study, a series of experiments was conducted to determine the effect of the mass of the load on the parameters of flexural-gravity waves generated in model ice. Further, the effect of the distance between the load models during their pair wake movement was studied. Experiments have shown that, depending on the distance between the models, either an increase or a decrease in the effectiveness of ice cover destruction was observed by flexural-gravity waves, which is associated with the interference phenomenon – an increase and decrease in the resulting amplitude of two coherent wave systems generated from the motion of the models. In general, it can be concluded that, to increase the efficiency of the resonant method of breaking the ice, flexural-gravity waves can be used as repeated passes of a single load across the ice cover, as well as pair movement.

В условиях нашей страны, имеющей большое количество рек, продление навигации, борьба с ледовыми осложнениями в виде заторов и зажоров весьма актуальная проблема. Для решения указанных ледотехнических проблем существует много методов и технических средств. Один из таких методов – резонансный метод разрушения ледяного покрова. Сущность данного метода заключается в возбуждении в ледяном покрове резонансных изгибно-гравитационных волн (ИГВ) движущейся нагрузкой.

В известных исследованиях рассматривалось движение одиночной нагрузки [1–2]. В работе [3] при помощи методов механики сплошных сред изучен процесс разрушения ледяного покрова под действием динамической нагрузки. Однако при выполнении ледокольных работ одиночной нагрузкой ее параметры могут оказаться недостаточными для разрушения ледяного покрова заданной толщины в конкретных ледовых условиях. В таких случаях эффективность ледокольных работ можно повысить за счет одновременного использования нескольких нагрузок, т.е. за счет интерференции возбуждаемых ими ИГВ.

Данная работа посвящена исследованиям закономерностей деформирования ледяного покрова при движении по нему двух судов на воздушной подушке (СВП).

Экспериментальные исследования проводились в опытовом ледовом бассейне лаборатории ледотехники Приамурского государственном университете им. Шолом-Алейхема (г. Биробиджан) [4].

Ввиду отсутствия в бассейне рефрижераторной установки модельное поле приготавливалось за счет естественного охлаждения, а эксперименты проводились в ночное время в зимний период года (декабрь 2018 г. – февраль 2019 г.). Обеспечение постоянного температурного режима внутри помещения, где расположена чаша бассейна, благодаря управляемым системам терморегуляции и вентиляции, позволяло приготавливать ровное модельное поле льда толщиной не менее 2 мм без проталин в течение 60 мин при постоянном температурном режиме.

Для буксировки моделей нагрузки использовалась необитаемая буксировочная тележка. Для обеспечения возможности измерения деформаций модельного льда применялись лазерные датчики вертикальных перемещений, с помощью которых записывались профили взволнованной поверхности.

Моделирование естественного ледяного покрова выполнялось с частичным выполнением условий подобия [5]. В качестве критерия разрушения модельного льда использовался коэффициент  $\alpha$ , показывающий зависимость между углом наклона ледяной пластины и ее разрушением.

На первоначальном этапе исследования была проведена серия экспериментов по определению влияния массы нагрузки на параметры генерируемых в модельном льду изгибно-гравитационных волн. Для этого использовалась упрощенная модель СВП «Мурена» в масштабе 1:60. Масса модели изменялась в пределах  $0.94 \div 1.6$  кг, скорость движения лежала в диапазоне  $1.26 \div 2.2$  м/с. Величина резонансной скорости движения нагрузки получалась экспериментально по максимальным значениям прогибов ледяного покрова и составила порядка 1.75 м/с. При минимальном значении массы модели 0.94 кг разрушение льда не наблюдалось. При движении модели массой 1.27 кг, разрушение происходило в небольшом скоростном диапазоне  $1.55 \div 1.85$  м/с. При массе модели 1.6 кг разрушение наблюдалось во всем исследуемом скоростном диапазоне, кроме сверхкритической скорости движения. При малых скоростях движения во льду наблюдались магистральные трещины, площадь разрушения была минимальной. С приближением скорости к критическому значению интенсивность разрушения льда возрастала, формировалась густая сеть концентрических трещин, происходило измельчение льдин и полная потеря несущей способности ледяного покрова. Наибольший разрушающий эффект наблюдался при изгибно-гравитационном резонансе.

Далее исследовалось влияние расстояния между моделями СВП при их парном движении кильватерным строем. Расстояние между моделями варьировалось от полного счаливания до одного метра. Скорость перемещения моделей сохранялась, как и для предыдущих экспериментов, масса моделей выбиралась минимальной и равнялась 0.94 кг, чтобы можно было определить повышению эффективности резонансного метода разрушения льда.

Эксперименты показали, что в зависимости от расстояния между моделями наблюдалось либо увеличение, либо уменьшение эффективности разрушения льда. Наибольшие прогибы были зафиксированы при движении моделей на расстоянии равном 0.25 м друг от друга. Для этого же случая наблюдалась и наибольшая эффективность разрушения.

При полном счаливании моделей прогибы льда также были достаточно большие, однако в результате парная нагрузка представляла собой сплошной фронт давления, что приводило к существенному возрастанию периода и длины ИГВ, а их ледоразрушающая способность падала и была минимальной для всех моделируемых условий.

С увеличением расстояния между моделями величина прогибов снижалась. При расстоянии равном 1 м были зафиксированы их минимальные значения. Рост и падение значений прогибов модельного льда связан с явлением интерференции – увеличением и уменьшением результирующей амплитуды двух когерентных систем ИГВ генерируемых от движения моделей.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что для нагрузки одинаковой массы при ее парном движении с критической скоростью величина прогибов ледяного покрова по сравнению с одиночной нагрузкой из-за интерференции ИГВ либо падала до 23%, либо увеличивалась до 40%.

В целом можно сделать вывод, что для повышения эффективности резонансного метода разрушения льда ИГВ могут быть использованы как повторные проходы одиночной нагрузки по ледяному покрову, так и парное движение СВП.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект №18-38-20030).

## Литература

1. *Sturova I.V.* Effect of bottom topography on the unsteady behaviour of an elastic plate floating on shallow water // *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, Vol. 72. No 4. Pp. 417–426.

2. *Squire V.A., Hosking R.J., Kerr A.D. and Langhorne P.J.* Moving Loads on Ice Plates, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 1996.

3. *Орлова Ю.Н.* Исследование процесса подрыва заснеженного ледяного покрова эмульсионной взрывчаткой // Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики»  
276

26–28 ноября 2018 г.: Материалы конференции / под ред. М.Ю. Орлова. Томск: Изд-во «Красное знамя». 2019. С. 66–69.

4. Земляк В.Л., Баурин Н.О., Курбацкий Д.А. Лаборатория “Ледотехники” // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2013. № 1 (12). С. 68–77.

5. Козин В.М., Онищук А.В., Марьин Б.Н. Ледоразрушающая способность изгибно-гравитационных волн от движения объектов. Владивосток: Дальнаука, 2005. 191 с.

## References

1. Sturova I.V. Effect of bottom topography on the unsteady behaviour of an elastic plate floating on shallow water / Journal of Applied Mathematics and Mechanics, Vol. 72. No 4. Pp. 417–426.

2. Squire V.A., Hosking R.J., Kerr A.D. and Langhorne P.J. Moving Loads on Ice Plates, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 1996.

3. Orlova Yu. N. Snow-covered ice subjected explosive loading. Undex results'2019.// All-Russian Youth Scientific Conference "Current issues of continuum mechanics and celestial mechanics", November 26–28, 2018: The conference proceedings / ed. M.Yu. Orlov. Tomsk: Izdatelstvo "Krasnoe znamya", 2019. Pp. 66–69.

4. Zemlyak V.L., Baurin N.O., Kurbackiy D.A. “Laboratory Ice technology” // Vestnik, Quart. J. of Amur State University after Sholom-Aleichem. No.1 (12). Pp. 068–077.

5. Kozin V.M., Onishchuk A.V., Mar'in B.N. et al. The Ice-Breaking Capacity of Flexural-Gravity Waves Produced by Motion of Objects, Dal'nauka, Vladivostok, 2005. 191 p.

## ЧИСЛЕННОЕ ИЗУЧЕНИЕ МЕДЛЕННЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ВОЛН МЕЖДУ ОЧАГАМИ ДЕФОРМАЦИИ

А.А. Казакбаева<sup>1</sup>, И.Ю. Смолин<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия  
aigerim\_@bk.ru

**Ключевые слова:** автоволны, очаг деформации, численное моделирование, неупругая деформация.

**Аннотация.** Исследования выполнены в рамках математической модели, предложенной П.В. Макаровым для описания процессов совместной генерации и распространения в нагружаемых упруго-пластических средах как обычных волн напряжений, распространяющихся со скоростями звука, так и медленных деформационных волн неупругой природы. Построены структурные модели блочных сред с ослабленными областями (разломами или очагами деформации) для проведения тестовых расчётов по генерации и распространению медленных деформационных волн в нелинейных упруго-пластических средах. Выявлен зигзагообразный характер распространения фронтов медленных деформационных возмущений.

# NUMERICAL STUDY OF SLOW DEFORMATION WAVES BETWEEN DEFORMATION SITES

A. Kazakbaeva<sup>1</sup>, I. Smolin<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science of SB RAS, Russian Federation  
aigerim\_@bk.ru

**Keywords:** autowaves, deformation site, numerical simulation, nonelastic deformation.

**Abstract.** Our work is performed in the framework of the mathematical model suggested by P.V. Makarov to describe the joint generation and propagation of ordinary stress waves (propagating with the sound speed) and slow deformation waves of the inelastic nature in loaded elastoplastic media. Structural models of block media with weakened regions (faults or deformation sites) are constructed for test calculations on generation and propagation of slow deformation waves in nonlinear elastoplastic media. The zigzag nature of propagating fronts of slow deformation disturbances is revealed.

Актуальные и практически важные проблемы прогноза катастрофических разрушений, включая динамические явления в строительных конструкциях, трубопроводах, шахтах и земной коре, связаны с решением фундаментальных задач по установлению механизмов формирования очагов разрушения, а также механизмов эффективного переноса энергии в нагружаемой среде. Успешное решение этих важных проблем, связано с разработкой фундаментальной теории эволюции напряженно-деформированного состояния (НДС) в нагружаемой прочной среде, охватывающей спектр ключевых процессов деформации и разрушения [1]. В настоящее время в научном сообществе достигнуто понимание, что возможным общим фактором, объединяющим наблюдаемые деформационные явления, можно считать медленные волны деформации. Высказана гипотеза, что медленные деформационные возмущения могут распространяться как солитоны, а значит, способны наиболее эффективно переносить и перераспределять энергию в нагружаемой упругопластической среде [2]. Однако эта гипотеза пока никак не обоснована ни наблюдениями, ни теоретически. Медленные деформационные волны непосредственно не регистрируются. Их существование устанавливается косвенно по регистрации вариаций геофизических полей, в частности по направленным миграциям землетрясений. Привлечение к описанию деформационных волновых возмущений уравнений, имеющих солитоноподобные решения, базируется только на априорной уверенности, что подобные волновые возмущения существуют и являются солитонами [3]. Эти уравнения никак не связаны с эволюцией НДС, а значит, их решения могут характеризовать только возможную качественную картину медленных деформационных возмущений. В работах П.В. Макарова [4] предложен вариант общей физико-

математической теории динамических процессов, способной описать совместную генерацию и распространение в упругопластической среде, как обычных волн напряжений, так и медленных деформационных автоволновых и солитоноподобных возмущений. Для проверки этой теории необходимо проведение расчетов и сопоставление с экспериментальными данными.

Целью данной работы является численное изучение особенностей формирования и распространения медленных деформационных возмущений в среде, содержащей разломы или очаги неупругой деформации.

Для описания медленных фронтов деформации неупругой природы в нелинейных упругопластических средах использована модель и соответствующие определяющие уравнения, основанные на идее клеточных автоматов и учитывающие эффекты внутреннего трения и дилатансии [4].

Были построены модельные карты сред с одним и двумя разломами (рис. 1 а, б). В результате проведенных расчетов получено, что в вершинах разломов генерируются два фронта медленной деформационной волны, которые распространяются в межразломной зоне навстречу противоположному разлому. В других вершинах разломов генерируются медленные деформационные волны, которые распространяются в противоположных направлениях к границам расчетной области (рис. 1, в).

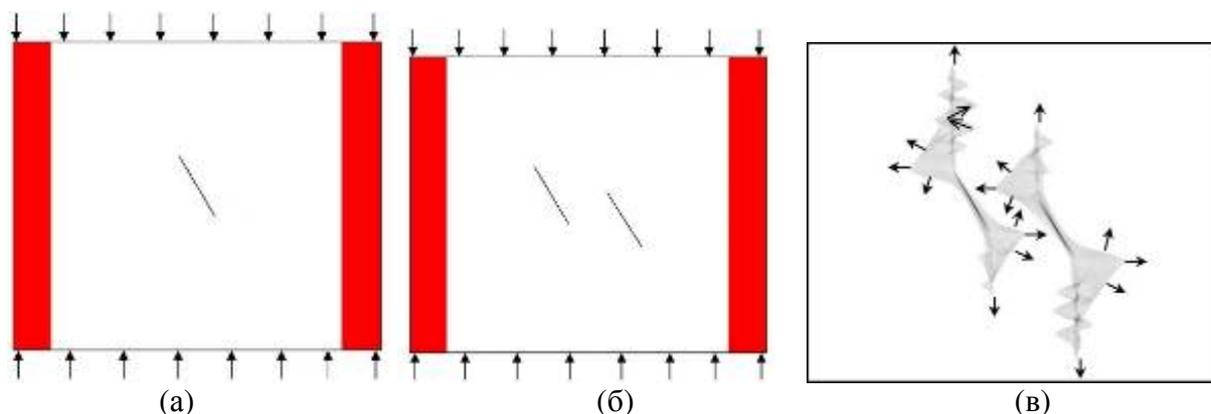


Рис. 1. Примеры структурных карт модельной среды с разломами и условиями нагружения (а, б) и хронограмма распространения деформационных волн (в)

Таким образом, показано, что форма распространяющихся фронтов медленных возмущений в среде с очагами деформаций имеет зигзагообразную форму, обусловленную действием одноосного нагружения и максимальных касательных напряжений.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ 19-17-00122.

## Литература

1. Макаров П.В., Хон Ю.А., Перышкин А.Ю. Медленные деформационные фронты. Модель и особенности распространения // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. №. 3. С. 755–769.
2. Быков В. Г. Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. №. 11. С. 1176–1190.
3. Bykov V.G. Nonlinear waves and solitons in models of fault block geological media // Russian Geology and Geophysics 2015. Vol. 56. No. 5. Pp. 793–803.
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. Makarov P.V., Khon Yu.A. Peryshkin A.Yu. Slow deformation fronts: model and features of distribution. Geodynamics and tectonophysics. 2018. Vol. 9. No. 3. Pp. 755–769. (Rus)
2. Bykov V.G. Strain waves in the earth: theory, field data, and models. *Geology and geophysics*. 2005. Vol. 46. No. 11. Pp. 1176–1190. (Rus.)
3. Bykov V.G., Nonlinear waves and solitons in models of fault block geological media // Russian Geology and Geophysics. 2015. Vol. 56. No. 5. Pp. 793–803.
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. Pp. 32–46.

## ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ЛОКАЛЬНО-АДАПТИВНЫХ ДЕКАРТОВЫХ СЕТОК

Д.А. Костромин<sup>1</sup>, О.Ю. Лукашов<sup>2</sup>

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
kd2206@yandex.ru  
ООО «ШахтЭксперт-Системы», Россия  
olukashov@gmail.com

**Ключевые слова:** угольная шахта, локально-адаптивная декартова сетка, древовидные структуры представления данных, воздушные ударные волны, дискретизация.

**Аннотация.** В настоящей работе описывается технология дискретизации расчетной области для решения нестационарных газодинамических задач в сфере промышленной безопасности угольных шахт. Технология позволяет автоматизировать построение разностной сетки для пространственной сети горных выработок с учетом особенностей топологии шахт и моделируемых процессов. Приводятся детали реализации технологии, показаны результаты расчетов с применением локально-адаптивных сеток, сходимость результатов к некоему решению при уменьшении шага в результате субдискретизации расчетной области с разной глубиной разбиения.

# TECHNOLOGY OF BUILDING LOCAL-ADAPTIVE CARTESIAN GRIDS

D. Kostromin<sup>1</sup>, O. Lukashov<sup>2</sup>

National Research Tomsk State University, Russian Federation

kd2206@yandex.ru

LLC Mining Expert Systems, Russian Federation

olukashov@gmail.com

**Keywords:** coal mine, locally adaptive Cartesian grid, tree data structures, air shock waves, discretization.

**Abstract.** The present work describe the technology of discretization of the computational domain for solving unsteady gas-dynamic problems in the field of industrial safety of coal mines. The technology allows to automate the construction of a differential grid for a spatial network of mine workings, taking into account the features of the mines topology and simulated processes. Details of the implementation of the technology, the results of calculations using locally adaptive grids, convergence of the method to a certain solution when the step is reduced as a result of downsampling the computational domain with different depths of partitioning are presented.

В настоящее время при ликвидации аварий на угольных предприятиях применяется отраслевая методика газодинамического расчета параметров воздушных ударных волн (ВУВ) при взрывах газа и пыли в шахтах (далее – «Методики») [1]. В ее основе лежат уравнения газовой динамики в нестационарной постановке [2], что позволяет решать задачи взрыволокализации в горных выработках, нестационарного проветривания, взрывного горения угольной пыли, математического моделирования развития.

На сегодняшний день численное решение уравнений, составляющих основу «Методики», проводится на ортогональной, структурированной расчетной сетке с шагом по пространству 4 м, определенным в ходе многочисленных экспериментов. Прямолинейные участки горных выработок (ветви) разбиваются на одномерные ячейки, сопряжения и места изменения геометрии состоят из одной трехмерной ячейки [3].

Используемая схема разбиения проста, обеспечивает высокую скорость и необходимую точность расчетов определения границ опасных зон при взрывах метана в шахте. Но ее обратной стороной является отсутствие детализированной картины происходящих физических процессов в целом ряде характерных мест: сопряжения, повороты, места изменения геометрии горных выработок, сбойки, ближайшие окрестности перемычек и заслонов (водяных или сланцевых), пересечения, примыкания и тупики. При экспертизе аварий в шахте изучение процессов, происходящих вблизи перечисленных мест и объектов, часто требуется более детальная картина протекания газодинамических процессов, нежели обеспечивается «Мето-

дикой». Однако простое уменьшение шага по пространству приведет к пропорциональному снижению скорости расчета, в то время как реализация «Методики» не является научным приложением в полном смысле и должна обеспечивать приемлемое время расчетов на персональных компьютерах.

Целью настоящей работы является создание технических основ для развития научных исследований газодинамических процессов при взрывах газа в горных выработках за счет учета новых факторов – средств взрывозащиты, участия угольной пыли и др.

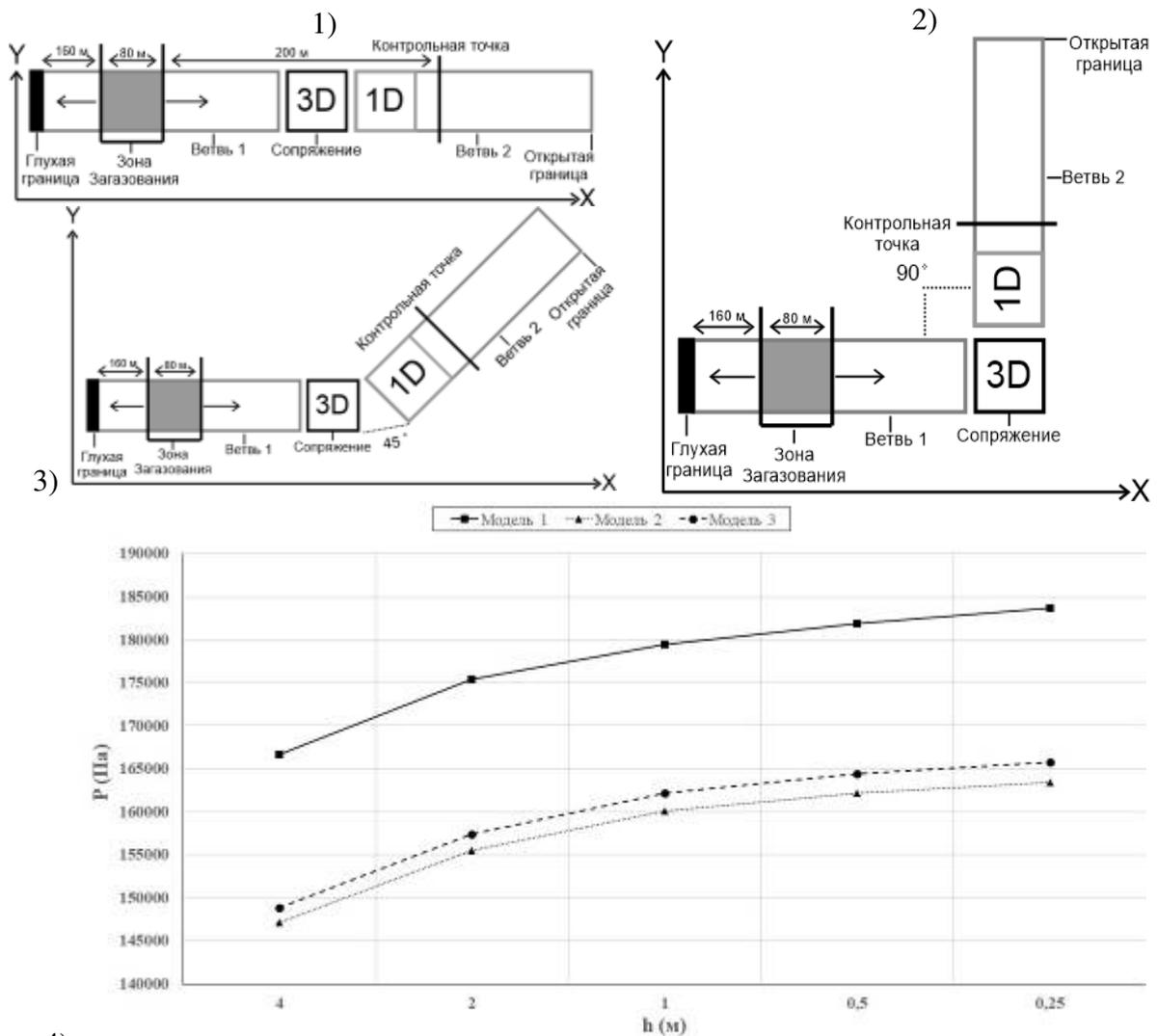
Для реализации поставленной цели была разработана технология, основанная на использовании локально-адаптивных декартовых (ЛАД) сеток [4]. Такой тип сеток позволяет: описывать геометрию сложных областей; максимально точно передавать движущиеся поверхности разрывов, ударных волн, фазовых переходов и другие области больших градиентов функций. Модификация используемой в «Методике» схемы заключается в адаптации изначально структурированной декартовой сетки с помощью использования следующих древовидных структур [5]: двоичные, квадродеревья. В таких структурах при разбиении, исходная (родительская) ячейка сохраняется, являясь своеобразным контейнером для более мелких (дочерних) ячеек, лежащих внутри исходной. При этом бинарные деревья используются для одномерного разбиения ячеек, квадродеревья – для двумерного, а октодеревья – для трехмерного. Значимым преимуществом использования древовидных структур является сохранение кратности при дроблении ячеек.

Технология состоит из следующих основных компонентов:

- локальная область – узел или ветвь сети горных выработок, подлежащая детализации;
- ячейка – представляет собой прямоугольный параллелепипед, соответствующий элементарному объему пространства, который используется в конечно-объемном методе решения систем газодинамических уравнений «Методики»;
- внутренняя граница – компонент, содержащий все взаимные связи ячеек внутри локальной области;
- внешняя граница – компонент, содержащий связи между ячейками двух соседних локальных областей, предназначена для правильного задания граничных условий при решении газодинамической задачи в модуле расчета распространения ВУВ;
- связь – компонент, соединяющий две смежные ячейки.

Проверка корректности работы алгоритма дискретизации расчетной области проводилась путем последовательного разбиения одного и того же участка сети горных выработок с кратным уменьшением шага по пространству и последующими расчетами распространения ВУВ на данном участке. Модели для проведения эксперимента показаны на рис. 1 (1, 2, 3).

Следующие условия одинаковы для всех моделей: общая протяженность ветвей – 800 м; зона загазования (ЗЗ) расположена в ветви 1, протяженность – 80 м; давление в ЗЗ – 3 атм; контрольная точка находится в ветви 2 на расстоянии 440 м от глухой границы. Для ветвей использовалось одномерное разбиение, в сопряжениях по одной трехмерной ячейке. Периметр и сечение равны  $16 \text{ м}^2$ . Зона взрыва расположена таким образом, чтобы исключить влияние фронта ВУВ, отраженной от тупиковой границы, на значение давления в контрольной точке.



4) *Рис. 1.* Используемые модели и результаты численного моделирования: 1 – модель 1, без изменения углов; 2 – модель 2, угол между ветвями 90 градусов; 3 – модель 3, угол между ветвями 45 градусов; 4 – зависимость давления ВУВ от размера шага по пространству: горизонтальная ось ( $h$ ) – шаг по пространству, вертикальная ось ( $P$ ) – давление в контрольной точке

При проверке отслеживалось давление во фронте ударной волны в контрольной точке при различных  $h$ . График давления для момента времени  $t = 0.4856 \text{ с}$  при разных шагах дискретизации представлен на *рис. 1* (4).

Видно, что с уменьшением  $h$  давление стремится к некоторому предельному значению – точному решению, что объясняется снижением аппроксимационной вязкости и, как следствие, более выраженному профилю фронта ВУВ. Этим же подтверждается сеточная сходимость используемого в «Методике» разностного метода и корректность созданной технологии дискретизации расчетной области.

В итоге разработана технология локальной детализации разностных сеток, основанная на использовании двоичных, квадрато- и октодеревьев. Технология позволяет выполнять детализацию произвольно заданной области, в том числе с возможностью указания различной глубины разбиения (уровня детализации) ячеек. Новым подходом в работе является установление связей, между смежными ячейками любой размерности и уровнями вложенности, при операции дискретизации. Реализована в виде программного обеспечения на языке программирования C++. Результаты планируется использовать при исследовании газодинамических процессов распространения ВУВ в горных выработках угольных шахт.

### Литература

1. Методика газодинамического расчёта параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли. Утверждена Госгортехнадзором России 02.04.2003.
2. *Лукашов О.Ю.* Исследование волновых эффектов, возникающих при распространении ударных волн по разветвлённой сети горных выработок: дис. канд. физ.-мат. наук. Томск, 2003. 141 с.
3. *Палеев Д.Ю.* Ударные волны при взрывах в угольных шахтах // Промышленная безопасность. М.: Изд. "Горное дело" ООО "Киммерийский центр". Библиотека горного инженера. Т. 6. Кн. 3. 2011. 312 с.
4. *Афендииков А.Л., Меньшов И.С., Меркулов К.Д., Павлухин П.В.* Метод адаптивных декартовых сеток для решения задач газовой динамики. М.: Изд-во Российская академия наук, №10106-765, 2017. 63 с.
5. *Ахо А., Хопкрофт Д.Э., Ульман Д.Д.* Структуры данных и алгоритмы // пер. с англ.: учеб. пособие. М.: Изд. дом "Вильямс". 2000. 384 с.

### References

1. Technique of gas-dynamic calculation of parameters of air shock waves in gas and dust explosions. Approved by the Gosgortekhnadzor of Russia 04.02.2003.
2. *Lukashov O.Y.* 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, 141 p.
3. *Paleev D.Y.* Shock waves during explosions in coal mines. In: Industrial Safety. "Mining Engineering" ООО "Cimmerian Center" Publ., tables, ill. – Mining Engineer Library. 2011. Vol. 6, book 3, 312 p.
4. *Afendikov A.L., Menshov I.S., Merkulov K.D., Pavlukhin P.V.* The method of adaptive Cartesian grids for solving gas dynamics problems. M.: Publishing House of the Russian Academy of Sciences, No. 10106-765, 2017. 63 p.
5. *Aho A., Hopcroft D. E., Ulman D. D.* Data structures and algorithms: A Stud. Manual. Williams Publ., 2000, 384 p.

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАСТИНЧАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НАНОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

Е.Ю. Крылова<sup>1</sup>, И.В. Папкина<sup>2</sup>, А.В. Крысько<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский  
государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Россия

<sup>2</sup>Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, Россия  
ikravzova@mail.ru

**Ключевые слова:** нанопластинка, НЭМС, температурное поле, поверхностная теория упругости.

**Аннотация.** В работе построена теория колебаний чувствительного элемента НЭМС датчика на основании поверхностной и микрополярной теорий упругости, находящегося в температурном поле. Контактное взаимодействие между пластинами учитывается по теории Б.Я. Кантора. Уравнения выведены из энергетического принципа Гамильтона. Проведено сравнение результатов, полученных с учетом различных теорий и их сочетаний.

## A MATHEMATICAL MODEL OF THE CONTACT INTERACTION OF PLATE ELEMENTS OF A NANOELECTROMECHANICAL SYSTEM BASED ON THE SURFACE THEORY OF ELASTICITY

E. Krylova<sup>1</sup>, I. Papkina<sup>2</sup>, A. Krysko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Saratov State University, Russian Federation

<sup>2</sup>Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russian Federation  
ikravzova@mail.ru

**Keywords:** nanoplate, Kirchhoff hypotheses, NEMS, temperature field, surface theory of elasticity.

**Abstract.** In the article, the theory of oscillations of the sensitive element of the NEMS sensor is constructed on the basis of surface and micropolar elasticity theories located in a temperature field. The contact interaction between the plates is taken into account according to the theory of B.Ya. Cantor. The equations are derived from the Hamilton energy principle. The results obtained taking into account various theories and their combinations are compared.

Наноэлектромеханические системы являются высокочувствительными датчиками, имеющими малые размеры.

Целью данной работы является построение теории, наиболее близко описывающей нелинейную динамику чувствительных элементов НЭМС в виде двух пластин с учетом контактного взаимодействия между ними, находящегося в тепловом поле и под действием нормальной нагрузки.

Уравнения движения элемента механической структуры (1), граничные и начальные условия выведены, исходя из принципа Гамильтона, на базе кинематических гипотез Кирхгофа с учетом поверхностной [1] и микрополярной [2] теории. Контактное взаимодействие учитывается по теории Б.Я. Кантора. Температурное поле определяется из решения трехмерного уравнения теплопроводности.

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial N_{xx}^k}{\partial x_k} + \frac{\partial T^k}{\partial y_k} + 2 \frac{\partial N_k^T}{\partial x_k} - \frac{\partial \tau_{xx,k}^\pm}{\partial x_k} - \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{xy,k}^\pm}{\partial y_k} - \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{yx,k}^\pm}{\partial y_k} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 Y_{yz}^k}{\partial y^2} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 Y_{xz}^k}{\partial x \partial y} = \rho_k h_k \frac{\partial^2 u^k}{\partial t^2}, \\
& \frac{\partial N_{yy}^k}{\partial y_k} + \frac{\partial T^k}{\partial x_k} + 2 \frac{\partial N_k^T}{\partial y_k} - \frac{\partial \tau_{yy,k}^\pm}{\partial y_k} - \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{xy,k}^\pm}{\partial x_k} - \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{yx,k}^\pm}{\partial x_k} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 Y_{xz}^k}{\partial x^2} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 Y_{yz}^k}{\partial x \partial y} = \rho_k h_k \frac{\partial^2 v^k}{\partial t^2}, \\
& \frac{\partial^2 M_{xx}^k}{\partial x_k^2} + \frac{\partial^2 M_{yy}^k}{\partial y_k^2} + 2 \frac{\partial^2 H^k}{\partial x_k \partial y_k} + 2 \frac{\partial^2 M_k^T}{\partial x_k^2} + 2 \frac{\partial^2 M_k^T}{\partial y_k^2} \mp 2K(w^1 - w^2 - \delta)\psi \mp \frac{h_k}{2} \frac{\partial^2 \tau_{xx,k}^\pm}{\partial x_k^2} \mp \frac{h_k}{2} \frac{\partial^2 \tau_{xy,k}^\pm}{\partial x_k \partial y_k} \mp \frac{h_k}{2} \frac{\partial^2 \tau_{yx,k}^\pm}{\partial x_k \partial y_k} - \frac{\partial^2 Y_{xx}^k}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 Y_{yy}^k}{\partial y \partial x} + \frac{\partial^2 Y_{xy}^k}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 Y_{xy}^k}{\partial y^2} + q_k = \rho_k h_k \frac{\partial^2 w^k}{\partial t^2} + \varepsilon_k \rho_k h_k \frac{\partial w^k}{\partial t}, \\
& \frac{\partial^2 T^k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T^k}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T^k}{\partial z^2} = 0
\end{aligned} \tag{1}$$

Здесь  $N_{xx}^k$ ,  $N_{yy}^k$ ,  $T^k$ ,  $M_{xx}^k$ ,  $M_{yy}^k$ ,  $H^k$  – классические усилия и моменты;  $Y_{ij}^k$ ,  $i, j = \{x, y, z\}$  – усилия, вызванные моментными напряжениями;  $\tau_{ij,k}^\pm$ ,  $i, j = \{x, y, z\}$  – поверхностные напряжения;  $N_k^T$ ,  $M_k^T$  – температурные составляющие усилий и моментов  $k$ -й пластины,  $h_k$  – толщина  $k$ -й пластины,  $\varepsilon_k$  – коэффициент диссипации;  $\rho_k$  – плотность материала пластинки;  $q_k(x_k, y_k, t)$  – внешняя нормальная нагрузка;  $K$  – коэффициент жесткости трансверсального обжатия пластины в зоне контакта,  $\psi$  – функция равная 1 в случае, если есть контакт и 0 в противном случае;  $\delta$  – расстояние между пластинами;  $u^k$ ,  $v^k$ ,  $w^k$  – смещение точек  $k$ -й пластины вдоль осей  $x_k$ ,  $y_k$ ,  $z_k$  соответственно. Для замыкания системы необходимо добавить граничные условия для уравнения движения элемента пластины и температурного поля, а также нулевые начальные условия.

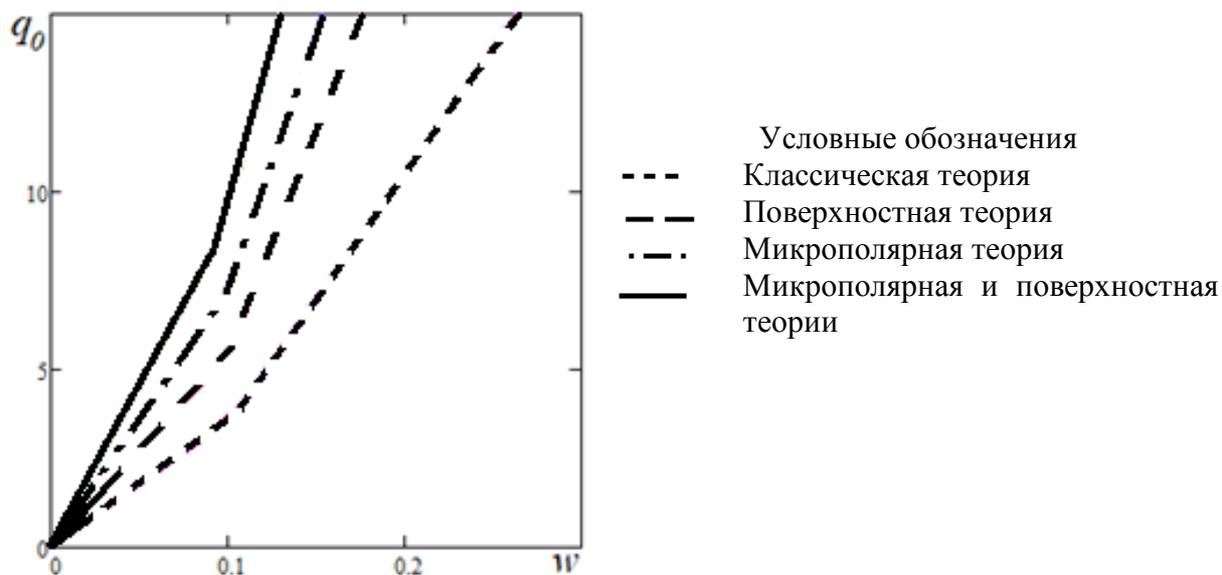


Рис. 1. Зависимость нагрузка–прогиб

Проведено сравнение результатов, полученных по классической, микрополярной, поверхностной теории упругости, а также совместно микрополярной и поверхностной теорий упругости для двух пластин под действием статической нормальной нагрузки. Граничные условия – жесткая заделка. Материал пластин – алюминий  $E = 90 \text{ ГПа}$ ,  $\nu = 0.23$ ,  $\tau_0 = 0.5689 \text{ Н/м}$  – остаточное поверхностное напряжение, зазор между пластинами  $\delta = 0.1h$ ,  $h_1 = h_2 = h = 0.01 \text{ нм}$ . Параметр шкалы длины материала для микрополярной теории принят  $l = 0.5 \text{ нм}$ . На *рис. 1* приведены графики зависимости прогиба от статической нагрузки. Характеристики получены методом установления. Численный эксперимент показал, что прогиб, который дает классическая теория упругости больше, чем прогиб, полученный по микрополярной и поверхностной теории упругости, т.е. учет моментных (напряжения и поверхностного натяжения) увеличивает жесткость системы, находящейся в температурном поле.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 19-19-00215

#### Литература/References

1. Wong E., Sheehan P.E., Lieber C.M. Nanobeam mechanics: elasticity, strength, and toughness of nanorods and nanotubes. *Science* 1997; 277:1971–5.
2. Yang F., Chong A.C.M., Lam D.C.C., and Tong P. Couple stress based strain gradient theory for elasticity, *Int. J. Solids Struct.* 39 (2002), 2731–2743.

# ВЫНУЖДЕННЫЕ ВРАЩЕНИЯ ФУЛЛЕРЕНОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Д.В. Мамонтов, М.А. Бубенчиков, А.М. Бубенчиков, А.В. Лун-Фу

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

**Ключевые слова:** фуллерен, фуллерит, молекулярная динамика, математическое моделирование.

**Аннотация.** Представлена математическая модель молекулярной динамики, позволяющая исследовать поведение молекулярных кристаллов, как в электромагнитных полях, так и при отсутствии полей. Эта модель является универсальной и доступной, а также не требует больших вычислительных мощностей. Материалы, основанные на фуллеренах, обладают уникальными свойствами и находят все больше и больше применений. Проведено исследование фуллерита в твердой фазе, с заряженными фуллеренами, получены характерные состояния вещества, проанализированы их потенциальные свойства.

## FORCED ROTATION OF FULLERENES IN AN ELECTROMAGNETIC FIELDS

D. Mamontov<sup>1</sup>, M. Bubenchikov<sup>1</sup>, A. Bubenchikov<sup>1</sup>, A. Lun-Fu<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Gazprom transgaz Tomsk LLC, Russian Federation  
orevaore@mail.ru

**Keywords:** Fullerene, fullerite, molecular dynamics, mathematical modeling.

**Abstract.** A mathematical model of molecular dynamics is presented, which allows one to study the behavior of molecular crystals both in electromagnetic fields and in the absence of fields. This model is universal and affordable, and also does not require high computing power. The fullerene-based materials continue to exhibit unique properties, and the applicability of such materials is steadily increasing. A study of fullerite in the solid phase with charged fullerenes was carried out, characteristic states of the substance were obtained, and their potential properties were analyzed. The potential use of the material is also described taking into account the properties obtained.

Исследование углеродных материалов и особенно тех, которые в своем составе содержат фуллерены, представляют большой интерес для развития технологий, используемых в различных областях деятельности, включая медицину. Фуллерены были обнаружены в 1985 г. и с тех пор подвергаются тщательному изучению. Фуллеренам посвящено более 25 000 научных статей на английском языке. Фуллерены встречаются повсеместно в природе. На Земле их находят в отложениях, атмосфере и метеоритах. В космосе фуллерены также, по-видимому, очень широко распространены.

Кроме того, помимо стандартных фуллеренов  $C_{60}$  существует целое семейство фуллеренов, состоящих из двадцати атомов углерода, до нескольких тысяч атомов, кроме того, были получены фуллерены на основе бора и азота и их комбинаций друг с другом и углеродом. Эти молекулы могут составлять совершенно разные материалы, стандартный фуллерит, фуллериды, сэндвич-структуры и др. Это дает материалам на основе фуллерена широчайший спектр уникальных свойств, к примеру, фуллерит имеет очень высокую твердость при низкой плотности, при различных условиях может проявлять диэлектрические свойства или сверхпроводимость, иметь низкие и высокие значения теплопроводности, иметь высокую термическую стабильность, пожароустойчивость и т.д.

Целью настоящей работы является демонстрация возможности создания регулярных вращений у ионов фуллеренов, находящихся в твердом фуллерите. При этом сгенерированные вращения не должны нарушать кристаллическую структуру материала. В этом случае мы можем говорить о накоплении энергии на вращательных степенях свободы материала, т.е. о повышении внутренней энергии без увеличения температуры. Высокоэнергичные материалы обладают уникальными механическими свойствами, которые могут быть предсказаны в рамках математического моделирования. Математическая модель построена в рамках классической механики с использованием парного потенциала взаимодействия, углов Эйлера и с учетом электромагнитного поля. В общем случае, зная потенциальное поле, можно полностью определить движение структуры. Конфигурация электромагнитного поля была задана таким образом, чтобы электрическое поле было плоским, гармоническим, т.е. вектор напряженности электрического поля вращается по окружности. Магнитное поле задано постоянным и стабилизирует ось вращения фуллеренов.

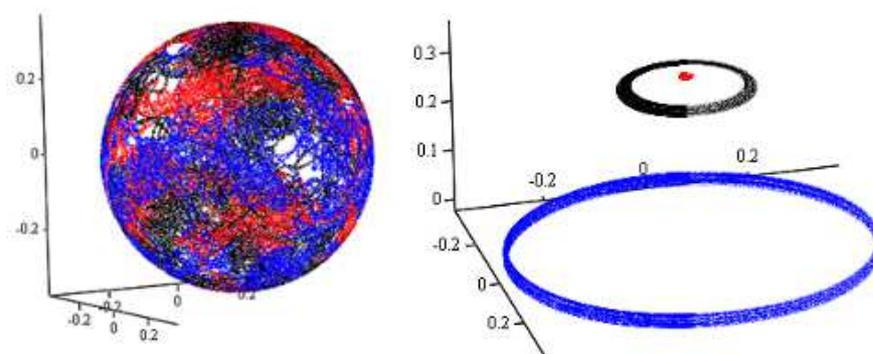


Рис. 1. Траектории трех точек фуллерена, при отсутствии внешних полей(слева) и в сильном электромагнитном поле (справа)

Показана возможность получить стабильное направленное вращение фуллеренов (рис. 1, справа), причем в этом случае можно достичь очень высоких частот вращения. Это позволяет значительно увеличить внутреннюю энергию материала и увеличить и без того высокую твердость фуллерита.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФ № 19-71-10049

### Литература/References

1. *Herman R.M. and Lewis J.S.* Vibration – rotation-translation spectrum of molecular hydrogen in fullerite lattices around 80 K / *Physica B*. 2009. Vol. 404. Pp. 1581–1584.
2. *Hosseini-Hashemi S., Sepahi-Boroujeni A. and Sepahi-Bourojeni S.* Analytical and molecular dynamics studies on the impact loading of single-layered graphene sheet by fullerene / *Appl. Surf. Sc.* 2018. Vol. 437. Pp. 366–374.
3. *Cai K., Wan J., Yu J., Cai H. and Cai Q.* Molecular dynamics study on welding a defected graphene by moving fullerene / *Appl. Surf. Sci.* 2016. Vol. 377. Pp. 213–220.
4. *Bubenchikov A.M., Bubenchikov M.A., Mamontov D.V. and Lun-Fu A.V.* MD-Simulation of Fullerene Rotation in Molecular Crystal Fullerite / *Crystals*. 2019. Vol. 9. No. 10. Pp. 496.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПОРИСТОЙ ПОЛОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ ЭЛЕМЕНТА ПЕРЕМЕННОЙ ПЛОТНОСТИ ОБЪЕМНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ

**С.А. Михайленко, М.А. Шеремет**

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

**Ключевые слова:** конвекция, неравновесная температурная модель, пористый слой, вращение, переменное тепловыделение.

**Аннотация.** В работе проводится исследование естественной конвекции во вращающейся полости при наличии источника переменного тепловыделения и пористой вставки. Уравнения записаны и решены в переменных «функция тока – завихренность». Для решения уравнений применяется метод конечных разностей. Описано влияние толщины пористого слоя на интенсивность течения жидкости, среднее число Нуссельта на поверхности источника и среднюю температуру в источнике.

## INVESTIGATION OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN A ROTATING POROUS SQUARE CAVITY WITH AN ELEMENT OF VARIABLE VOLUMETRIC HEAT GENERATION

**S. Mikhailenko, M. Sheremet**

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

**Keywords:** convection, local thermal non-equilibrium model, porous layer, rotation, variable heat generation.

**Abstract.** Natural convection in a rotating square cavity with an element of variable volumetric heat generation and porous insert has been studied. The governing equations have been written using the non-primitive variables «stream function – vorticity». The equations have been solved by the finite difference method with a uniform grid. The effects of porous layer thickness on the flow rate, average Nusselt number at the heater surface and average temperature within the heater have been studied.

**Введение.** Охлаждение тепловыделяющих элементов является актуальной и широко распространённой задачей. Нагреваемые во время эксплуатации элементы встречаются во всевозможных системах электронной аппаратуры [1]. Для интенсификации теплоотвода в таких системах можно использовать пористые материалы, которые располагают вокруг нагреваемых элементов.

**Цель и задачи.** Целью данной работы является математическое моделирование естественной конвекции во вращающейся с постоянной угловой скоростью квадратной полости, заполненной жидкостью, при наличии пористой вставки. Вертикальные стенки охлаждаются, горизонтальные стенки теплоизолированы. На нижней стенке полости находится элемент переменного объемного тепловыделения.

**Методы решения.** Дифференциальные уравнения естественной конвекции во вращающейся пористой полости сформулированы в преобразованных переменных «функция тока – завихренность». Полученная модель была проверена на соответствие решением тестовых задач [2–4]. При решении уравнений применялся метод конечных разностей на равномерной сетке [5].

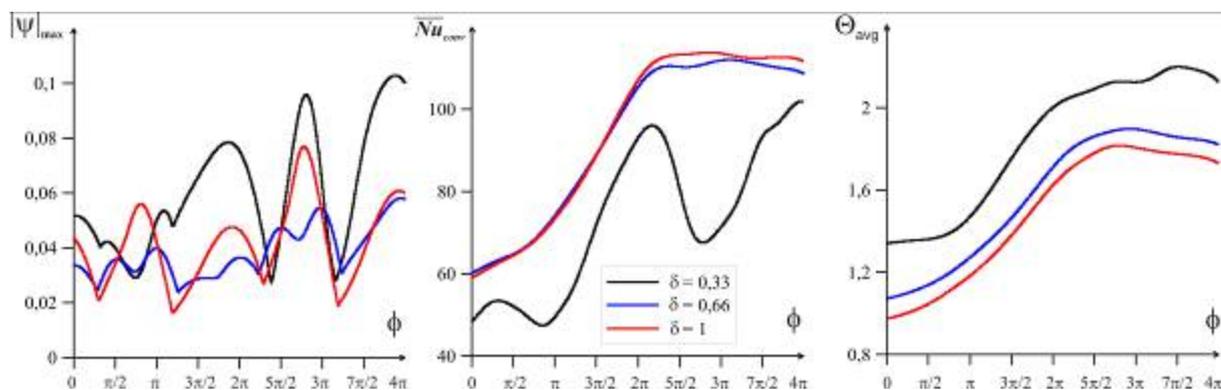


Рис. 1. Изменение интенсивности течения, среднего числа Нуссельта и средней температуры в источнике при  $Ta=10^4$  и  $f=0.1$  в течение двух оборотов полости

**Результаты и выводы.** Исследования были проведены для различных толщин пористого слоя. Влияние толщины пористой вставки  $\delta$  изображено на рис. 1. При увеличении  $\delta$  наблюдается снижение интенсивности конвективных потоков. При этом среднее число Нуссельта увеличивается за счет увеличения площади соприкосновения пористого материала с жидкостью.

Средняя температура в источнике при этом снижается. В результате можно установить, что толщина пористой вставки может рассматриваться как управляющий параметр для эффективной пассивной системы охлаждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ для молодых российских ученых (грант МД-821.2019.8).

### Литература/References

1. *Hung T.C.* Conjugate heat transfer analysis for the passive enhancement of electronic cooling through geometric modification in a mixed convection domain / T.C. Hung, C.S. Fu // Numer Heat Transfer A, 2010. Vol. 35(5). Pp. 519–535.

2. *Hamady F.J.* A study of natural convection in a rotating enclosure / F.J Hamady., J.R Lloyd., K.T. Yang, H.Q. Yang // J. Heat Transfer, 1994. Vol. 116. Pp. 136–143.

3. *Tso C.P.* Numerical segregation of the effects of body forces in a rotating, differentially heated enclosure / C.P. Tso, L.F. Jin, K.W. Tou // Numer Heat Transfer A, 2007. Vol. 51. Pp. 85–107.

4. *Kazmierczak M.* Buoyancy-driven flow in an enclosure with time periodic boundary conditions / M. Kazmierczak, Z. Chinoda // International Journal of Heat and Mass Transfer 1992. Vol. 35, Issue 6. Pp. 1507–1518.

5. *Mikhailenko S.A.* Effects of uniform rotation and porous layer on free convection in an enclosure having local heat source / S.A. Mikhailenko, M.A. Sheremet, Omid Mahian // International Journal of Thermal Sciences, 2019. Vol. 138. Pp. 276–284.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО НАГРЕВА ПИРОТЕХНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ПРОВОДНИКОМ-ТЭНОМ В РЕЖИМЕ ЗАЖИГАНИЯ МЕТАТЕЛЬНОГО ЗАРЯДА

**Р.С. Пушкарская, С.В. Синяев**

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

**Ключевые слова:** нагрев, электрический разряд, проводник-тэн, теплопередача, пиротехническое покрытие.

**Аннотация.** Методами математического моделирования исследуются возможности устройства импульсного нагрева слоя теплопроводного пиротехнического покрытия (ПП), нанесенного на тонкий фольговый проводник, нагреваемый электрическим разрядом гальванически подключаемой к нему конденсаторной батареей. Анализируется влияние электротехнических параметров устройства, электрофизических свойств материала проводника и теплофизических свойств ПП на динамику нагрева проводника и ПП применительно к схемам плазмозамещающего зажигания метателных зарядов. Приводятся результаты анализа параметрического исследования работы модельного устройства электроимпульсного нагрева ПП, обеспечивающего условия зажигания покрытия за времена порядка одной миллисекунды с момента начала нагрева.

# MATHEMATICAL MODELING OF ELECTRICAL PULSE HEATING OF PYROTECHNIC COATING BY CONDUCTOR-HEATING ELEMENT IN IGNITION MODE OF PROPELLANT CHARGE

R. Pushkarskaya, S. Sinyaev

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

**Keywords:** heating, electric discharge, conductor-ten, heat transfer, pyrotechnic coating.

**Abstract.** Methods of mathematical modeling are used to study the possibility of a device for pulsed heating of a layer of a heat-conducting pyrotechnic coating (PC) deposited on a thin foil conductor, which is heated by an electric discharge of a capacitor bank galvanically connected to it. The influence of electrical technology parameters of the device, electrophysical properties of the conductor material and thermophysical properties of PC on the dynamics of heating of the conductor and PC to the schemes of plasma-replacement ignition of propellant charges is analyzed. The results of the analysis of parametric studies of the operation of a model device for electrical pulse heating of PC providing the ignition conditions of the coating for times of the order of one millisecond from the moment of the heating start, are presented.

Применение высокоэнергетических пиротехнических составов в устройствах зажигания метательных зарядов [1] позволяет значительно снизить затраты электрической энергии в электро-термохимических ствольных системах [2]. Поэтому актуальной является разработка математической модели и методики расчета процессов электроимпульсного нагрева пиротехнических покрытий (ПП), обеспечивающих их зажигание и устойчивое горение.

Рис. 1. Общая схема устройства:  
С – емкость батареи; К – ключ



Настоящая работа посвящена решению этой задачи применительно к устройству нагрева ПП, нанесенного на поверхность тонкостенного П-образного проводника, гальванически соединенного с источником электрической энергии (рис. 1).

Интегральная зависимость теплового потока в покрытие  $Q$  от мощности нагрева  $N$  получена при решении тепловой задачи для полупространства, на границе которого задан тепловой поток [3], и уравнения баланса тепловой энергии  $N$ :

$$Q(t) = b \cdot \int_0^t N(\tau) \cdot \left[ (\pi \cdot (t - \tau))^{-0.5} - b \cdot F(b \cdot \sqrt{t - \tau}) \right] \cdot d\tau, \quad (1)$$

$$F(z) = \exp(z^2) \cdot \operatorname{erfc}(z), \quad b = 2 \cdot (h \cdot \rho \cdot c)^{-1} \cdot \sqrt{\lambda_c \cdot \rho_c \cdot c_c},$$

где  $\lambda_c$ ,  $c_c$ ,  $\rho_c$  – удельные значения теплопроводности, теплоемкости и плотности ПП,  $h$  – толщина тэна,  $\rho$  и  $c$  – его плотность и удельная теплоемкость,  $t$  – время. Исходная система уравнений включает в себя уравнение электрической цепи тэна и интегро-дифференциальные уравнения для его температуры  $T$  и сопротивления  $R$ , полученные с учетом (1). Распределение температуры  $T_c$  в ПП рассчитывается с помощью решения [3]:

$$T_c(t, x) = T_0 + b_c \cdot \int_0^t Q(\tau) \cdot \exp\left[\frac{-x^2}{4 \cdot \chi_c \cdot (t - \tau)}\right] \cdot \frac{d\tau}{\sqrt{t - \tau}}, \quad \chi_c = \frac{\lambda_c}{\rho_c \cdot c_c},$$

$$b_c = \frac{1}{S_q \cdot \sqrt{\pi \cdot \lambda_c \cdot \rho_c \cdot c_c}},$$

где  $S_q$  – площадь контактной поверхности тэна с ПП,  $x$  – линейная координата по нормали к контактной поверхности  $x=0$ ,  $T_0$  – начальная температура ПП и тэна.

Задача решается в пакете MathCad методом последовательных приближений. Тепловой поток в покрытие для  $n$ -й итерации определяется через величину мощности омического нагрева тэна из  $(n-1)$  – итерации по формуле (1). Начальное приближение для теплового потока берется в виде:  $Q_{(0)}(t) = k \cdot N_{(0)}(t)$ , где  $k = \text{const}$ ,  $0 < k < 1$ .

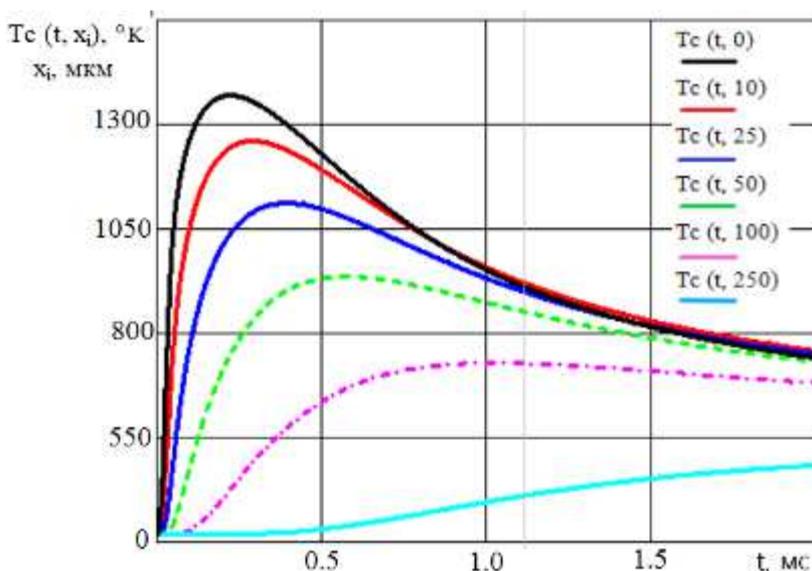


Рис. 2. Изменение температуры в слоях ПП «Zr + PbO<sub>2</sub>» — ПП, — тэн

На *рис. 2* приведены результаты расчета процесса нагрева ПП «Zr+PbO<sub>2</sub>» тэном из титановой фольги толщиной 70 мкм. Другие параметры устройства приведены в таблице. В течение 1 мс слой покрытия толщиной 100 мкм прогревается до температуры ~750 °К, а слой в 50 мкм прогревается до температуры ~950 °К за 0.5 мс.

*Таблица. Результаты расчетов нагрева ПП тэнами из различных материалов*

	T <sub>max</sub> , °К	C, мФ	U <sub>0</sub> , кВ	W <sub>C</sub> , кДж	W <sub>Q</sub> , кДж	КПД, %	J <sub>max</sub> , кА	t(T <sub>max</sub> ), мкс
<b>Mg</b>	952	1.6	0.82	0.538	0.469	87.3	36.6	70
<b>Ti</b>	952	5	0.59	0.87	0.788	90.5	12.6	190
<b>Cu</b>	1379	1	1.75	1.53	1.18	76.8	70.4	200
<b>Ti</b>	1370	5	0.8	1.6	1.45	90.6	16	220
<b>Ti</b>	1820	5	1	2.5	2.264	90.5	18.7	260

Из результатов в таблице, следует, что для нагрева ПП до температур ~1000 °К целесообразно применять тэн из магниевой фольги, а для температур нагрева – 1300÷1800 °К – тэны из титановой фольги.

Построены математическая модель и инженерная методика расчета нагрева пиротехнического покрытия фольговым тэном при разряде конденсаторной батареи. Определены параметры лабораторного устройства для нагрева ПП в широком диапазоне температур за времена менее 1 мс при эффективности нагрева ~90%.

### Литература

1. *Sinyaev S.V., Kramar M.A., Kulpin V.I., Surkov V.G.* Plasma-Replacement Technology of ETC-Ignition of Powder Charges in High-Velocity Launchers // IEEE Transactions on Magnetics. 2007. No. 1, Vol. 43. Pp. 318–321.
2. *Chaboki A., Zelenac S., Jsle B.* Recent Advances in Electrothermal-Chemical Gun Propulsion et United Defense, L.P. // IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, №1, 1997. Pp. 284–288.
3. *Карслоу Г., Егер Д.* Теплопроводность твердых тел. М.: Наука. 1964. 487 с.

### References

1. *Sinyaev S.V., Kramar M.A., Kulpin V.I., Surkov V.G.* Plasma-Replacement Technology of ETC-Ignition of Powder Charges in High-Velocity Launchers // IEEE Transactions on Magnetics. 2007. No. 1, Vol. 43. Pp. 318–321.
2. *Chaboki A., Zelenac S., Jsle B.* Recent Advances in Electrothermal-Chemical Gun Propulsion et United Defense, L.P. // IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, № 1, 1997. Pp. 284–288.
3. *Carslow H.S., Jaeger J.C.* Teploprovodnost' tverdykh tel. M.: Nauka, 1964. 487 p.

# СТРУКТУРА ПОТОКА НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ В Т-ОБРАЗНОМ КАНАЛЕ С УСЛОВИЕМ ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ НА ТВЕРДОЙ СТЕНКЕ

И.А. Рыльцев, О.А. Дьякова

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
ryltsev\_i@ftf.tsu.ru

**Ключевые слова:** математическое моделирование, ламинарное течение, неньютоновская жидкость, условие проскальзывания, Т-образный канал.

**Аннотация.** В работе исследуется установившееся течение неньютоновской несжимаемой жидкости в плоском Т-образном канале при заданных значениях давления на границах втекания/вытекания. Эффективная вязкость исследуемой жидкости определяется в соответствии с реологическим законом Оствальда-де Ваале. На твердых стенках используется условие проскальзывания Навье. Сформулированная задача решается численно с помощью оригинальной программы для ЭВМ. В результате проведенного исследования выявлены характерные режимы течений, отличительной чертой которых является перераспределение потока и изменение направления течения жидкости. Выполнена оценка влияния основных параметров на структуру потока степенной жидкости в Т-образном канале.

## THE STRUCTURE OF A NON-NEWTONIAN FLUID FLOW IN A T-CHANNEL WITH SLIP BOUNDARY CONDITIONS ON A SOLID WALL

I. Ryltsev, O. Dyakova

National Research Tomsk State University, Russian Federation  
ryltsev\_i@ftf.tsu.ru

**Keywords:** mathematical simulation, laminar flow, non-Newtonian fluid, slip condition, T-channel.

**Abstract.** In this paper, a steady non-Newtonian fluid flow in a T-channel under given pressure values at the inlet/outlet boundaries is studied. The apparent viscosity of the considered fluid is determined in accordance with the Ostwald-de Waele power law. On the solid walls, the Navier slip condition is used. The problem is solved numerically using an original computer program. As a result of the study, characteristic flow regimes are revealed which are distinguished by the flow transfer and fluid flow redirection. The effect of main parameters on the structure of the power-law fluid flow in the T-shaped channel is assessed.

Исследования течений реологически сложных жидкостей в каналах различной формы представляют большой интерес не только для научного сообщества, но и ввиду их практической значимости для многих областей промышленности.

Целью настоящей работы является выявление особенностей течения реологически сложной жидкости в Т-образном канале.

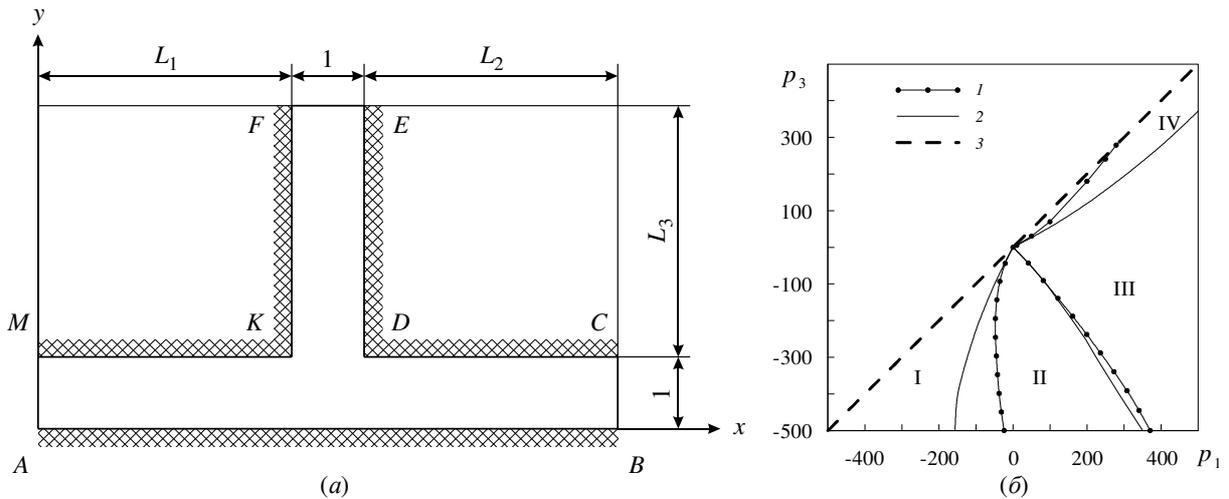


Рис. 1. Т-образный канал (а); диаграмма режимов течения при различных значениях  $\beta$  при  $m = 0.8$ : 1 –  $\beta = 0.4$ , 2 –  $\beta = 0$ , 3 –  $p_1 = p_3$  (б)

Рассматривается установившееся ламинарное течение неньютоновской несжимаемой жидкости в плоском Т-образном канале. Область течения ограничена твердыми стенками МКФ, ЕDC и АВ. Жидкость втекает или вытекает через граничные сечения АМ, FE и ВС. Геометрия канала схематично показана на рис. 1, а.

Математическую основу задачи образует система уравнений движения и неразрывности [1], которые в безразмерной форме имеют вид

$$\begin{aligned}
 u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \eta \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \eta \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x}, \\
 u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \eta \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \eta \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial y}, \\
 \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0.
 \end{aligned}$$

Реологическое поведение жидкости описывается степенным законом Оствальда-де Ваале [2], в котором безразмерная вязкость определяется выражением  $\eta = A^{m-1}$ .

Здесь  $u, v$  – компоненты вектора скорости в декартовой системе координат  $(x, y)$ ;  $p = \frac{P^* - P_{FE}^*}{P_0^*}$  – давление;  $A = (2e_{ij}e_{ji})^{\frac{1}{2}}$ ,  $e_{ij}$  – компоненты тензора скоростей деформаций;  $m$  – показатель нелинейности. В качестве масштабов обезразмеривания приняты следующие величины: длины –  $L_0$  – шири-

на канала в сечении  $AM$ , скорости  $u_0 = \left(\frac{\eta_0}{\rho L_0^m}\right)^{1/(2-m)}$ ; давления  $p_0 = \left(\frac{\eta_0^2}{\rho^m L_0^{2m}}\right)^{1/(2-m)}$ , где  $\rho$  – плотность,  $\eta_0$  – консистенция жидкости.

В граничных сечениях задаются нулевые касательные компоненты вектора скорости и значения давления. На твердых стенках используется условие проскальзывания Навье:  $u_s = \beta \frac{\partial u_s}{\partial n}$ ,  $u_n = 0$ . Здесь  $\beta$  – безразмерный коэффициент проскальзывания;  $n$  – внешняя нормаль к твердой стенке. В случае  $\beta = 0$  на твердых стенках выполняется условие прилипания. В выходном сечении реализуются «мягкие» граничные условия.

Решение задачи заключается в получении полей скорости и гидродинамического давления и реализуется численно. В качестве метода дискретизации исходной системы дифференциальных уравнений используется метод контрольных объемов. Для корректировки полей скорости и давления применяется процедура SIMPLE [3]. Стационарные поля скорости и давления рассчитываются с помощью метода установления.

Для течения степенной жидкости было выявлено 4 характерных режима течения, отличающихся направлением движения жидкости в граничных сечениях. На основе полученных данных были построены диаграммы режимов. На *рис. 1, б* приведена диаграмма для псевдопластичной жидкости, позволяющая определить значения основных параметров задачи, которые требуется задать на границах втекания/вытекания для реализации необходимого режима течения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 18-38-00259 мол\_а.

### Литература

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. М.: Наука, 1973. 848 с.
2. Шульман З.П. Конвективный теплоперенос реологически сложных жидкостей / З.П. Шульман. М.: Энергия, 1975. 352 с.
3. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 124 с.

### References

1. Loytsyanskiy L.G. Fluid and gas mechanics. Moscow: Nauka, 1973. 848 p. (Rus.)
2. Shulman Z.P. Convective heat and mass transfer of rheologically complex fluids. Moscow: Energiya, 1975. 352 p. (Rus.)
3. Patankar S.V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. New York: Taylor & Francis, 1980. 214 p.

# АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ ПЕРЕМЕННОЙ ПЛОЩАДИ СЕЧЕНИЯ

К.Е. Рыльцева, И.А. Рыльцев

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

**Ключевые слова:** течение жидкости, степенной закон, скачок сечения, вязкая диссипация, неизотермические условия.

**Аннотация.** В работе проводится численное исследование течения степенной жидкости в осесимметричном канале переменной площади сечения в неизотермических условиях. Математическая постановка задачи записывается в переменных функция тока-вихрь-температура. Реология жидкой среды определяется степенным законом Оствальда-де Ваале. В ходе моделирования учитываются эффекты вязкой диссипации и температурная зависимость вязких свойств жидкости. Для получения стационарного решения задачи используется метод установления с последующей реализацией конечно-разностного алгоритма на основе схемы переменных направлений. Определяющие уравнения, записанные в разностной форме, решаются методом прогонки. На основе результатов параметрических расчетов выполнено сравнение кинематических характеристик течений в изотермических и неизотермических условиях. Проведена оценка потерь давления в зависимости от значений безразмерных параметров.

## ANALYSIS OF FLUID FLOW CHARACTERISTICS IN A CHANNEL WITH A VARYING CROSS SECTION

K. Ryltseva, I. Ryltsev

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

**Keywords:** fluid flow, power law, varying cross section, viscous dissipation, non-isothermal conditions.

**Abstract.** In this paper, a numerical simulation of a power-law fluid flow through an axisymmetric channel with a varying cross section under non-isothermal conditions is carried out. Mathematical formulation of the problem uses stream function-vorticity-temperature variables. The liquid medium rheology is defined by the Ostwald-de Waele power law. Viscous dissipation effects and temperature-dependence of the viscosity are taken into account when simulating the process. An asymptotic time solution to the unsteady flow equations is obtained in order to yield a steady-state solution to the initial problem. The formulated problem is solved using the finite-difference method based on the alternative directions scheme. The difference equations are solved by tridiagonal matrix algorithm. On the basis of the parametric calculation results, kinematic characteristics of the isothermal and non-isothermal flows are compared. Pressure losses are assessed with respect to dimensionless criteria.

Течения в каналах с элементами переменной площади сечения встречаются во многих технических приложениях, связанных с литьем под давлени-

нием, экструзией, термоформовкой и различными процессами при переработке полимерных композиций. В случаях, когда температурные эффекты играют несущественную роль, ими стараются пренебречь, что позволяет рассматривать задачи в упрощенной изотермической постановке. Однако преимущественно перечисленные процессы реализуются в неизотермических условиях, что необходимо учитывать в ходе моделирования, поскольку температурные эффекты оказывают значимое влияние на структуру потока и кинематику течения, а также на энергетические потери.

Целью данной работы является численное моделирование неизотермического ламинарного течения степенной жидкости в канале с сужением. Требуется выполнить сравнение кинематических характеристик течений в изотермических и неизотермических условиях, провести анализ структуры течений, оценить потери давления.

Рассматривается ламинарное стационарное течение жидкости в осесимметричном канале с внезапным сужением в неизотермических условиях (рис. 1).

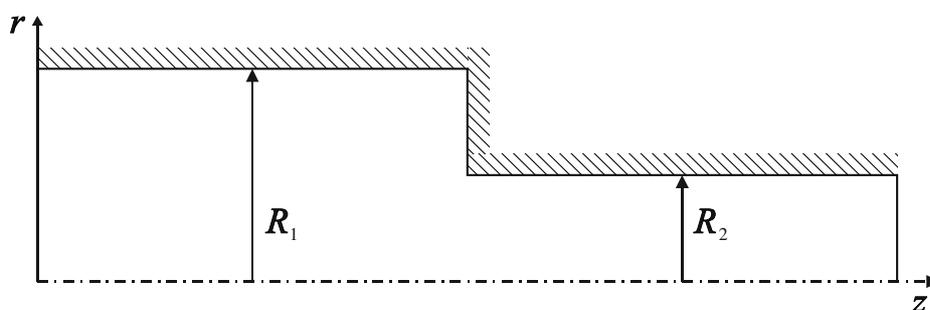


Рис. 1. Область течения

Основные уравнения, входящие в математическую модель процесса, записываются в переменных функция тока  $\psi$ , вихрь  $\omega$  и температура  $\theta$ :

$$\frac{\partial(v\omega)}{\partial r} + \frac{\partial(u\omega)}{\partial z} = \frac{2^n \cdot B}{\text{Re}} \left( \Delta\omega - \frac{\omega}{r^2} \right) + \frac{2^n \cdot S}{\text{Re}}, \quad (1)$$

$$\Delta\psi - \frac{2}{r} \frac{\partial\psi}{\partial r} = -r\omega, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(v\theta)}{\partial r} + \frac{\partial(u\theta)}{\partial z} = \frac{2}{\text{Pe}} (\Delta\theta + 2^{n-1} A^2 B \cdot \text{Br}) - \frac{v\theta}{r}, \quad (3)$$

где

$$v = -\frac{1}{r} \frac{\partial\psi}{\partial z}, \quad u = \frac{1}{r} \frac{\partial\psi}{\partial r}, \quad \omega = \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial r}, \quad A = \left[ 2 \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + 2 \left( \frac{v}{r} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2},$$

$$S = 2 \frac{\partial^2 B}{\partial r \partial z} \left( \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \left( \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 B}{\partial r^2} \right) \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) + 2 \frac{\partial B}{\partial z} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial z} + 2 \frac{\partial B}{\partial r} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{\partial B}{\partial r} \cdot \frac{\omega}{r}.$$

Для описания реологических свойств жидкости используется модифицированное уравнение Оствальда-де Ваале [1], для которого безразмерная эффективная вязкость с учетом температурной зависимости определяется формулой

$$B = \exp[-\theta] A^{n-1}. \quad (4)$$

Здесь  $v$ ,  $u$  – радиальная и аксиальная компоненты скорости соответственно,  $\theta = \beta(T - T_1)$  – безразмерная температура,  $T$  и  $T_1$  – размерные температуры жидкости в потоке и на твердой стенке соответственно,  $n$  – показатель нелинейности жидкости. Основные уравнения содержат следующие безразмерные параметры:

$Re = \rho U^{2-n} D^n / k_1$  – число Рейнольдса,

$Pe = c \rho U D / \lambda$  – число Пекле,

$Bg = U^{n+1} k_1 \beta / \lambda D^{n-1}$  – число Бринкмана,

где  $\rho$  – плотность;  $c$  – теплоемкость;  $\lambda$  – теплопроводность;  $D = 2R_2$  – диаметр узкой части канала;  $k_1 = k_0 \exp[-\beta(T_1 - T_0)]$  – консистенция при  $T_1$ ,  $\beta$  – коэффициент в температурной зависимости  $k_1$ ;  $U$  – среднерасходная скорость в узкой части канала,  $R_1/R_2 = 2$ .

Для задания граничных условий на входе в канал выполняется расчет профиля аксиальной скорости и температуры, которые формируются в одномерном установившемся неизотермическом течении в бесконечном канале при заданном расходе. Полученные распределения позволяют рассчитать значения функции тока и вихря, которые совместно с температурой определяют граничные условия на входной границе. На твердой стенке выполняются условия прилипания, безразмерная температура равна нулю. В выходной границе задаются мягкие граничные условия, на оси канала – условия симметрии. В ходе моделирования процесса учитываются эффекты вязкой диссипации и зависимость вязких свойств жидкости от температуры. Для получения стационарного решения задачи используется метод установления [2] с последующей реализацией конечно-разностного алгоритма на основе схемы переменных направлений [3]. Определяющие уравнения, записанные в разностной форме, решаются методом прогонки [2]. На основе полученных данных осуществляется проверка аппроксимационной сходимости алгоритма.

Восстановленные картины изотермического и неизотермического течений в виде распределения линий тока показывают, что в рассматриваемых случаях структура потока имеет схожее строение: в окрестности входной и выходной границ линии тока параллельны стенкам канала, то есть имеют место одномерные течения, которые характерны для установившегося движения жидкости в бесконечном канале. Слева и справа от области

сужения образуются участки двумерного течения с циркуляционной зоной в окрестности угла. Для количественного анализа течения вводятся безразмерные геометрические характеристики потока (длины участков двумерного течения перед и после скачка сечения, длина циркуляционной зоны), которые исследуются в зависимости от показателя нелинейности жидкости, числа Рейнольдса и числа Пекле. Сравнение изотермического и неизотермического течений показало, что увеличение показателя нелинейности приводит к уменьшению зоны двумерного течения перед скачком сечения и росту циркуляционной зоны в окрестности угла. При этом с увеличением  $n$  в изотермическом случае длина зоны двумерного течения после скачка сечения уменьшается, а в неизотермическом – увеличивается. С ростом преобладания инерционных сил в потоке над вязкими силами (рост  $Re$ ) в рассматриваемых случаях наблюдается увеличение зоны после скачка сечения. Выявлено, что с ростом числа Пекле зона после скачка сечения значительно увеличивается в размерах.

В результате параметрических расчетов выполнено сравнение кинематических характеристик течений в изотермических и неизотермических условиях. Построены распределения вязкости в окрестности скачка сечения. Проведена оценка влияния безразмерных параметров и условий течения на потери давления. Результаты показали, что с ростом числа Пекле потери давления возрастают. При этом увеличение числа Рейнольдса приводит к уменьшению потерь давления.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 18-38-00259 мол\_а.

### Литература

1. *Ostwald W.* Ueber die rechnerische Darstellung des Strukturgebietes der Viskosität // *Kolloid Zeitschrift*. 1929. Vol. 47. No. 2. Pp. 176–187.
2. *Годунов С.К.*. Введение в теорию разностных схем / С.К. Годунов, В.С. Рябенский. М.: Физматгиз, 1962. 340 с.
3. *Самарский А.А.* Введение в теорию разностных схем / А.А. Самарский. М.: Наука, 1971. 553 с.

### References

1. *Ostwald W.* Ueber die rechnerische Darstellung des Strukturgebietes der Viskosität // *Kolloid Zeitschrift*. 1929. Vol. 47. No. 2. Pp. 176–187.
2. *Godunov S.K., Ryabenkiy V.S.* Difference Schemes. North-Holland: Elsevier Sci. Ltd, 1987. 440 p.
3. *Samarskiy A.A.* Introduction to the theory of difference schemes. Moscow: Nauka, 1971. 553 p. (Rus.)

# ПОВЕДЕНИЕ НЕКОТОРЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В.А. Тараканова<sup>1,2</sup>, Д.П. Касымов<sup>1,2</sup>

1 – Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия

2 – Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Россия

veronika.tarakanova@mail.ru

**Ключевые слова:** тепловое воздействие, древесина, время зажигания, горящие частицы.

**Аннотация.** В лабораторных условиях исследовалось поведение образцов древесных строительных материалов (фанера, ориентированно-стружечная плита, древесно-стружечная плита) в результате теплового воздействия от горящих и тлеющих частиц естественного происхождения. Определены некоторые ключевые параметры пожарной безопасности строительных материалов (время задержки зажигания, вероятность воспламенения образцов) в зависимости от размера и количества горящих частиц, наличия воздушного потока, а также от начальной температуры образцов. Анализ результатов показал, что воспламенение образцов происходило только в том случае, когда действие воздушного потока приводило к раздуванию частиц и переходу их из фазы тления в фазу пламенного горения.

## BEHAVIOR OF SOME BUILDING MATERIALS THEIR WOOD UNDER LOCAL THERMAL INFLUENCE

V. Tarakanova<sup>1,2</sup>, D. Kasymov<sup>1,2</sup>

1 – National Research Tomsk State University, Russian Federation

2 – V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Russian Federation

veronika.tarakanova@mail.ru

**Keywords:** Fire exposure, wood, ignition time, firebrands.

**Abstract.** Under laboratory conditions, the behavior of samples of wood building materials (plywood, oriented strand board, and chipboard) as a result of heat exposure from flaming and glowing firebrands of natural origin was studied. Some key parameters of fire safety of building materials (the time of ignition delay, the probability of ignition of samples) are determined depending on the size and number of firebrands, the presence of air flow, as well as on the initial temperature of samples. Analysis of the results showed that the samples were ignited only when the action of the air flow caused the firebrands to inflate and transition from the glowing phase to the flaming phase.

**Введение.** Как показывают многие исследования, определяющую роль в возникновении новых очагов возгорания играют горящие и тлеющие частицы, которые могут переноситься за счет вовлечения в конвекционную колонку. В дальнейшем такие частицы могут взаимодействовать с поверхностью строений, что может привести к их воспламенению [1, 2].

Целью настоящей работы является исследование поведения строительных материалов из древесины при локальном тепловом воздействии.

**Лабораторный эксперимент.** Для проведения исследований была использована лабораторная установка, позволяющая производить сброс частиц на горизонтально расположенный образец строительного материала из древесины. Методика проведения эксперимента, а также основные элементы лабораторной установки подробно представлены в работе [3].

В качестве образцов древесных строительных материалов использовались фанера, древесно-стружечная плита (ДСП), ориентированно-стружечная плита (ОСП) с размерами 150×150 мм и толщиной 18–21 мм (рис. 1). Образец древесины предварительно нагревали до температуры 200–220 °С в течение 4 минут.

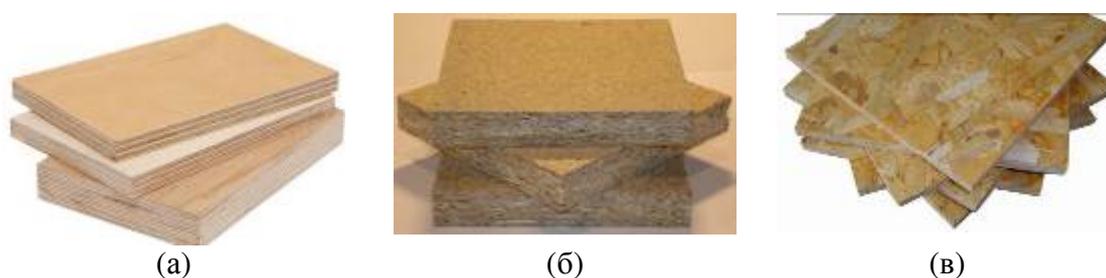


Рис. 1. Образцы строительных материалов: *а* – фанера; *б* – ДСП; *в* – ОСП

В настоящем эксперименте в качестве частиц использовались прямоугольные рейки из сосны, по размеру совпадающие с типичными размерами частиц, определенных в ходе натуральных экспериментов. Влажность частиц не превышала 10 %, для образцов древесных строительных материалов оно составило 6–8 %.

Тлеющие частицы, сбрасываемые на образцы древесины, обдувались с помощью теплового фена, потоком нагретого воздуха со скоростью составляющей 1–2.5 м/с с соответствующими температурами 40–110 °С.

**Результаты эксперимента и выводы.** По итогам проведенной работы, выявлено, что в диапазоне скоростей ветра 0–1 м/с воспламенения образцов не наблюдалось.

Ранее проводились исследования [4] по зажиганию образцов древесины из строительной доски сосны в результате воздействия горящих и тлеющих частиц коры сосны. Методика проведения эксперимента была аналогична. Воспламенение образцов древесины сосны и строительных материалов происходило только в том случае, когда действие воздушного потока приводило к раздуванию частиц и переходу их из фазы тления в фазу пламенного горения. Вероятность зажигания исследуемых образцов растет с увеличением размера частиц, а также с увеличением скорости воздушного потока. Также на процесс воспламенения образцов древесины влияет количество частиц и начальная температура.

Был проведен сравнительный анализ времен задержки зажигания древесины сосны и древесных строительных материалов (фанера, ОСП и ДСП) в зависимости от количества частиц при скоростях воздушного потока 1.5, 2 и 2.5 м/с. При выбранных параметрах эксперимента время зажигания снижалось с увеличением воздушного потока, а также с увеличением количества частиц. Можно также выделить тот факт, что строительные материалы оказались наиболее устойчивее к зажиганию, нежели образцы из сосны, вероятно, это связано с тем, что в состав строительных материалов входят, связующие компоненты (синтетические смолы). В целом вероятность воспламенения образцов древесины и строительных материалов качественно и количественно совпадала, однако требуется проведение дополнительных экспериментов, в частности использование образцов разной толщины, особенно в случае строительных материалов, так как зачастую в качестве внутренней обшивки зданий используют схожие материалы меньшей толщины [5].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-00232).

### Литература

1. Rossi J., Chatelon F., Marcelli T. Fire Intensity // In *Encycl. Wildfires Wildland-Urban Interface Fires*. 2019.
2. Caton S.E., Hakes R.S.P., Gorham D.J. et al. Review of Pathways for Building Fire Spread in the Wildland Urban Interface Part I: Exposure Conditions // *Fire Technol.* 2017. Vol. 53. Pp. 429–473. <https://doi.org/10.1007/s10694-016-0589-z>.
3. Kasymov D.P., Agafontsev M.V., Perminov V.V. and Tarakanova V. A. Studying the resistance to fire of wood under the different type of thermal impact while forest fires // *Proc. SPIE 10833, 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 1083356 (13 December 2018). DOI: 10.1117/12.2504454.
4. Kasymov D. and Paletsky A. Effect of a fire retardant on the ignition of pine wood exposed to smoldering particles of pine bark // *EPJ Web Conf.* 2017. Vol 159 00026. DOI: 10.1051/epjconf/201715900026.
5. Manzello S.L., Quarles S.L. Workshop on Structure Ignition in Wildland-Urban Interface (WUI) Fires // *NIST SP.* 2015:1198.

### References

1. Rossi J., Chatelon F., Marcelli T. Fire Intensity // In *Encycl. Wildfires Wildland-Urban Interface Fires*. 2019.
2. Caton S.E., Hakes R.S.P., Gorham D.J. et al. Review of Pathways for Building Fire Spread in the Wildland Urban Interface Part I: Exposure Conditions // *Fire Technol.* 2017. Vol. 53. P. 429–473. <https://doi.org/10.1007/s10694-016-0589-z>.
3. Kasymov D.P., Agafontsev M.V., Perminov V.V. and Tarakanova V. A. Studying the resistance to fire of wood under the different type of thermal impact while forest fires // *Proc. SPIE 10833, 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 1083356 (13 December 2018). DOI: 10.1117/12.2504454.

4. *Kasymov D. and Paletsky A.* Effect of a fire retardant on the ignition of pine wood exposed to smoldering particles of pine bark // EPJ Web Conf. 2017. Vol 159 00026. DOI: 10.1051/epjconf/201715900026.

5. *Manzello S.L., Quarles S.L.* Workshop on Structure Ignition in Wildland-Urban Interface (WUI) Fires // NIST SP. 2015:1198.

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОЛЕКУЛ ВОДЯНОГО ПАРА СО СТРУКТУРАМИ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

**Е.А. Тарасов, М.Д. Хильчук**

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

**Ключевые слова:** углеродные нанотрубки, водяной пар, наноструктуры, мембраны.

**Аннотация.** В данной работе представлены результаты численного моделирования взаимодействия элементарной ячейки мембраны, состоящей из четырех открытых нанотрубок и молекул водяного пара. Были использованы подходы классической механики и дискретный подход к описанию взаимодействия эффективной молекулы с элементарной ячейкой из четырех коротких нанотрубок. Результаты показывают, что при вращении элементарной ячейки мембраны можно изменять режимы пропускания мембраны по отношению к водяному пару.

## THE INTERACTION OF WATER VAPOR MOLECULES WITH A STRUCTURE BASED ON CARBON NANOTUBES

**E. Tarasov, M. Khilchuk**

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

**Keywords:** carbon nanotubes, water vapor, nanostructures, membranes.

**Abstract:** This paper presents the results of numerical simulations of the interaction of a unit cell of a membrane consisting of four open nanotubes and water vapor molecules. The approaches of classical mechanics and the discrete approach to describing the interaction of an effective molecule with a unit cell of four short nanotubes were used. The results show that the rotation of the unit cell of the membrane can be used to change the transmission modes of the membrane for water vapor.

**Введение.** Структуры, в основе которых лежат аллотропные модификации углерода – фуллерены, нанотрубки и графен, обладают уникальными свойствами, а потому находят широкое применение в различных областях науки и техники [1–2]. Одним из наиболее интересных способов применения структур на основе углеродных нанотрубок (далее УНТ) является со-

здание наноканалов для переноса различных жидкостей или газов. Наиболее распространенным методом изучения подобных структур является молекулярно-динамическое моделирование движения воды, заключенной в одностенные углеродные нанотрубки.

**Цель и задачи исследования.** В рамках данной статьи особый интерес представляет взаимодействие УНТ с газообразными состояниями воды. Предыдущие работы новосибирских и томских ученых [3–5] позволили сформулировать основные подходы и методы изучения процессов взаимодействия различных наноструктур, в том числе состоящих из аллотропных форм углерода с атомами и молекулами, такие как ксенон, водород, гелий, гелион, метан и другие. Применяя эти методы к задаче описания процесса взаимодействия водяного пара с системой углеродных нанотрубок в нормальных условиях, были использованы подходы, разработанные в [5].

Целью данной работы являлось описание взаимодействия наноструктуры, состоящей из открытых углеродных нанотрубок с молекулами водяного пара. В задачи исследования входили литературный обзор по тематике, создание физической и математической моделей взаимодействия, создание численной модели, написание программного кода, его отладка и расчеты взаимодействия с формулировкой выводов.

**Методология.** Основная трудность заключается в том, что потенциал Леннарда-Джонса, применяемый в классических подходах к задачам молекулярной динамики был предложен для описания сферических молекул и идеальных газов, таких как гелий, неон и т.д. В случае молекул воды, так как эта молекула не является сферической, в рамках предложенной модели мы рассмотрим её как эффективную сферу, которой заменим реальную молекулу воды или же будет рассматривать взаимодействие с атомом кислорода. Выбранная нами модель представляет собой описание взаимодействия эффективной сферы молекулы водяного пара (параметры потенциала взяты для кислорода) с системой из четырех открытых одностенных нанотрубок в предположениях дискретного подхода для описания взаимодействия. Дискретный подход заключается в описании процесса взаимодействия тестовой молекулы или атома с каждым атомом исследуемой структуры. Потенциалы, связанные с электростатическими и вращательными эффектами для молекул воды, в этой модели не учтены. Выбранная конфигурация системы выглядит следующим образом. Существует система открытых углеродных нанотрубок (элементарная ячейка мембраны), собранная в квадратную укладку с расстоянием вдоль оси  $y$  и оси  $z$  между осявыми центрами 0.38 нм. Радиусы трубок 0.475 нм, длина 1.136 нм.

**Результаты.** В ходе численного моделирования используется классический метод Рунге – Кутты, точность вычислений контролируется путем оценки отношения полной энергии системы до и после взаимодействия молекулы водяного пара с выбранной укладкой нанотрубок. В [5] также было показано, что форма потенциального барьера нанотрубки слабо зави-

сит от ее длины, что позволяет при численном моделировании работать с системой из 576 атомов углерода, составляющих четыре короткие нанотрубки.

Для получения результатов тестовую молекулу водяного пара помещали в точку с координатами  $x(1) = 5.0$ ,  $y(1) = 0.665$ ,  $z(1) = 0.665$ , что соответствует положению оси симметрии системы, с точкой, расположенной на этой оси на расстоянии 5 нм от центра (точки с координатами  $x(1) = 5$ ,  $y(1) = 0$ ,  $z(1) = 0$ ). С начальной скоростью 650 м/с молекула летела в направлении системы нанотрубок и взаимодействовала с потенциальным барьером системы. Затем положение молекулы смещалось вдоль оси  $y$  сначала на 0.025 нм, затем на расстояние 0.05 нм от начальной точки. Расчеты производились с помощью программы, написанной авторами на языке Fortran. Результаты моделирования представлены на рисунках.

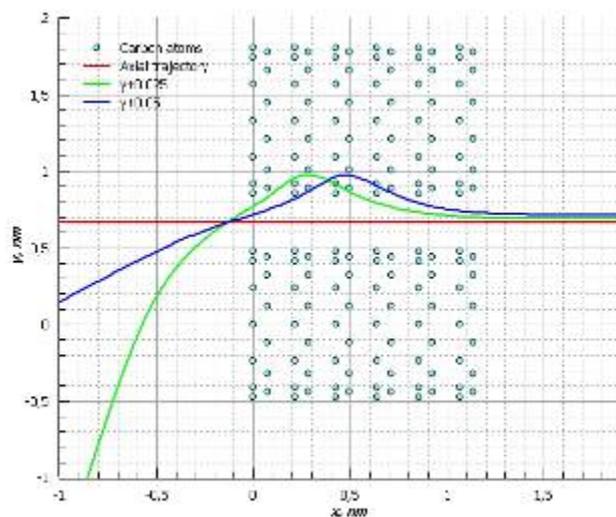


Рис. 1. Взаимодействие молекул водяного пара с элементарной ячейкой, состоящей из четырех открытых нанотрубок в плоскости  $xy$

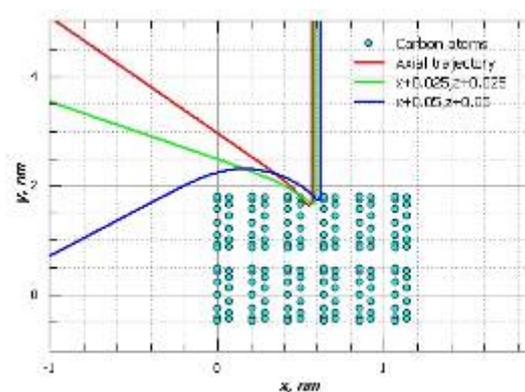


Рис. 2. Взаимодействие молекул водяного пара с элементарной ячейкой, повернутой на угол  $90^\circ$  в плоскости  $xy$

**Заключение.** Как видно из *рис. 1* и *2*, элементарная ячейка способна пропускать молекулы водяного пара, когда они движутся в направлении, совпадающем с осью симметрии нанотрубок, которые составляют мембранную ячейку. В случае, когда направление движения молекул ориентировано перпендикулярно оси симметрии трубок, эта мембрана не пропускает молекулы водяного пара, что говорит о том, что эта система способна изменять моды пропускания молекул в зависимости от ориентации нанотрубок внутри мембраны.

## Литература

1. *Lin Li* A Review on the Progress in Nanoparticle/C Hybrid CMS Membranes for Gas Separation Lin Li, Ruisong Xu, Chengwen Song, Bing Zhang, Qingling Liu, Tonghua Wang Membranes (Basel) 2018 Dec; 8(4): 134. Published online 2018 Dec 17. Doi: 10.3390/membranes8040134
2. *Ebrahimi F.* Nanojunction Effects on Water Flow in Carbon Nanotubes. Ebrahimi, F., Ramazani, F. & Sahimi, M. Sci Rep 8, 7752 (2018) doi:10.1038/s41598-018-26072-6
3. *Рудяк В.Я* Моделирование диффузии наночастиц в газах и жидкостях методом молекулярной динамики / В.Я. Рудяк, С.Л. Краснолуцкий, Д.А. Иванов. Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 6. С. 529–533
4. *Bubenchikov M.A.* Calculating permeability of the low-temperature phase of a fullerite / M.A. Bubenchikov, A.M. Bubenchikov, E.A. Tarasov, O.V. Usenko, A.S. Chelnokova Diamond and Related Materials. 2018. Т. 86. С. 146–158.
5. *Tarasov E.A.* Comparison of Two Elementary Nanomembranes Cells for Gas Mixture Separation Problem, Key Engineering Materials, Vol. 769. Pp. 128–133, 2018.

## References

1. *Lin Li* A. Review on the Progress in Nanoparticle/C Hybrid CMS Membranes for Gas Separation / Lin Li, Ruisong Xu, Chengwen Song, Bing Zhang, Qingling Liu, Tonghua Wang Membranes (Basel) 2018 Dec; 8(4): 134. Published online 2018 Dec. 17. Doi: 10.3390/membranes8040134
2. *Ebrahimi F.* Nanojunction Effects on Water Flow in Carbon Nanotubes. / F. Ebrahimi, F. Ramazani. & M. Sahimi. Sci Rep 8, 7752 (2018) doi:10.1038/s41598-018-26072-6
3. *Rudyak V.Ya.* Nanoparticles diffusion simulation in gases and liquids by the molecular dynamics method / V.Ya. Rudyak, S.L. Krasnolutskii, D.A. Ivanov. Atmospheric and Oceanic Optics. 2011. Vol. 24. № 6. С. 529–533.
4. *Bubenchikov M.A.* Calculating permeability of the low-temperature phase of a fullerite / M.A. Bubenchikov, A.M. Bubenchikov, E.A. Tarasov, O.V. Usenko, A.S. Chelnokova Diamond and Related Materials. 2018. Vol. 86. С. 146–158.
5. *Tarasov E.A.* Comparison of Two Elementary Nanomembranes Cells for Gas Mixture Separation Problem, Key Engineering Materials, 2018. Vol. 769. Pp. 128–133.

## О МОДИФИКАЦИИ МЕТОДА ФИКТИВНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ РЕШЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ СМЕШАННЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ ПРОИЗВОЛЬНЫХ ОДНОСВЯЗНЫХ ОБЛАСТЕЙ

**И.С. Телятников<sup>1</sup>, А.В. Павлова<sup>2</sup>, М.С. Капустин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Южный научный центр Российской академии наук, Россия

<sup>2</sup>Кубанский государственный университет, Россия  
ilux\_t@list.ru

**Ключевые слова:** метод фиктивного поглощения, интегральное уравнение, осциллирующее ядро, факторизация, осесимметричная задача.

**Аннотация.** В работе метод решения интегральных уравнений (ИУ) и систем интегральных уравнений смешанных контактных задач, называемый методом фиктивного

поглощения (МФП), развивается применительно к задачам для односвязных областей сложной формы. Описано развитие МФП в части выбора базисных функций, в том числе обобщенное на случай, когда штамп или дефект имеют невыпуклую область в плане. Для областей сложной конфигурации предполагается, что их можно представить как объединение конечного числа выпуклых замкнутых ограниченных областей. Области разбиения могут иметь общие участки границ. Используемые вспомогательные функции присутствуют в окончательном представлении решения только под знаками интегральных операторов, поэтому в качестве последних предлагается выбрать производные дельта-функций Дирака, носители которых совпадают с граничными множествами введенных областей. Такой выбор базисных функций, более сложный по сравнению с традиционно используемыми дельта-функциями, позволяет получить более удобную форму представления решения.

## MODIFICATION OF THE FICTITIOUS ABSORPTION METHOD FOR SOLVING INTEGRAL EQUATIONS OF MIXED PROBLEMS FOR ARBITRARY SIMPLY CONNECTED REGIONS

I. Telyatnikov<sup>1</sup>, A. Pavlova<sup>2</sup>, M. Kapustin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation

<sup>2</sup>Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation  
ilux\_t@list.ru

**Keywords:** fictitious absorption method, integral equation, oscillating kernel, factorization, axisymmetric problem.

**Abstract.** We presented a modification of the fictitious absorption method (FAM), which is used to solve integral equations (IE) of mixed dynamic problems. The method was generalized for the case of the defector stamp occupying a non-convex in plane area. For regions of complex configuration, we assumed the possibility of their representation as a union of convex bounded closed regions, possibly with common boundary sets. We proposed to modify the method in terms of the selection of basis functions that are present in the solution only under the signs of integral operators. The derivatives of Dirac delta functions with supports in the boundary sets of the considered regions were chosen as such. A more complex form of the functions used provided a more convenient form of the solution.

**Введение.** Изучение процессов контактного взаимодействия тел, подверженных вибрационным воздействиям, в машиностроении, в строительстве и других отраслях является важной задачей. Исследование контактных явлений приводит к смешанным динамическим задачам, которые могут быть сведены к интегральным уравнениям (ИУ) и системам ИУ (СИУ).

В работе метод решения интегральных уравнений и систем интегральных уравнений смешанных контактных задач, называемый методом фиктивного поглощения (МФП) [1–3], развивается применительно к задачам для односвязных областей сложной формы. Описана модификация МФП в части выбора базисных функций, в том числе обобщенная на случай, когда штамп или дефект имеют невыпуклую область в плане.

**Цель работы** – развитие эффективного метода решения интегральных уравнений с осциллирующим символом ядра, характерных для смешанных задач теории упругости при установившемся режиме колебаний.

Авторами представлена модификация МФП. В основу метода положено преобразование сильно осциллирующего и медленно убывающего символа ядра ИУ (матрицы-символа СИУ), которое позволяет переходить к решению ИУ с экспоненциально убывающими с ростом аргумента символом ядра. При этом выделяются осциллирующие составляющие решения, чтобы в качестве новой неизвестной выступала неосциллирующая функция.

Для областей сложной конфигурации предполагается, что их можно представить как объединение конечного числа выпуклых замкнутых ограни-

ченных областей  $\Omega = \bigcup_{m=1}^M D_m$ ,  $M < \infty$ . Области разбиения могут иметь общие

участки границ. Используемые вспомогательные функции присутствуют в окончательном представлении решения только под знаками интегральных операторов, поэтому в качестве последних предлагается выбрать производные дельта-функций Дирака, носители которых совпадают с граничными множествами введенных областей. Такой выбор базисных функций, более сложный по сравнению с традиционно используемыми дельта-функциями [1–3], позволяет получить более удобную форму представления решения.

Как иллюстрация использования модифицированного МФП в части базисных функций приведены решения интегральных уравнений 1-го рода осесимметричной задачи об установившихся колебаниях упругого слоя с заземленной нижней гранью под действием поверхностной нагрузки и нагрузках на заглубленных вертикальных включениях [3]. Рассматривался круглый жесткий штамп, без трения контактирующий с упругим слоем. К штампу приложена гармоническая вертикальная нагрузка. Система заглубленных вертикальных включений, расположенных по окружности, подвергается нагрузке, моделируемой объемной силой. Применением интегральных преобразований Ханкеля задача сведена к интегральным уравнениям первого рода относительно контактных напряжений (на включениях и под штампом). В качестве вспомогательного рассматривалось уравнение вида с правой частью в виде функции Бесселя первого рода нулевого порядка

$$\int_0^a k(r, \tau) q_\eta(\tau) \tau d\tau = J_0(\eta r), \quad 0 \leq \tau \leq a, \quad k(r, \tau) = \int_{\sigma_0} K(\alpha) J_0(\alpha r) \alpha d\alpha.$$

Функция символа ядра аппроксимируется с учетом возможности ее последующей факторизации относительно контура  $\sigma_0$ , почти всюду совпадающего с вещественной осью.

Полученные представления решений позволяют наглядно представить особенности и структуру распределения напряжений при взаимодействии включений и штампа с упругим слоем. МФП дает возможность в ходе построения решения использовать, как вспомогательные, соответствующие

статические задачи (задачи для сред с сильным затуханием). При этом область применения формул, описывающих приближенные решения задач для установившихся вибрационных процессов, определяется областью применения решений соответствующих задач для сред с затуханием.

**Заключение.** Представленная модификация МФП может быть применена для решения ИУ задач различных областей механики, в том числе механики связных полей [5], дефектоскопии, акустоэлектроники и т.д. Метод может применяться при изучении строения региональных литосферных структур, расчетов характеристик напряженно-деформированного состояния грунтовых оснований, вибрационных воздействий на фундаменты и т.п.

Фрагменты исследования выполнены по тематике ГЗ ЮНЦ РАН, проект № 01201354241, а также при поддержке РФФИ (проект 18-01-00124).

### Литература

1. *Бабешко В.А.* Обобщенный метод факторизации в пространственных динамических смешанных задачах теории упругости. М.: Наука, 1984. 256 с.
2. *Babeshko V.A., Priakhina O.D.* Method of fictitious absorption in plane contact problems of the theory of elasticity in the presence of adhesion // *Journal of Applied Mathematics and Mechanics* 1981. 45(4):535–541.
3. *Ворович И.И., Бабешко В.А., Пряхина О.Д.* Динамика массивных тел и резонансные явления в деформируемых средах. М.: Научный мир, 1999. 248 с.
4. *Kapustin M., Pavlova A., Rubtsov S., Telyatnikov I.* Model of foundation-base system under vibration load // *Communications in Computer and Information Science (CCIS)*. 2014. Vol. 487. Pp. 168–173.
5. *Калинчук В.В., Белянкова Т.И.* Динамические контактные задачи для предварительно напряженных электроупругих тел. М.: Физматлит, 2006. 272 с.

### References

1. *Babeshko V.A.* Generalized factorization method in spatial dynamic mixed problems of elasticity theory. М.: Nauka, 1984. 256 p.
2. *Babeshko V.A., Priakhina O.D.* Method of fictitious absorption in plane contact problems of the theory of elasticity in the presence of adhesion // *J. of Applied Mathematics and Mechanics* 1981. 45 (4). Pp. 535–541.
3. *Vorovich I.I., Babeshko V.A., Pryakhina O.D.* The dynamics of massive bodies and resonance phenomena in deformable media. М.: Scientific World, 1999. 248 p.
4. *Kapustin M., Pavlova A., Rubtsov S., Telyatnikov I.* Model of foundation-base system under vibration load // *Communications in Computer and Information Science (CCIS)*. 2014. Vol. 487. Pp. 168–173.
5. *Kalinchuk V.V., Belyankova T.I.* Dynamic contact problems for prestressed electroelastic bodies. М.: Fizmatlit, 2006. 272 p.

# ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ БИДИСПЕРСНОЙ АЭРОВЗВЕСИ ПОРОШКА БОРА

**А.А. Хахимов, К.М. Моисеева, А.Ю. Крайнов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
akniet.khachimov@mail.ru

**Ключевые слова:** бор, бидисперсная аэровзвесь, скорость горения, численное моделирование, механика реагирующих сред.

**Аннотация.** В настоящей работе выполнено численное исследование скорости распространения пламени по бидисперсной аэровзвеси порошка бора. Целью настоящей работы является параметрическое исследование влияния размера, массовой концентрации и дисперсности фракций частиц на скорость горения бидисперсной аэровзвеси порошка бора. Окисление и горение бора включает три реакции: реакция образования и испарения оксида бора, две поверхностные реакции между кислородом и бором с образованием двух газообразных реагирующих оксидов бора. Математическая модель основана на двухфазной двухскоростной модели реагирующей газодисперсной среды и определяется системой уравнений сохранения массы, импульса, полной энергии газа (с учетом теплопроводности) и частиц с учетом химической реакции на поверхности, уравнений сохранения массы компонентов газовой смеси с учетом их диффузии и выгорания и уравнения выгорания частиц. Задача решалась численно с использованием алгоритмов С.К. Годунова и А.Н. Крайко. В расчетах варьировался состав смеси. Из серии параметрических расчетов получены данные о видимой и нормальной скорости горения смеси порошка бора в зависимости от размера частиц, общей массы частиц в смеси и процентного содержания частиц обеих фракций.

## NUMERICAL CALCULATION OF THE BURNING RATE OF BIDISPERSED AIR SUSPENSION OF BORON POWDER

**A. Khachimov, K. Moiseeva, A. Krainov**

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

**Keywords:** boron, bidispersed air suspension, burning rate, numerical simulation, mechanics of reacting media.

**Abstract.** In this work, we performed a numerical study of the flame propagation velocity over a bidispersed air suspension of boron powder. The aim of this work is a parametric study of the influence of the size, mass concentration and dispersion of particle fractions on the burning rate of bidispersed air suspension of boron powder. Oxidation and combustion of boron includes three reactions: the reaction of formation and evaporation of boron oxide, two surface reactions between oxygen and boron with the formation of two gaseous reacting boron oxides. The mathematical model is based on a two-phase two-speed model of a reactive gas-dispersed medium and is determined by the system of equations of conservation of mass, momentum, total energy of the gas (taking into account thermal conductivity) and particles, taking into account the chemical reaction on the surface, the equations of conservation of

mass of the components of the gas mixture taking into account their diffusion and - combustion and particle burnout equations. The problem was solved numerically using S.K. Godunova and A.N. Kraiko. In the calculations, the composition of the mixture varied. From a series of parametric calculations, data were obtained on the apparent and normal burning rate of a mixture of boron powder depending on the particle size, the total mass of the particles in the mixture, and the percentage of particles of both fractions.

В течение последних десятилетий происходит расширение области практического применения порошкообразных металлов (ПМГ), которые позволяют повысить энергетические и улучшить эксплуатационные характеристики двигательных установок. Одним из перспективных видов порошкообразных металлических горючих является аэрозвесь порошка бора. Обусловлено это такими преимуществами металлосодержащих топлив, как высокая температура пламени, легкость хранения и применения порошкообразных металлов в качестве одного из компонентов псевдожидкого топлива для двигателей летательных аппаратов. Введение порошкообразных металлов в состав твердого топлива позволяет увеличить температуры горения и удельный импульс.

Активно исследование горения порошков бора велось в 1960-х годах и основным выводом этих работ являлось то, что механизм горения частиц бора отличен от механизма горения алюминия и сильно зависит от температуры окружающей среды [1, 2]. В настоящее время тема горения топлив, в состав которых входит бор, снова набирает актуальность.

В настоящей работе выполнено численное исследование скорости распространения пламени по бидисперсной аэрозвеси порошка бора. Целью настоящей работы является параметрическое исследование влияния размера, массовой концентрации и дисперсности фракций частиц на скорость горения бидисперсной аэрозвеси порошка бора.

Постановка задачи и метод решения основывались на работах [2, 3]. Окисление и горение бора включает три реакции: реакция образования и испарения оксида бора, две поверхностные реакции между кислородом и бором с образованием двух газообразных реагирующих оксидов бора. Нагрев частиц приводит к их окислению с образованием окисной пленки. Дальнейший разогрев приводит к испарению окисной пленки. Скорость испарения определяется давлением насыщенных паров вокруг частиц бора. Окисление бора через окисную пленку определяется через эффективный коэффициент массоотдачи, учитывающий слой оксида на частице. Разогрев частиц до температуры выше температуры кипения оксида бора приводит к быстрому испарению окисной пленки и началу гетерогенных химических реакций на поверхности частиц. Гетерогенные химические реакции на поверхности частиц описываются с использованием кинетических констант [2] и с учетом массоотдачи.

Математическая модель основана на двухфазной двухскоростной модели реагирующей газодисперсной среды и определяется системой уравне-

ний сохранения массы, импульса, полной энергии газа (с учетом теплопроводности) и частиц с учетом химической реакции на поверхности, уравнений сохранения массы компонентов газовой смеси с учетом их диффузии и выгорания и уравнения выгорания частиц. Задача решалась численно с использованием алгоритмов С.К. Годунова [4] и А.Н. Крайко [5].

В расчетах варьировались размер частиц первой фракции ( $r_1$ ), общая масса смеси ( $m_p$ ) и процентное соотношение между фракциями частиц в смеси ( $pr_1$  и  $pr_2$ ). Радиус частиц первой фракции  $r_1 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ,  $2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ,  $10^{-6} \text{ м}$ . Радиус частиц второй фракции во всех расчетах задавался равным  $r_2 = 0.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ . Общая масса смеси задавалась  $m_p = 0.25 \text{ кг}$ ,  $0.35 \text{ кг}$ . Процентное соотношение первой фракции задавалось в смеси  $pr_1 = 90, 60, 30, 10\%$ . Процентное соотношение второй фракции – в смеси  $pr_2 = 10, 40, 70, 90\%$ . Результаты расчета представлены на рис. 1.

Согласно полученным результатам увеличение общей массы частиц в смеси приводит к уменьшению видимой  $u_f$  и нормальной  $u_n$  скорости горения аэровзвеси. Уменьшение процентного содержания частиц первой фракции в смеси приводит к росту видимой  $u_f$  и нормальной  $u_n$  скорости горения аэровзвеси. Увеличение размера частиц первой фракции приводит к уменьшению видимой  $u_f$  и нормальной  $u_n$  скорости горения аэровзвеси.

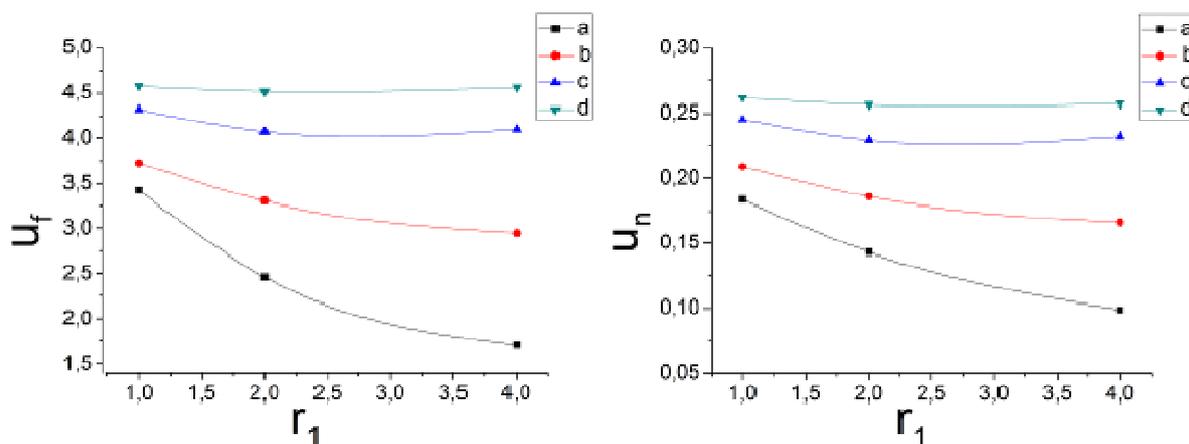


Рис. 1. Распределение скоростей  $u_f$  и  $u_n$  при общей массе смеси  $0.25 \text{ кг}$ , в зависимости от размера частиц первой фракции  $r_1$ .  $pr_1 = 0.9$  (a),  $0.6$  (b),  $0.3$  (c),  $0.1$  (d)

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

### Литература

1. King M.K. Boron Ignition and Combustion in Air-Augmented Rocket Afterburners // Combustion Science and Technology. 1972. Vol. 5. No. 4. Pp. 155–164.
2. Вовчук Я.И., Золотко А.Н., Клячко Л.А., Полищук Д.И. Высокотемпературное горение неподвижной частицы бора в кислородсодержащей среде // Физика горения и взрыва. 1975. Т. 11. № 4. С. 556–563.

3. *Хакимов А.А., Моисеева К.М., Крайнов А.Ю.* Математическое моделирование горения бидисперсной аэровзвеси порошка бора // Динамика многофазных сред тезисы XVI Всероссийского семинара с международным участием. Новосибирск, 2019. С. 167–169.
4. *Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П.* Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976.
5. *Крайко А.Н.* О поверхностях разрыва в среде, лишенной «собственного» давления // Прикладная математика и механика. 1979. Т. 43. № 3. С. 500–510.

### References

1. *King M.K.* Boron Ignition and Combustion in Air-Augmented Rocket Afterburners // Combustion Science and Technology. 1972. Vol. 5. No. 4. Pp. 155–164.
2. *Vovchuk Y.I., Zolotko A.N., Klyachko L.A., Polishchuk D.I.* High-temperature combustion of a stationary boron particle in an oxygen-containing medium // Combustion and Explosion Physics. 1975. Vol. 11. No. 4. Pp. 556–563.
3. *Khakimov A.A., Moiseeva K.M., Kraynov A.Yu.* Mathematical modeling of burning of bidispersed aerial suspension of boron powder // Dynamics of multiphase media theses of the XVI All-Russian seminar with international participation. Novosibirsk, 2019. S. 167–169.
4. *Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.Ya., Kraiko A.N., Prokopov G.P.* Numerical solution of multidimensional problems of gas dynamics. М.: Nauka, 1976.
5. *Kraiko A.N.* On discontinuity surfaces in a medium devoid of “own” pressure // Applied Mathematics and Mechanics. 1979. Т. 43. No. 3. S. 500–510.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ ПО НЕПОДВИЖНОЙ ДРЕВЕСНОЙ ПЫЛИ

**С.К. Ченцова, К.М. Моисеева, А.Ю. Крайнов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
sofya.chencova@mail.ru

**Ключевые слова:** аэровзвесь, древесная пыль, скорость горения, численное моделирование, летучие компоненты.

**Аннотация.** В настоящей работе представлены результаты решения задачи о горении неподвижной аэровзвеси древесной пыли. Целью работы являлось определение особенностей распространения пламени по аэровзвеси. Представлены результаты параметрического исследования задачи. Установлено, что варьирование таких параметров, как размер, массовая концентрация частиц и объемное содержание летучих веществ, оказывают существенное влияние на скорость горения частиц древесной пыли и на форму пламени. Скорость распространения пламени по мелкодисперсной взвеси частиц выше, чем скорость распространения пламени по взвеси крупных частиц. Частицы с большим содержанием летучих компонентов горят быстрее.

# NUMERICAL SIMULATION OF THE PROPAGATION OF A COMBUSTION WAVE OVER STATIONARY WOOD DUST

S. Chentsova, K. Moiseeva, A. Krainov

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

**Keywords:** air suspension, wood dust, burning rate, numerical simulation, volatile components.

**Abstract.** In this paper, we present the results of solving the problem of burning a stationary wood dust aerial suspension. The aim of the work was to determine the characteristics of flame propagation through aerosuspension. The results of a parametric study of the problem are presented. It was found that the variation of parameters such as size, mass concentration of particles and volumetric content of volatile substances have a significant effect on the burning rate of wood dust particles and on the shape of the flame. The speed of flame propagation through a fine suspension of particles is higher than the speed of flame propagation through a suspension of large particles. Particles with a high content of volatile components burn faster.

**Введение.** Одной из актуальных задач физики горения и взрыва является пожаровзрывобезопасность промышленных предприятий. Органическая пыль, являющаяся побочным продуктом производства, представляет потенциальную опасность для предприятий, так как при определенных условиях способна к самовоспламенению и взрыву.

Основной областью применения органической пыли является её использование в качестве низкосортного экономичного вида топлива. Состав топлива определяет скорость распространения пламени и полноту сгорания. Под составом взвеси древесной пыли подразумеваются радиус и массовая концентрация частиц, содержание летучих компонентов и воды в исходной древесной пыли.

**Цель и задачи исследования.** Целью исследования является определение влияния состава древесной пыли на скорость распространения фронта горения в неподвижной аэрозвеси древесной пыли. Для достижения поставленной цели была разработана физико-математическая модель горения неподвижной древесной пыли и проведены параметрические расчеты задачи.

**Постановка задачи.** Физико-математическая постановка задачи основана на работе [1]. Предполагается, что взвесь древесной пыли неподвижна и распределена по плоскости неравномерным образом. Постановка задачи учитывает сушку древесной пыли, выделение летучих компонентов, горение частиц и горение летучих компонентов, диффузию и теплопроводность в газе. Предполагается, что процесс воспламенения и горения древесной пыли состоит из стадии нагрева частиц, стадии выделения летучих компонентов, стадии параллельного горения летучих компонентов в газе и кок-

сового остатка частиц. Гомогенные химические реакции выделения и горения летучих компонентов описываются по закону Аррениуса. Гетерогенная реакция горения коксового остатка описывается с учетом массоотдачи [2]. Начальное распределение массовой концентрации вдоль поперечного направления задавалось неоднородным, по закону

$$m(y) = m_{dust} (1 + \sin(\pi y/L_y)),$$

где  $L_y$  – ширина расчетной области вдоль поперечного направления.

Физико-математическая постановка задачи определяется уравнениями теплопроводности для газа и частиц, уравнениями баланса массы частиц, газа, окислителя в газе, летучих компонентов в частицах и газе.

**Методология исследования.** Задача решается в двухмерной плоской постановке методом продольно-поперечной прогонки [3]. Достоверность расчетов проверялась путем решения частных постановок задачи. Согласно проверке на адиабатическую температуру сгорания частиц погрешность расчета составляет не более 3%. Шаги по пространству были равны  $h_x = 3 \cdot 10^{-5}$  м,  $h_y = 3 \cdot 10^{-5}$  м. Число Куранта выбиралось равным 1. Расчеты проводились для участка  $L_y = 0.02$  м,  $L_x = 0.06$  м.

**Результаты исследования.** Кинетические параметры реакций выделения летучих и горения коксового остатка были взяты из диссертационной работы [4]. Кинетические константы скорости горения летучих компонентов соответствовали работе [1]. Летучие компоненты, выделяющиеся при горении угольной и древесной пыли, представляют собой смесь легких газов типа метана и водорода и горючих смол. В работе [1] на основании монографии [5] для обобщенной реакции горения летучих компонент были взяты параметры, соответствующие горению смол. В настоящей работе было использовано такое же предположение.

В параметрическом исследовании варьировались размер и массовая концентрация частиц, содержание летучих компонентов в частицах. Из серии параметрических расчетов были получены следующие результаты.

1. Скорость распространения пламени по мелкодисперсной взвеси частиц выше, чем скорость распространения пламени по взвеси крупных частиц.

2. С уменьшением объемного содержания летучих компонентов в частицах увеличивается средняя скорость горения частиц.

3. Максимальная температура пламени аэровзвеси при  $m_{dust} = 0.2$  кг/м<sup>3</sup> достигается на боковых границах, наименьшая температура пламени достигается в центре. Это объясняется тем, что расчеты выполнены для смеси с избытком горючего. Наименьшая массовая концентрация частиц (согласно закону распределения частиц по пространству) достигается на боковых границах области, что приводит к большему выгоранию частиц. В центре области кислород расходуется в основном на реакцию горения га-

зоообразных летучих компонентов. Выделившееся при этом тепло расходуется на прогрев частиц.

4. Максимальная температура пламени аэровзвеси при  $m_{\text{dust}} = 0.05 \text{ кг/м}^3$  достигается в центре, наименьшая температура пламени достигается на боковых границах. В этом случае состав взвеси в центре близок к стехиометрическому, на границах наблюдается избыток окислителя. Соответственно, максимум температуры достигается в области наиболее полного сгорания смеси – в центре.

**Заключение.** Разработана физико-математическая модель горения неподвижной взвеси древесной пыли. Выполнено численное решение задачи с использованием метода продольно-поперечной прогонки. Определено, что скорость горения смеси с мелкодисперсными частицами или с большим количеством летучих компонентов в частицах горит с более высокой скоростью, чем крупнодисперсная аэровзвесь древесной пыли, содержащая малое количество летучих компонентов. Получено, что местоположение фронта горения зависит от массовой концентрации частиц в смеси.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №19-48-703006 р\_мол\_а.

### Литература

1. Моисеева К. М., Крайнов А. Ю. Влияние состава угольной пыли на скорость распространения фронта горения по аэровзвеси с неоднородным распределением частиц // Компьютерные исследования и моделирование, 2018. Т. 10, № 2. С. 221–230.
2. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987.
3. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. М.: Наука, 1971.
4. Голубев В.А. Обоснование и совершенствование способов энергетического использования растительных отходов: дис. ... канд. техн. наук / В.А. Голубев. Барнаул, 2014. 160 с.
5. Бойко Е.А. Реакционная способность энергетических углей. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2011.

### References

1. Moiseeva K.M., Krainov A.Y. The influence of the coal dust composition on the propagation speed of the combustion front of the coal dust with an inhomogeneous particle distribution in the air // Computer Research and Modeling, 2018, Vol. 10, № 2. Pp. 221–230.
2. Frank-Kamenetskii D. A. Diffusion and Heat Transfer in Chemical Kinetics (in Rus.), NAUKA Press, Moscow, 1987.
3. Samarsky A.A. Introduction to difference theory, NAUKA Press, Moscow, 1971.
4. Golubev V. A. Justification and improvement of methods of using a plant waste as source of energy, PhD Thesis (01.04.14; 05.14.14), Barnaul, 2014. 160 p.
5. Boyko E. A. Reactivity of energetic coal, Monograph, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 2011.

# ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ВИБРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

**И.В. Щербаков, Б.А. Люкшин**

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия  
scherbakov\_ilja@mail.ru

**Ключевые слова:** математическое моделирование, динамическое воздействие, виброизмерительный преобразователь, верификация результатов, SolidWorks

**Аннотация.** В работе представлены результаты оценки влияния виброизмерительных преобразователей, предназначенных для выработки сигнала измерительной информации о значениях измеряемых параметров нагружения. Так же проведено сравнение экспериментального метода измерения внешнего динамического воздействия и математического расчета, выполненного с использованием численного (конечно-элементного) метода. По итогу показано, что использование результатов математического моделирования на этапе проектирования позволяет не только оценить поведение конструкции при различных видах нагружения, но и определить место правильного расположения виброизмерительных преобразователей для качественного замера и оценить их влияние на результаты исследований.

## INFLUENCE OF LOCATION OF VIBRATION MEASURING CONVERTERS ON EXPERIMENTAL RESULTS

**I. Scherbakov, B. Lyukshin**

Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Russian Federation  
scherbakov\_ilja@mail.ru

**Keywords:** mathematical modeling, dynamic effects, vibration transducer, verification of results, SolidWorks.

**Abstract.** The paper presents the results of assessing the impact of vibration transducers designed to generate a signal of measuring information about the values of the measured loading parameters. A comparison was also made of the experimental method for measuring external dynamic effects and mathematical calculations performed using the numerical (finite element) method. As a result, it was shown that the use of the results of mathematical modeling at the design stage allows not only to evaluate the behavior of the structure under various types of loading, but also to determine the location of the correct location of vibration transducers for high-quality measurement and to assess their impact on research results.

Любой датчик контактного типа вносит погрешность в измерения параметров, для которых он используется. Это происходит в основном за счет его собственных массогабаритных характеристик, правильного расположения и ориентации на приборе. Для последнего большую роль в получении качественных результатов при эксперименте играет опыт специали-

стов. Необходимо точно знать наиболее критичные места для установки датчика. Однако опыт не всегда помогает решить данный вопрос. В этом случае наиболее подходящим инструментом является математическое моделирование. Оно позволяет определить критичные области, проанализировать влияние датчиков и, соответственно, повысить точность экспериментов и качество результатов.

Несмотря на то, что применения средств математического моделирования показывает высокую эффективность в широком спектре задач [1–3], недостатком его является отсутствие большого количества экспериментов и верификаций результатов. Поэтому работы по проведению моделирования и сравнения его результатов с экспериментом актуальны.

В данной работе рассматриваются результаты исследования пластины, имитирующей плату, с учетом и без установленного на ней виброизмерительного преобразователя, проводится оценка ее резонансных частот и поведение при динамическом воздействии (ударных нагрузках), а также проводится верификация расчетных значений с экспериментальными.

Динамическая задача решалась методом конечных элементов с использованием системы уравнений механики сплошной среды, которая включала уравнение движения (1), соотношения Коши (2) и закон Гука (3):

$$\sigma_{ij,j} + \rho F_i = \rho \ddot{u}_i ; \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) ; \quad (2)$$

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{ij} , \quad (3)$$

где точки над переменной обозначают дифференцирование по времени;  $\sigma_{ij}$  – компоненты напряжения;  $\rho$  – плотность;  $F_i$  – компоненты массовых сил;  $\varepsilon_{ij}$  – компоненты деформации;  $u_i$  – компоненты вектора перемещений вдоль координаты  $x_i$ ;  $\lambda$  и  $\mu$  – коэффициенты Ламе;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера,  $i, j$  равны 1, 2, 3; запятая означает дифференцирование по переменной после запятой, повторяющийся индекс означает суммирование.

По результатам исследования было определено:

- влияние ВИПа на результаты модального анализа;
- изменение положения виброизмерительного преобразователя приводит к изменению результатов от 1 до 16%
- сравнение результатов физического эксперимента и математического моделирования показало, что погрешность результатов составила 3%.

Таким образом, использование результатов математического моделирования на этапе проектирования позволяет не только оценить поведение конструкции при различных видах нагружения, но и определить место

правильного расположения датчиков для качественного замера и оценить их влияние на результаты исследований.

### Литература

1. *Dochan Kwak, Cetin Kiris*. CFD technology development at NASA Ames – A mission computing perspective // *Mechanical Engineering Reviews*, Vol. 3, No. 1, 2016. Pp. 25. DOI: 10.1299/mer.15-00429.

2. *Кулешов А.А. [и др.]*. Мониторинг и визуализация напряженно-деформированного состояния причальной конструкции в режиме реального времени // *Вестник Томского государственного университета*. 2015. № 6. С. 73–80. DOI: 10.17223/19988621/38/9.

3. *Костюченко Т.Г., Битуева М.И.* Оценка влияния статических перегрузок на конструкцию корпуса малого космического аппарата формата CUBESAT // *Современные проблемы теории машин*. 2015. № 3. С. 163–167.

### References

1. *Dochan Kwak, Cetin Kiris*. CFD technology development at NASA Ames – A mission computing perspective // *Mechanical Engineering Reviews*. Vol. 3, No. 1, 2016. Pp. 25. DOI: 10.1299/mer.15-00429.

2. *Kuleshov A.A. [et al.]*. Real-time monitoring and visualization of the stress-strain state of the berth structure. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2015. No. 6. Pp. 73–80. (Rus.) DOI: 10.17223/19988621/38/9.

3. *Kostjuchenko T. G., Bitueva M. I.* Ocenka vlijanija staticheskih peregruzok na konstrukciju korpusa malogo kosmicheskogo apparata formata CUBESAT. *Sovremennye problemy teorii mashin*. 2015. No. 3. Pp. 163–167. (Rus.)

## Именной указатель

### А

Абрамова Н.С. 31  
Агафонцев М.В. 254  
Азин А.В. 233  
Александрова А.Г. 224  
Алексеев Е.М. 235  
Алигасанова К.Л. 71, 98  
Антонникова А.А. 159  
Астанина М.С. 239  
Астафурова М.В. 209, 242  
Ахмедова А.Р. 245, 257  
Ахметов А.Ж. 248  
Ахметшин Л.Р. 123

### Б

Баранов П. 13  
Бардаев П.П. 84  
Баурин Н.О. 251  
Белов С.В. 91  
Белоусова Н.С. 34  
Блинкова Е.В. 214  
Блохина А.А. 37  
Бобер И.В. 74  
Большаков Н.А. 184  
Бордовицына Т.В. 224  
Бубенчиков А.М. 288  
Бубенчиков М.А. 288  
Бургомистренко Р.Ю. 71  
Буркин В.В. 190, 203

### В

Валихов В.Д. 125  
Ветрова А.В. 78  
Васильев А.С. 128  
Ворожцов А.Б. 125, 139

### Г

Галушина Т.Ю. 217, 220, 227  
Гарбузов Д.Н. 82  
Гаркаев М.В. 184  
Герман А.А. 178  
Гимаева Н.Р. 175  
Глазырин В.П. 25  
Глотов О.Г. 34  
Голубничий Е.Н. 254  
Гойко В.Л. 40  
Гольдин В.Д. 235  
Горбачева В.Н. 245, 257

Гриф Е.М. 43  
Груздь С.А. 260  
Гурьянов С.А. 217  
Гуськов А.В. 34, 43, 51, 178, 199

### Д

Давыдов С.А. 264  
Данилов М.Н. 84  
Даутбаева Д.Б. 88, 130  
Добрица Д.Б. 61  
Дьякова О.А. 296  
Дьячковский А.С. 190, 203

### Ж

Жуков А.П. 91  
Жуков И.А. 125, 139  
Журавлев А.А. 267

### З

Зверев Н.А. 133  
Зелепугин С.А. 117  
Земсков А.В. 133  
Зейналова Н.Р. 269  
Земляк В.Л. 128, 251, 273  
Зиатдинов М.Х. 48

### Е

Евсеев Н.С. 48  
Ерошенко А.Ю. 149

### И

Иохим К.В. 136  
Ипатов К.И. 273  
Искаков А.Е. 146  
Ищенко А.Н. 190, 203

### К

Кагенов А.М. 94, 98  
Казакбаева А.А. 277  
Кененбаева Д.К. 184  
Капустин М.С. 309  
Касымов Д.П. 254, 303  
Касимов В.З. 190  
Кахидзе Н.И. 101, 130, 139  
Квашинов А.А. 51  
Киселева Т.А. 143  
Кислин М.А. 178

*Козин В.М.* 128, 273  
*Козулин А.А.* 88, 136  
*Козюкова В.В.* 184  
*Колаян Ю.М.* 184  
*Корепанов М.А.* 260  
*Коробенков М.В.* 143  
*Костромин Д.А.* 280  
*Костюшин К.В.* 94, 98, 108, 115  
*Костюшина Н.О.* 94  
*Котоногов В.А.* 98  
*Крайнов А.Ю.* 313, 316  
*Красавин Д.С.* 214  
*Крылова Е.Ю.* 285  
*Крысько А.В.* 285  
*Кузнецов С.А.* 233  
*Кушнарёв А.Г.* 101, 146, 166

## **Л**

*Лубышева А.И.* 104  
*Летнер О.Н.* 220  
*Лукашов О.Ю.* 280  
*Лун-Фу А.В.* 288  
*Люкшин Б.А.* 320

## **М**

*Маевский К.К.* 55  
*Майрамбекова А.М.* 149  
*Мамонтов Д.В.* 288  
*Марков В.А.* 163, 187  
*Мартынов П.С.* 254  
*Маслов Е.А.* 194  
*Мерзляков А.В.* 74  
*Микушина В.А.* 153  
*Милевский К.Е.* 43, 51, 178, 199  
*Михайленко С.А.* 290  
*Модин И.А.* 157  
*Моисеева К.М.* 313, 316  
*Морозова О.Н.* 159  
*Мухин Л.Н.* 18

## **Н**

*Нарикович А.С.* 166

## **О**

*Орлов М.Ю.* 25  
*Орлов С.А.* 94  
*Орлов Ю.Н.* 25  
*Орлова Ю.Н.* 58

## **П**

*Павленко А.А.* 159  
*Павлова А.В.* 309  
*Папкова И.В.* 285  
*Пашков С.В.* 61  
*Перминов В.В.* 254  
*Пономарев С.В.* 91, 233  
*Попандопуло Н.А.* 224  
*Попов Ю.В.* 163, 187  
*Порязов В.А.* 40  
*Поташев А.В.* 104  
*Поташева Е.В.* 104  
*Проханов С.А.* 94  
*Пусев В.И.* 163, 187  
*Пушкарская Р.С.* 292

## **Р**

*Рейно В.В.* 254  
*Рикконен С.В.* 233  
*Розаев К.С.* 190  
*Рогожникова Е.Г.* 273  
*Романдин В.И.* 48  
*Рыльцев И.А.* 296, 299  
*Рыльцева К.Е.* 299

## **С**

*Савченко Н.Л.* 169  
*Селиванов В.В.* 163, 187  
*Середа М.С.* 108, 115  
*Серебряков Д.А.* 101, 166  
*Сидоренко Ю.Н.* 78  
*Сидоров А.Д.* 190  
*Синяев С.В.* 292  
*Скибина Н.П.* 194  
*Смолин И.Ю.* 277  
*Скрипняк В.А.* 136  
*Скрипняк В.В.* 136  
*Смолин И.Ю.* 248, 277  
*Степанов Е.Ю.* 190  
*Сюсина О.М.* 227

## **Т**

*Тараканова В.А.* 303  
*Тарасов Е.А.* 306  
*Телятников И.С.* 309  
*Титков В.В.* 88  
*Титов С.С.* 159  
*Толынбеков А.Б.* 48  
*Тыртышный С.А.* 184

**У**

*Утяганова В.Р. 169*

**Ф**

*Фараонов В.В. 194*

*Федосенко Н.Б. 65*

*Фазылов Т.В. 111*

**Х**

*Хакимов А.А. 313*

*Хильчук М.Д. 306*

*Хребтова М.С. 199*

*Христенко Ю.Ф. 61*

*Хрусталёв А.П. 125, 139*

**Ч**

*Ченцова С.К. 316*

*Чернышов М.В. 65*

*Червакова А.В. 108, 115*

*Чупашев А.В. 203*

**Ш**

*Шваб А.В. 245, 257*

*Шамарин Н.Н. 169*

*Щербаков И.В. 146, 320*

*Шеремет М.А. 239, 290*

**Я**

*Янов Д.В. 117*

## Именной указатель

### A

*Abramova N.* 31  
*Agafontsev M.* 255  
*Azin A.* 233  
*Aleksandrova A.* 224  
*Alekseenko E.* 235  
*Aligasanova K.* 71, 98  
*Antonnikova A.* 159  
*Astanina M.* 239  
*Astafurova M.* 209, 242  
*Akhmedova A.* 245, 258  
*Akhmetov A.* 248  
*Akhmetshin L.* 123

### B

*Baranov P.* 13  
*Bardaev P.* 85  
*Baurin N.* 251  
*Belov S.* 91  
*Belousova N.* 34  
*Blinkova E.* 214  
*Blokhina A.* 37  
*Bober I.* 74  
*Bolshakov N.* 184  
*Bordovitsyna T.* 224  
*Bubenchikov A.* 288  
*Bubenchikov M.* 288  
*Burgomistrenko R.* 71  
*Burkin V.* 191, 203

### V

*Valikhov V.* 126  
*Vetrova A.* 78  
*Valikhov V.* 128  
*Vorozhtsov A.* 126, 139

### G

*Galushina T.* 217, 221, 227  
*Garbuzov D.* 82  
*Garkaev M.* 184  
*German A.* 178  
*Gimayeva N.* 175  
*Glazyrin V.* 25  
*Glotov O.* 34  
*Golubnichiy Ye.* 255  
*Goiko V.* 40

*Goldin V.* 236  
*Gorbacheva V.* 245, 258  
*Grif E.* 43  
*Gruzd S.* 261  
*Guryanov S.* 217  
*Guskov A.* 34, 43, 51, 178, 199

### D

*Davydov S.* 265  
*Danilov M.* 85  
*Dautbayeva D.* 88, 131  
*Dobritsa D.* 61  
*Dyakova O.* 296  
*Diachkovskiy A.* 191, 203

### Sch

*Zhukov A.* 91  
*Zhukov I.* 125, 139  
*Zhuravlev A.* 268

### Z

*Zverev N.* 134  
*Zelepugin S.* 118  
*Zemskov A.* 134  
*Zeinalova N.* 270  
*Zemlyak V.* 128, 251, 274  
*Ziatdinov M.* 48

### E

*Evseev N.* 48  
*Eroshenko A.* 150

### I

*Iokhim K.* 137  
*Ipatov K.* 274  
*Iskakov A.* 147  
*Ishchenko A.* 191, 203

### K

*Kagenov A.* 95, 98  
*Kazakbaeva A.* 278  
*Kenenbayeva D.* 184  
*Kapustin M.* 310  
*Kasymov D.* 255, 303  
*Kasimov V.* 191  
*Kakhidze N.* 101, 131, 139

*Kvashnyov A.* 51  
*Kiseleva T.* 143  
*Kislin M.* 178  
*Kozin V.* 128, 274  
*Kozulin A.* 88, 137  
*Kozyukova V.* 184  
*Kolayan Yu.* 184  
*Korepanov M.* 261  
*Korobekov M.* 143  
*Kostromin D.* 281  
*Kostyushin K.* 95, 98, 108, 115  
*Kostyushina N.* 95  
*Kotonogov V.* 98  
*Krainov A.* 313, 317  
*Krasavin D.* 214  
*Krylova E.* 285  
*Krysko A.* 285  
*Kuznetsov S.* 233  
*Kushnaryov A.* 101, 147, 166

### **Kh**

*Khakimov A.* 313  
*Khilchuk M.* 306  
*Khrebtova M.* 199  
*Khristenko Yu.* 61  
*Khrustalyov A.* 126, 139

### **L**

*Lubysheva A.* 104  
*Letner O.* 221  
*Lukashov O.* 281  
*Lun-Fu A.* 288  
*Lyukshin B.* 320

### **M**

*Maevskii K.* 55  
*Mairambekova A.* 150  
*Mamontov D.* 288  
*Markov V.* 163, 188  
*Martynov P.* 255  
*Maslov E.* 195  
*Merzlyakov A.* 74  
*Mikushina V.* 154  
*Milevskij K.* 43, 51, 178, 199  
*Mikhailenko S.* 290  
*Modin I.* 157  
*Moiseeva K.* 313, 317  
*Morozova O.* 159  
*Mukhin L.* 18

### **N**

*Narikovich A.* 166

### **O**

*Orlov M.* 25  
*Orlov S.* 95  
*Orlov Yu.* 25  
*Orlova Yu.* 58

### **P**

*Pavlenko A.* 159  
*Pavlova A.* 309  
*Papkova I.* 285  
*Pashkov S.* 61  
*Perminov V.* 255  
*Ponomarev S.* 91, 233  
*Popandopulo N.* 224  
*Popov Yu.* 163, 188  
*Poryazov V.* 40  
*Potashev A.* 104  
*Potasheva E.* 104  
*Prokhanov S.* 94  
*Pusev V.* 163, 188  
*Pushkarskaya R.* 293

### **R**

*Reyno V.* 255  
*Rikkonen S.* 233  
*Rogaev K.* 191  
*Rogozhnikova E.* 274  
*Romandin V.* 48  
*Ryltsev I.* 296, 299  
*Ryltseva K.* 299

### **S**

*Savchenko N.* 169  
*Selivanov V.* 163, 188  
*Sereda M.* 108, 115  
*Serebryakov D.* 101, 166  
*Sidorenko Yu.* 78  
*Sidorov A.* 191  
*Skibina N.* 195  
*Smolin I.* 278  
*Skripnyak V.A.* 136  
*Skripnyak V.V.* 136  
*Smolin I.* 248, 278  
*Stepanov E.* 191  
*Syusina O.* 227

**Sh**

*Shvab A.* 245, 258  
*Shamarin N.* 169  
*Scherbakov I.* 147, 320  
*Sheremet M.* 239, 290

**T**

*Tarakanova V.* 303  
*Tarasov E.* 306  
*Telyatnikov I.* 310  
*Titkov V.* 88  
*Titov S.* 159  
*Tolynbekov A.* 48  
*Tyrtysshnyy S.* 184

**U**

*Utyaganova V.* 169

**F**

*Faraponov V.* 195  
*Fedosenko N.* 65  
*Fazylov T.* 112

**Ch**

*Chentsova S.* 317  
*Chernyshov M.* 65  
*Chernyshov M.* 108, 115  
*Chupashev A.* 203

**Ya**

*Yanov D.* 118

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	9
-------------------	---

### ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

<i>Baranov P.F.</i> For the jubilee of professors Igor V. Minin and Oleg V. Minin: contributions to plasma physics, shock wave and hypercumulation effect.....	13
<i>Мухин Л.Н.</i> Возможности трудоустройства выпускников вузов физико-математических направлений подготовки .....	18
<i>Орлов М.Ю., Глазырин В.П., Орлов Ю.Н.</i> Исследование процесса разрушения твердых тел. итоги работы лаборатории прочности НИИ ПММ ТГУ .....	25

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

<i>Абрамова Н.С.</i> Расчет зажигания и выхода на стационарный режим горения твердого ракетного топлива с добавлением порошка алюминия под действием внешнего теплового потока.....	31
<i>Белюсова Н.С., Глотов О.Г., Гуськов А.В.</i> Особенности горения частиц титана и алюминия .....	34
<i>Блохина А.А.</i> Влияние начальной температуры пороха на условия зажигания внешним тепловым потоком .....	37
<i>Гойко В.Л., Порязов В.А.</i> Расчет времени задержки зажигания металлизированного твердого топлива при зажигании конвективным потоком .....	40
<i>Гриф Е.М., Гуськов А.В., Милевский К.Е.</i> Перспективные методы исследования функционирования кумулятивных зарядов.....	43
<i>Евсеев Н.С., Зиатдинов М.Х., Романдин В.И., Толынбеков А.Б.</i> Горение порошков титана и хрома в спутном потоке азотосодержащего газа.....	48
<i>Квашинёв А.А., Гуськов А.В., Милевский К.Е.</i> Создание лабораторного комплекса для определения механических свойств изделий испытанием на разрыв кольцевых образцов .....	51
<i>Маевский К.К.</i> Численное исследование ударно-волнового нагружения элконитов....	55
<i>Орлова Ю.Н.</i> Разрушение заснеженного ледяного покрова под действием эмульсионной взрывчатки.....	58
<i>Пашков С.В., Христенко Ю.Ф., Добрица Д.Б.</i> Использование гофрированной металлической сетки в противометеорных экранах .....	61
<i>Федосенко Н.Б., Чернышов М.В.</i> Экстремальное регулярное отражение косых скачков уплотнения и бегущих ударных волн .....	65

### Секция 2. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ, ПРОГРАММЫ И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД

<i>Алигасанова К.Л., Бургомистренко Р.Ю.</i> Программа расчета потерь на трение в соплах РДТТ .....	71
---	----

<i>Бобер И.В., Мерзляков А.В.</i> Трехмерные свободные малые колебания идеальной жидкости в сосудах различной формы .....	74
<i>Ветрова А.В., Сидоренко Ю.Н.</i> Оценка размеров локально-представительного объема композита с использованием методов корреляционного анализа .....	78
<i>Гарбузов Д.Н.</i> Расчет участка гидродинамической стабилизации потока вязкой жидкости в трубе .....	82
<i>Данилов М.Н., Бардаев П.П.</i> Метод измерения деформаций структурно-неоднородных сред .....	84
<i>Даутбаева Д.Б., Титков В.В., Козулин А.А.</i> Моделирование внецентренного растяжения компактного образца для определения параметров трещиностойкости...88	88
<i>Жуков А.П., Пономарев С.В.</i> Сопряженная задача течения жидкости в канале, расположенном в деформируемом твердом теле.....	91
<i>Кагенов А.М., Костюшин К.В., Орлов С.А., Костюшина Н.О., Проханов С.А.</i> Разработка и реализация автоматизированной облачной системы для проведения аэродинамических расчетов БПЛА самолетного типа .....	94
<i>Котоногов В.А., Кагенов А.М., Костюшин К.В., Алигасанова К.Л.</i> Математическое моделирование взаимодействия сверхзвуковой струи с наклонными преградами.....	98
<i>Кушнарёв А.Г., Серебряков Д.А., Кахидзе Н.И.</i> Численное моделирование процесса продольной прокатки легких алюминиевых сплавов .....	101
<i>Лубышева А.И., Поташев А.В., Поташева Е.В.</i> Расчет течения газового потока через проточную часть осевых турбокомпрессоров.....	104
<i>Серета М.С., Червакова А.В., Костюшин К.В.</i> Разработка компьютерной программы расчета рабочих характеристик в сопловом блоке и камере сгорания РДТТ ..	108
<i>Фазылов Т.В.</i> Численное моделирование нормального пробития многослойных металлических пластин пулей 57-Н-181 .....	111
<i>Червакова А.В., Серета М.С., Костюшин К.В.</i> Разработка программы расчета течений продуктов сгорания в соплах с использованием схемы С.К. Годунова.....	115
<i>Янов Д.В., Зеленугин С.А.</i> Расчет прочности покрытия дорожной одежды с помощью метода конечных элементов .....	117

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

<i>Ахметшин Л.Р.</i> Трехмерные механические метаматериалы с внутренним поворотом .....	123
<i>Валихов В.Д., Хрусталёв А.П., Ворожцов А.Б., Жуков И.А.</i> Исследование влияния наночастиц оксида алюминия и микрочастиц диборид титана на структуру и свойства сплава АМГ <sub>5</sub> .....	125
<i>Васильев А.С., Земляк В.Л., Козин В.М.</i> Исследование ледовых переправ усиленных армирующими элементами в условиях изгибно-гравитационного резонанса.....	128
<i>Даутбаева Д.Б. Кахидзе Н.И.</i> Влияние введения наночастиц в расплав с последующей деформационной обработкой на структуру и физико-механические свойства чистого алюминия.....	130
<i>Зверев Н.А., Земсков А.В.</i> Нестационарные полярно-симметричные механодиффузионные процессы в изотропном сплошном цилиндре .....	133
<i>Иохим К.В., Скрипняк В.В., Козулин А.А., Скрипняк В.А.</i> Механическое поведение магниевое сплава МА2-1 при высокоскоростной деформации в температурном диапазоне от 295 до 673 К при различных значениях параметра трехосности напряженного состояния .....	136

<i>Кахидзе Н.И., Хрусталёв А.П., Жуков И.А., Ворожцов А.Б.</i> Исследование структуры, физико-механических свойств и характера разрушений при статическом и малоцикловом нагружении технически чистого алюминия, модифицированного наночастицами $Al_2O_3$ .....	139
<i>Коробенков М.В., Киселева Т.А.</i> Формирование фрактального рельефа поверхности излома при усталостном нагружении ЗТА композитов.....	143
<i>Кушнарёв А.Г., Щербаков И.В., Искаков А.Е.</i> Исследование напряженно-деформируемого состояния амортизационного элемента с учетом нелинейно-упругого механического поведения материала.....	146
<i>Майрамбекова А.М., Ерошенко А.Ю.</i> Исследование морфологии поверхности разрушения ВТ1-0 и сплава Zr-1 мас. % Nb в различных структурных состояниях при циклическом нагружении в гигацикловом режиме.....	149
<i>Микушина В.А.</i> Исследование особенностей распределения напряжений в керамическом композите с включениями костной ткани при накоплении повреждений.....	153
<i>Модин И.А.</i> Экспериментальные исследования деформационных и прочностных свойств мерзлых грунтов при квазистатических и динамических нагружениях.....	157
<i>Морозова О.Н., Павленко А.А., Антонникова А.А., Титов С.С.</i> Выбор соотношения реагентов для получения водорода путем окисления нанопорошка алюминия.....	159
<i>Попов Ю.В., Марков В.А., Пусев В.И., Селиванов В.В.</i> Амортизирующие и механические свойства высокопористых алюминиевых сплавов и сотовых конструкций.....	163
<i>Серебряков Д.А., Кушнарёв А.Г., Нарикович А.С.</i> Исследование напряженно-деформированного состояния в алюминиевых образцах при глубоком продавливании.....	166
<i>Утяганова В.Р., Шамарин Н.Н., Савченко Н.Л.</i> Изучение особенностей механических свойств алюминиево-магниевого сплава АМг <sub>5</sub> , напечатанного электронно-лучевой аддитивной технологией.....	169

## **Секция 4. БАЛЛИСТИКА И НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА**

### **Подсекция 4.1. Баллистика**

<i>Гимаева Н.Р.</i> Численное моделирование вдува в пограничный слой с учетом термодинамики и изменения диаметра вдува при обтекании сверхзвуковым потоком.....	175
<i>Кислин М.А., Герман А.А., Гуськов А.В., Милевский К.Е.</i> Три направления улучшения патрона стрелкового комплекса.....	178
<i>Коляян Ю.М., Кененбаева Д.К., Козюкова В.В., Гаркаев М.В., Тыртышный С.А., Большаков Н.А.</i> Проведение дренажных испытаний на аэродинамической установке при изучении течения в канале.....	184
<i>Попов Ю.В., Марков В.А., Пусев В.И., Селиванов В.В.</i> Относительная толщина преград и ее фундаментальное значение в бронебаллистике.....	187
<i>Рогаев К.С., Ищенко А.Н., Касимов В.З., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Сидоров А.Д., Степанов Е.Ю.</i> Оценка предельных возможностей модельной баллистической установки при использовании высокоплотных топлив.....	190

<i>Скибина Н.П., Фарапонов В.В., Маслов Е.А.</i> Численное исследование влияния турбулентности и теплообмена на структуру течения в тракте модельного прямооточного воздушно-реактивного двигателя.....	194
<i>Хребтова М.С., Гуськов А.В., Милевский К.Е.</i> Вопрос о стабилизации давления форсирования при выстреле.....	199
<i>Чупашев А.В., Ищенко А.Н., Буркин В.В., Дьячковский А.С.</i> Некоторые экспериментальные результаты по движению инертных ударников в воде.....	203

#### **Подсекция 4.2. Небесная механика**

<i>Астафурова М.В.</i> Поиск физической природы и оценка скрытой энергии, определяющей расширение Вселенной .....	209
<i>Блинкова Е.В., Красавин Д.С.</i> Исследование динамической структуры околоземного орбитального пространства в области резонанса 1:4 со скоростью вращения Земли .....	214
<i>Гурьянов С.А., Галушина Т.Ю.</i> О динамике астероида 469219 КАМО`OALEWA .....	217
<i>Летнер О.Н., Галушина Т.Ю.</i> Оценка влияния эффекта Ярковского на движение астероида 504181 2006 TC.....	220
<i>Попандопуло Н.А., Александрова А.Г., Бордовицына Т.В.</i> Методика исследования вековых резонансов в динамике околоземных объектов на вытянутых орбитах.....	224
<i>Сюсина О.М., Галушина Т.Ю.</i> Апробация программного обеспечения для учета эффекта Ярковского и светового давления при исследовании движения астероидов..	227

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

<i>Азин А.В., Пономарев С.В., Рикконен С.В., Кузнецов С.А.</i> Экспериментальные исследования прецизионного пьезоэлектрического привода .....	233
<i>Алексеев Е.М., Гольдин В.Д.</i> Обтекание модели здания в условиях пожара .....	235
<i>Астанина М.С., Шеремет М.А.</i> Математическое моделирование Термогравитационной конвекции в замкнутой пористой полости с медным радиатором и тепловыделяющим элементом.....	239
<i>Астафурова М.В.</i> Рабочая модель физического вакуума и ее приложения.....	242
<i>Ахмедова А.Р., Горбачева В.Н., Шваб А.В.</i> Фторирование порошков тугоплавких металлов .....	245
<i>Ахметов А.Ж., Смолин И.Ю.</i> Численный анализ напряжений и деформации глубинной структуры земной коры и верхней мантии Сибирского Кратона .....	248
<i>Баурин Н.О., Земляк В.Л.</i> Влияние формы поперечного сечения тела на параметры изгибно-гравитационных волн при подлёдном движении.....	251
<i>Голубничий Е.Н., Касымов Д.П., Агафонцев М.В., Мартынов П.С., Перминов В.В., Рейно В.В.</i> Экспериментальное исследование распространения вертикального горения по поверхности строительного материала из древесины .....	254
<i>Горбачева В.Н., Ахмедова А.Р., Шваб А.В.</i> Моделирование аэродинамики и теплопереноса в химическом реакторе .....	257
<i>Груздь С.А., Корепанов М.А.</i> Математическое моделирование гомогенной конденсации оксида алюминия в смеси с углекислым газом .....	260
<i>Давыдов С.А.</i> Термоупругая диффузия в слое под действием смешанных нестационарных возмущений .....	264
<i>Журавлев А.А.</i> Численное моделирование процесса фторирования металлического вольфрама .....	267

<i>Зейналова Н.Р.</i> Определение параметров двухступенчатого осевого компрессора на основе численного моделирования.....	269
<i>Ипатов К.И., Рогожникова Е.Г., Земляк В.Л., Козин В.М.</i> Деформированное состояние ледяного покрова при парном движении нагрузки .....	273
<i>Казакбаева А.А., Смолин И.Ю.</i> Численное изучение медленных деформационных волн между очагами деформации.....	277
<i>Костромин Д.А., Лукашов О.Ю.</i> Технология построения локально-адаптивных декартовых сеток.....	280
<i>Крылова Е.Ю., Папкова И.В., Крысько А.В.</i> Математическая модель контактного взаимодействия пластинчатых элементов наноэлектромеханической системы на основе поверхностной теории упругости .....	285
<i>Мамонтов Д.В., Бубенчиков М.А., Бубенчиков А.М., Лун-Фу А.В.</i> Вынужденные вращения фуллеренов в электромагнитных полях .....	288
<i>Михайленко С.А., Шеремет М.А.</i> Исследование естественной конвекции во вращающейся пористой полости при наличии элемента переменной плотности объемного тепловыделения.....	290
<i>Пушкарская Р.С., Синяев С.В.</i> Математическое моделирование электроимпульсного нагрева пиротехнического покрытия проводником-тэном в режиме зажигания метательного заряда .....	292
<i>Рыльцев И.А., Дьякова О.А.</i> Структура потока неньютоновской жидкости в Т-образном канале с условием.....	296
<i>Рыльцева К.Е., Рыльцев И.А.</i> Анализ характеристик течения жидкости в канале переменной площади сечения.....	299
<i>Тараканова В.А., Касымов Д.П.</i> Поведение некоторых строительных материалов из древесины при локальном тепловом воздействии .....	303
<i>Тарасов Е.А., Хильчук М.Д.</i> Взаимодействие молекул водяного пара со структурой на основе углеродных нанотрубок .....	306
<i>Телятников И.С., Павлова А.В., Капустин М.С.</i> О модификации метода фиктивного поглощения решения интегральных уравнений смешанных задач для произвольных односвязных областей.....	309
<i>Хакимов А.А., Моисеева К.М., Крайнов А.Ю.</i> Численный расчет скорости горения бидисперсной аэрозвеси порошка бора .....	313
<i>Ченцова С.К., Моисеева К.М., Крайнов А.Ю.</i> Численное моделирование распространения волны горения по неподвижной древесной пыли.....	316
<i>Щербаков И.В., Люкин Б.А.</i> Влияние расположения виброизмерительных преобразователей на результаты эксперимента.....	320
<b>ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ .....</b>	<b>323</b>

## CONTENTS

<b>PREFACE</b> .....	10
----------------------	----

### PLENARY SESSION

<i>Baranov P.F.</i> For the jubilee of professors Igor V. Minin and Oleg V. Minin: contributions to plasma physics, shock wave and hypercumulation effect.....	13
<i>Mukhin L.</i> Opportunities of employment of graduates – physicists and mathematicians.....	18
<i>Orlov M., Glazyrin V., Orlov Yu.</i> Research of solid body destruction at shockwave loading. Results of work of the Strength Laboratory of TSU .....	25

### Session 1. EXPLOSION, DETONATION PHENOMENA AND PROPERTIES OF MATTER AT HIGH-INTENSIVE

<i>Abramova N.</i> Calculation of ignition and steady-state combustion of solid rocket propellant with the addition of aluminum powder under the action of external heat flow ....	31
<i>Belousova N., Glotov O., Guskov A.</i> Features of combustion of particles titanium and aluminum.....	34
<i>Blokhina A.</i> The effect of the initial temperature of the n powder at the conditions of ignition under external heat flux .....	37
<i>Goiko V., Poryazov V.</i> Ignition delay time of metallized solid propellant ignited by a convective flow .....	40
<i>Grif E., Guskov A., Milevskij K.</i> Prospective methods of investigation of the functioning of cumulative charges.....	43
<i>Evseev N., Ziatdinov M., Romandin V., Tolyzbekov A.</i> Combustion of titanium and chrome powders in the co-flow of a nitrogen containing gase .....	48
<i>Kvashnyov A., Guskov A., Milevskii K.</i> Creation of a laboratory complex for determination of mechanical properties of products by testing for fracture of annular samples .....	51
<i>Maevskii K.</i> Numerical investigation shock-wave loading of elkonite.....	55
<i>Orlova Yu.</i> Snow covered ice sheet subject to 4 kg emulsion explosives. UNDEX results 2020 .....	58
<i>Pashkov S., Khristenko Yu., Dobritsa D.</i> Protective properties of corrugated mesh anti-meteor shields .....	61
<i>Fedosenko N., Chernyshov M.</i> Extreme regular reflection of an oblique stationary shocks and propagating shock waves.....	65

### Session 2. NUMERICAL METHODS, ALGORITHMS, CODES, AND ACCURATE SOLUTIONS OF THE CONTINIUM MECHANICS

<i>Aligasanova K., Burgomistrenko R.</i> Computer program to calculate friction losses in SPRM nozzles .....	71
<i>Bober I., Merzlyakov A.</i> Three-dimensional free small vibrations of an ideal fluid in vessels of various shapes.....	74
<i>Vetrova A., Sidorenko Yu.</i> Estimation of the size of a locally representative composite volume using correlation analysis methods .....	78
<i>Garbuzov D.</i> Calculation of a calming length of a viscous fluid flow in a pipe.....	82

<i>Danilov M., Bardaev P.</i> Strain measurement method of inhomogeneous materials .....	85
<i>Dautbayeva D., Titkov V., Kozulin A.</i> Modeling of an eccentric stretch of a compact specimen to determine the parameters of fracture resistance .....	88
<i>Zhukov A., Belov S., Ponomarev S.</i> Conjugate problem for fluid flow in a channel located in a deformable solid .....	91
<i>Kagenov A., Kostyushin K., Orlov S., Kostyushina N., Prokhanov S.</i> Development and implementation of an automated cloud system for aerodynamic calculations of aircraft-type uavs .....	95
<i>Kotonogov V., Kagenov A., Kostyushin K., Aligasanova K.</i> Mathematical modeling of interaction a supersonic plume with oblique obstacles .....	98
<i>Kushnaryov A., Serebryakov D., Kakhidze N.</i> Numerical simulation of longitudinal rolling process of light aluminum alloys .....	101
<i>Lubysheva A., Potashev A., Potasheva E.</i> Calculation of gas flow through the flow of axial turbo-compressors .....	104
<i>Sereda M., Chervakova A., Kostyushin K.</i> Development of computer program for calculating the flows of combustion products in nozzles using the Godunov's scheme ..	108
<i>Fazylov T.</i> Numerical modeling of response multi layered metal plates impacted by 57-H-181 bullet .....	112
<i>Chervakova A., Sereda M., Kostyushin K.</i> Development of a program for calculating the flows of combustion products in nozzles using the S.K. Godunov scheme .....	115
<i>Yanov D., Zelepugin S.</i> Evaluation of the pavement strength using the finite element method .....	118

### **Session 3. NEW MATERIALS RESEARCH IN APPLICATION TO CONTINUUM MECHANICS**

<i>Akhmetshin L.</i> Three-dimensional mechanical metamaterials with an internal rotation. A numerical study .....	123
<i>Valikhov V., Khrustalyov A., Zhukov I., Vorozhtsov A.</i> Investigation of the influence of aluminum oxide nanoparticles and titanium diboride microparticles on the structure and properties of AMG-5 alloy .....	126
<i>Vasilyev A., Zemlyak V., Kozin V.</i> Study of ice crossings reinforced with reinforcing elements under flexural-gravity resonance conditions .....	128
<i>Dautbayeva D., Kakhidze N.</i> Effect of nanoparticles introduction into the melt with subsequent deformation treatment on structure and physical and mechanical properties of pure aluminum .....	131
<i>Zverev N., Zemskov A.</i> Unsteady polar-symmetric mechanodiffusion processes in an isotropic continuous cylinder .....	134
<i>Iokhim K., Skripnyak V.V., Kozulin A., Skripnyak V.A.</i> Mechanical behavior of magnesium alloy MA2-1 at high-speed deformation in the temperature range from 295 K to 673 K at different values of the triaxial stress state parameter .....	137
<i>Kakhidze N., Khrustalyov A., Zhukov I., Vorozhtsov A.</i> Investigation of the structure, physical and mechanical properties, and the fracture mode under static and low-cycle loading of technically pure aluminum modified with $Al_2O_3$ nanoparticles .....	139
<i>Korobekov M., Kiseleva T.</i> The formation of a fractal relief of the fracture surface under fatigue loading of ZTA composites .....	143
<i>Kushnaryov A., Scherbakov I., Iskakov A.</i> Investigation of stress-strain condition of shock absorber element taking into account nonlinear elastic mechanical behavior of material .....	147

<i>Mairambekova A., Eroshenko A.</i> Study of the fracture surface morphology of VT1-0 and Zr-1 wt. % Nb in various structural states under cyclic loading in gigacycle regime.....	150
<i>Mikushina V.</i> Studying the features of stress distribution in ceramic composite with bone tissue inclusions at damage accumulation.....	154
<i>Modin I.</i> Experimental studies of the deformation and strength properties of frozen soils under quasistatic and dynamic loading .....	157
<i>Morozova O., Pavlenko A., Antonnikova A., Titov S.</i> Choise of the ratio of reagents for the production of hydrogen by oxidation of aluminum nanopowder.....	159
<i>Popov Yu., Markov V., Pusev V., Selivanov V.</i> Shock absorbing and mechanical properties of highly porous aluminum alloys and honeycomb structures.....	163
<i>Serebryakov D., Kushnaryov A., Narikovich A.</i> Investigation of stress-strain state in aluminum billets under deep punching .....	166
<i>Utyaganova V., Shamarin N., Savchenko N.</i> Research of the mechanical properties of aluminum-magnesium alloy AMg <sub>5</sub> , printed by electron-beam additive technology .....	169

## Session 4. BALLISTICS AND CELESTIAL MECHANICS

### Session 4.1 BALLISTICS

<i>Gimayeva N.</i> Numerical modeling of injection into the boundary layer taking into account thermodynamics and changes in the diameter of injection during supersonic stream .....	175
<i>Kislin M., German A., Guskov A., Milevsky K.</i> Three ways of rifle cartridge improvement .	178
<i>Kolayan Yu., Kenenbayeva D., Kozyukova V., Garkaev M., Tyrtyshnyy S., Bolshakov N.</i> Drainage tests in the near-wall flow zone of a ramjet engine working chamber on the aerodynamic facility .....	184
<i>Popov Yu., Markov V., Pusev V., Selivanov V.</i> The relative thickness of the barriers and its fundamental importance in armored ballistics.....	188
<i>Rogaev K., Ishchenko A., Kasimov V., Burkin V., Diachkovskiy A., Sidorov A., Stepanov E.</i> Estimation of ultimate model ballistic installation capabilities using high-density propellants .....	191
<i>Skibina N., Faraponov V., Maslov E.</i> Numerical investigation turbulence and heat transfer process effects on the flow structure in the working duct of ramjet engine .....	195
<i>Khrebtova M., Guskov A., Milevsky K.</i> The forcing pressure stabilization during shot.....	199
<i>Chupashev A., Ischenko A., Burkin V., Diachkovskiy A.</i> Some experimental results on motion of an inert strikers in water .....	203

### Session 4.2 CELESTIAL MECHANICS

<i>Astafurova M.</i> Searching for the physical nature and evaluating the hidden energy that determines the expansion of the universe .....	209
<i>Blinkova E., Krasavin D.S.</i> Research of dynamic structure of near-Earth orbital space in the field of resonance 1: 4 with Earth rotation speed.....	214
<i>Guryanov S., Galushina T.</i> On the dynamics of the asteroid 469219 KAMO`OALEWA....	217
<i>Letner O., Galushina T.</i> Influence evaluation of the Yarkovsky effect on motion of the asteroid 504181 2006 TC .....	221
<i>Popandopulo N.A., Aleksandrova A.G., Bordovitsyna T.V.</i> Methodology for research of secular resonances in the dynamics of near-Earth eccentric-orbiting objects.....	224

<i>Syusina O., Galushina T.</i> Approbation of the software for taking into account the Yarkovsky effect and light pressure in studying the asteroids motion .....	227
--	-----

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

<i>Azin A., Ponomarev S., Rikkonen S., Kuznetsov S.</i> Experimental study of a precision piezoelectric actuator .....	233
<i>Alekseenko E., Goldin V.</i> Flow around a building model in a fire .....	236
<i>Astanina M., Sheremet M.</i> Mathematical simulation of thermogravitational convection in a porous cavity with a copper radiator and a heat-generating element .....	239
<i>Astafurova M.</i> Working model of physical vacuum and its applications.....	242
<i>Akhmedova A., Gorbacheva V., Shvab A.</i> Fluorination of refractory metal powders.....	245
<i>Akhmetov A., Smolin I.</i> Numerical stress and strain analysis of the deep structure of earth's crust and upper mantle of Siberian Craton .....	248
<i>Baurin N., Zemlyak V.</i> Influence of form of the cross section submerged body on the parameters flexural-gravity waves in the ice motion .....	251
<i>Golubnichiy Ye., Kasymov D., Agafontsev M., Martynov P., Perminov V., Reyno V.</i> Experimental study of vertical fire spread on a surface of wood construction material.....	255
<i>Gorbacheva V., Akhmedova A., Shvab A.</i> Modeling of aerodynamics and mass transfer in a chemical reactor .....	258
<i>Gruzd S., Korepanov M.</i> Mathematical modeling of homogeneous condensation of a mixture of aluminum oxide and carbon dioxide .....	261
<i>Davydov S.</i> Thermoelastic diffusion in a layer under the action of mixed unsteady perturbations.....	265
<i>Zhuravlev A.</i> Numerical simulation of the process of fluorination of metallic tungsten .....	268
<i>Zeinalova N.</i> Determination of the parameters of two-stage axial compressor based on numerical simulation .....	270
<i>Ipatov K., Rogozhnikova E., Zemlyak V., Kozin V.</i> The deformed state of the ice cover with the pair movement of the load.....	274
<i>Kazakbaeva A., Smolin I.</i> Numerical study of slow deformation waves between deformation sites .....	278
<i>Kostromin D., Lukashov O.</i> Technology of building local-adaptive cartesian grids .....	281
<i>Krylova E., Papkova I., Krysko A.</i> A mathematical model of the contact interaction of plate elements of a nanoelectromechanical system based on the surface theory of elasticity .....	285
<i>Mamontov D., Bubenchikov M., Bubenchikov A., Lun-Fu A.</i> Forced rotation of fullerenes in an electromagnetic fields.....	288
<i>Mikhailenko S., Sheremet M.</i> Investigation of convective heat transfer in a rotating porous square cavity with an element of variable volumetric heat generation .....	290
<i>Pushkarskaya R., Sinyaev S.</i> Mathematical modeling of electrical pulse heating of pyrotechnic coating by conductor-heating element in ignition mode of propellant charge...291	
<i>Ryltsev I., Dyakova O.</i> The structure of a non-newtonian fluid flow in a t-channel with slip boundary conditions on a solid wall .....	296
<i>Ryltseva K., Ryltsev I.</i> Analysis of fluid flow characteristics in a channel with a varying cross section .....	299
<i>Taranova V., Kasymov D.</i> Behavior of some building materials their wood under local thermal influence .....	303

<i>Tarasov E., Khilchuk M.</i> The interaction of water vapor molecules with a structure based on carbon nanotubes .....	306
<i>Telyatnikov I., Pavlova A., Kapustin M.</i> Modification of the fictitious absorption method for solving integral equations of mixed problems for arbitrary simply connected regions ...	310
<i>Khakimov A., Moiseeva K., Krainov A.</i> Numerical calculation of the burning rate of bidispersed air suspension of boron powder .....	313
<i>Chentsova S., Moiseeva K., Krainov A.</i> Numerical simulation of the propagation of a combustion wave over stationary wood dust .....	317
<i>Scherbakov I., Lyukshin B.</i> Influence of location of vibration measuring converters on experimental results.....	320
NAME INDEX.....	326

## СПОНСОРЫ И ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

**eLIBRARY.RU**



**SM&T**

АССОЦИАЦИЯ  
«СОЮЗВЗРЫВПРОМ»



IX Всероссийская имолодежная научная конференция  
«Актуальные проблемы современной механики  
сплошных сред и небесной механики»  
18–20 ноября 2019 г., Томск

Подписано в печать 24.08.2020 г.

Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Тираж 100 экз.

ISBN 978-5-6045081-1-4



9 785604 508114