

Забабакхинские научные чтения

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

27 СЕНТЯБРЯ – 1 ОКТЯБРЯ 2021 г.

ТЕЗИСЫ

Zababakhin Scientific Talks

INTERNATIONAL CONFERENCE

SEPTEMBER 27 – OCTOBER 1, 2021

ABSTRACTS

УДК 53+531.58+541.126+531.66+533.9+538.3+551.511+620.171.3
ББК22.2 312

Забабахинские научные чтения: сборник материалов XV Международной конференции 27 сентября – 1 октября 2021. – Снежинск: Издательство РФЯЦ – ВНИИТФ, 2021. – 302 с. ил.

ISBN 978-5-6045087-4-9

Сборник содержит тезисы докладов конференции по шести секциям (на русском и английском языках), которые будут представлены научному сообществу как теоретические и практические исследования и достижения в области физики высоких плотностей энергии.

УДК 53+531.58+541.126+531.66+533.9+538.3+551.511+620.171.3
ББК22.2

Председатель организационного комитета

академик РАН Георгий Николаевич Рыкованов,
научный руководитель РФЯЦ – ВНИИТФ, Россия

Председатель программного комитета

Вадим Александрович Симоненко, д. ф.-м. н.,
профессор, заместитель научного руководителя РФЯЦ – ВНИИТФ, Россия

Программный комитет

СЕКЦИЯ 1

Владимир Николаевич Ногин
Александр Кириллович Музыря
Михаил Геннадьевич Анучин

СЕКЦИЯ 2

Алексей Леонидович Жеребцов,
Евгений Борисович Смирнов

СЕКЦИЯ 3

Игорь Валерьевич Глазырин,
Петр Анатольевич Лобода

СЕКЦИЯ 4

Александр Васильевич Петровцев
Владислав Иванович Таржанов

СЕКЦИЯ 5

Вячеслав Петрович Соколов,
Дмитрий Владимирович Хмельницкий

СЕКЦИЯ 6

Ян Владимирович Пронин
Александр Александрович Шестаков

СЕКЦИЯ 7

Сергей Наркисович Лебедев
Борис Константинович Водолага
Олег Владимирович Зацепин

ISBN 978-5-6045087-4-9

© ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ
им. академ. Е. И. Забахина», 2021

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

PLENARY SESSION

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА КАК БАЗОВЫЙ ЭЛЕМЕНТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Е. О. Адамов

Частное учреждение Госкорпорации «Росатом»
«Инновационно-технологический центр проекта
“Прорыв”», Москва, Россия

1. Мировые потребности в развитии энергетики, преимущественно, электропроизводства, общепризнаны.

2. В настоящее время они удовлетворяются, в основном, за счет органической генерации.

3. Надежды на полный переход на ВИЭ (СЭУ и ВЭУ) не оправдались

4. ЯЭ утратила позиции в основных странах, ее ранее развивавших, в связи с проблемами безопасности, ОЯТ, перспективой ограничения ископаемого сырья, нераспространения, экономики.

5. В РФ электропотребление в течение последних десятилетий сохраняется на уровне 1989 г. ЯЭ в 2000 г. восстановила максимальный уровень электропроизводства в РФ (1989 г.), а в 2020 г. увеличила выработку еще на 30%, достигнув полного объема производства в СССР перед его распадом.

6. Лидерами развития новых технологий ЯЭ в мире в настоящее время являются РФ и КНР. США приняли Закон о восстановлении лидерства в ядерной энергетике.

7. Малая ЯЭ имеет область применения, ограниченную внесетевыми регионами, не имеющими запасов органики и требует ослабления действующих нормативов безопасности.

8. Экологические характеристики ЯЭ, при исключении тяжелых аварий, конкурентоспособны с ВИЭ.

9. Двухкомпонентная ЯЭ, как базовая в Стратегии ее развития в РФ, решает последовательно все проблемы (п. 4) и может стать основой энергетической и экологической безопасности.

NUCLEAR POWER AS A BACKBONE OF ENERGY AND ENVIRONMENTAL SECURITY

E. O. Adamov

Innovation and Technology Center of “Proryv” Project,
Moscow, Russia

1. World’s needs for energy development, especially in the sphere of electric power production, are universally recognized.

2. Today, these needs are satisfied mostly due to the fossil fuels.

3. Our hopes of overall conversion to renewable energy sources, namely, solar and wind, turned out to be frustrated.

4. Nuclear power has already lost its positions in countries that previously had a dominant role in its development, because of challenges concerning safety and security, spent nuclear fuel, prognosticated limitation of mineral raw materials, nonproliferation, and economic issues.

5. As for the Russian Federation, over the last decades, electric energy consumption remains at plateau of 1989. In 2000, nuclear power industry managed to return to the peak electric power production level observed in our country in 1989. And in 2020, it increased its output by 30% more and reached the overall production level found in the USSR before its break-up.

6. Nowadays, Russia and China have established themselves as the world-wide leaders in developing innovative nuclear energy technologies. The USA has enacted the law aimed to return its leadership in the field of nuclear power engineering.

7. The application of small-scale nuclear power facilities is limited to rural areas that have no organic stocks, which requires less restrictive safety regulations.

8. When excluding severe accidents, environmental profile of nuclear power is competitive with that of the renewable energy sources.

9. Two-component nuclear energy system considered as the basic one in Russian energy development strategy will, step by step, settle all the issues mentioned in (4) to become the backbone of energy and environmental security.

ПЛАЗМА ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ, СОЗДАВАЕМАЯ ПРЯМЫМ И НЕПРЯМЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПИКОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ СУБПЕТАВАТТНОЙ МОЩНОСТИ

С. А. Пикуз^{1,2}, А. С. Мартыненко¹, Л. Антонелли³,
К. Д. Бэйрд³, Ф. Барбаго⁴, Н. Бут⁵, Г. Боту⁴,
Л. Н. К. Доль³, Ф. Дюрей³, Д. Фарлей³,
Л. Джуиффрида³, С. Б. Хансен⁶, Х. Х. Хонрубия⁷,
Э. Хюм³, Й. Якоби⁸, Д. Кагани⁹, К. Ланкастер³,
П. МакКенна¹⁰, К. Д. Мерфи³, П. Ноймайер¹¹,
О. Розмей¹¹, С. Н. Рязанцев^{1,2}, Ж. Ж. Сантос⁴,
И. Ю. Скобелев^{1,2}, К. Спиндлое⁵, О. Турянска⁴,
Д. Батани^{2,4}, Н. Вулси³

¹Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», Москва, Россия

³York Plasma Institute, Department of Physics, University
of York, York, UK

⁴University of Bordeaux, CNRS, CEA, CELIA, F-33405
Talence, France

⁵Central Laser Facility, STFC Rutherford Appleton Laboratory,
Didcot OX11 0QX, UK

⁶Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM 87123, USA

⁷ETSI Aeronauticos, Universidad Politecnica de Madrid,
Madrid, Spain

⁸Goethe-Universitat Frankfurt, D-60438 Frankfurt-am-Main,
Germany

⁹SLAC National Accelerator Laboratory, Menlo Park,
California 94025, USA

¹⁰Department of Physics, SUPA, University of Strathclyde,
Glasgow G4 0NG, UK

¹¹GSI – Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH,
D-64291 Darmstadt, Germany
E-mail: spikuz@gmail.com

Несмотря на то, что плотная нагретая плазма и вещество с высокой плотностью энергии представляет несомненный интерес для широкого круга задач, и в частности для инерциального синтеза, геофизики и астрофизики, получение и изучение такого состояния вещества в контролируемых лабораторных условиях является сложно решаемой экспериментальной задачей. В докладе представлен обзор результатов серии экспериментов по получению нагретой и горячей плазмы с плотностью, близкой или равной твердотельной, за счет прямого и непрямого воздействия релятивистских пикосекундных лазерных импульсов субпетаваттной мощности.

В схеме прямого воздействия, при использовании кремниевых мишеней в пластиковой оболочке, препятствующей гидродинамическому разлету, и лазерных импульсов сверхвысокого контраста с интенсивностью до $5e20$ Вт/см², получена плазма с около-твердотельной плотностью и плотностью энергии свыше $4e7$ Дж/см³ [1]. В свою очередь, это позволило изучить несколько явлений, характерных для твердотельной плазмы, и, в частности, влияние плотности плазмы на атомную структуру многозарядных ионов. Путем прецизионного измерения положения края комбинационного континуума в спектре излучения H- и He-подобных ионов кремния в зависимости от плотности плазмы, количественно изучен эффект понижения потенциала ионизации.

Подход с непрямым нагревом с сохранением объема и твердотельной плотности мишени был реализован за счет воздействия релятивистских лазерных импульсов на боковую или торцевую поверхности мишеней из проводящих (Ti) тонких проволок с высоким аспектным соотношением – диаметром в десятки мкм и длиной в несколько мм. При этом релятивистские электроны, ускоренные непосредственно в области воздействия релятивистского лазерного импульса, доставляли энергию и нагревали далеко отстоящие области мишени, остающиеся с полностью твердотельной плотностью. Показан нагрев таких областей до ~ 30 эВ на расстоянии до нескольких сотен мкм вдоль оси проволоки. Плотность и температура плазмы измерялась методами рентгеновской эмиссионной и абсорбционной спектроскопии и радиографии. Изучены вопросы резистивных потерь для потока горячих электронов и генерации внутренних электромагнитных полей в плотной нагретой плазме, зависимости характера прогрева плотной плазмы от энергии и интенсивности лазерного воздействия [2].

Литература

1. **Martynenko, A. S.** et al. [Text] // Phys. Rev. E. – 2020. – 101, 043208.
2. **Martynenko, A. S.** et al. [Text] // Optics Express. – 2021. – 29, 12240–12251.

SOLID-DENSITY PLASMA CREATED BY DIRECT AND INDIRECT IMPACT OF SUB-PW PICOSECOND LASER PULSES

S. A. Pikuz^{1,2}, A. S. Martynenko¹, L. Antonelli³,
C. D. Baird³, F. Barbato⁴, N. Booth⁵, G. Boutoux⁴,
L. N. K. Döhl³, P. Durey³, D. Farley³, L. Giuffrida³,
S. B. Hansen⁶, J. J. Honrubia⁷, E. Hume³, J. Jacoby⁸,
D. Khaghani⁹, K. Lancaster³, P. McKenna¹⁰,
C. D. Murphy³, P. Neumayer¹¹, O. Rosmej¹¹,
S. N. Ryazantsev^{1,2}, J. J. Santos⁴, I. Yu. Skobelev^{1,2},
C. Spindloe⁵, O. Turianska⁴, D. Batani^{2,4}, N. Woolsey³

¹Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

²National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russia

³York Plasma Institute, Department of Physics, University of York, York YO10 5DD, UK

⁴University of Bordeaux, CNRS, CEA, CELIA, F-33405 Talence, France

⁵Central Laser Facility, STFC Rutherford Appleton Laboratory, Didcot OX11 0QX, UK

⁶Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM 87123, USA

⁷ETSI Aeronauticos, Universidad Politecnica de Madrid, Madrid, Spain

⁸Goethe-Universität Frankfurt, D-60438 Frankfurt-am-Main, Germany

⁹SLAC National Accelerator Laboratory, Menlo Park, California 94025, USA

¹⁰Department of Physics, SUPA, University of Strathclyde, Glasgow G4 0NG, UK

¹¹GSI – Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, D-64291 Darmstadt, Germany

E-mail: spikuz@gmail.com

Though the importance of warm dense and/or high energy density matter states for a broad range of research on inertial fusion, astrophysical, and geophysical systems, such states are still hardly achievable in a controlled experimental condition. Here we summarize the results of a series of experiments where the warm or hot plasmas of solid or near-solid densities were obtained and investigated under as direct as indirect energy impact by relativistic ps laser pulses of sub-PW power.

Applying buried-type silicon targets in the experiments with ultrahigh contrast OPCPA laser pulses of up to $5e20$ W/cc intensities the plasma of near-solid electron density and above $4e7$ J/cm³ energy density was created and studied [1]. In turn, it allows to study several phenomena particularly important for solid or over-solid density plasma conditions such as the effect on atomic structure of multicharged ions. Precisely tracing the shift of recombination continuum edge in the emission spectra of H- and He-like Si ions the ionization potential depression is quantitatively examined.

The indirect isochoric heating approach was implemented when the relativistic laser pulse interacted with a tip or back side of a mm-long and tens-micron thin titanium wires. In this case the laser-accelerated relativistic electrons transport the energy and heated fully solid target matter up to ~ 30 eV several hundred microns deep along

the wire. The densities and temperatures of the generated plasma were measured by means of K-shell emission and absorption spectroscopy and X-ray radiography. The set-up allowed to study the electron resistive energy losses in WDM and inner EM fields induced in the wire and affecting the electron propagation. The influence of laser energy and intensity on WDM heating is considered [2].

References

1. Martynenko, A. S. et al. [Text] // Phys. Rev. E. – 2020. – 101, 043208.
2. Martynenko, A. S. et al. [Text] // Optics Express. – 2021. – 29, 12240–12251.

СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Б. Н. Четверушкин

Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша» РАН,
Москва, Россия

Рассматривается состояние и тенденции развития суперкомпьютерного парка за рубежом и в нашей стране. Обсуждаются возможности его применения в том числе и для массового решения промышленных задач.

Рассматриваются проблемы, связанные с адаптацией алгоритмов и прикладного математического обеспечения на архитектуру вычислительных систем с экстремальным параллелизмом. Приводятся ряд примеров логически простых и эффективных алгоритмов, допускающих успешную параллелизацию, в том числе и для систем гибридной архитектуры, использующих графические платы в качестве ускорителей.

В заключении приводятся примеры, показывающие необходимость и возможности применения систем сверхвысокой производительности, в том числе для задач, связанных с использованием искусственно интеллекта и больших данных.

Подчеркивается необходимость создания в России в ближайшее время парка вычислительных систем (порядка десяти) производительностью 30–50 Пфлопс, а также программы исследований по созданию алгоритмов и прикладного математического обеспечения для систем сверхвысокой производительности.

SUPERCOMPUTER TECHNOLOGIES: PROBLEMS AND PROSPECTS

B. N. Chetverushkin

Federal Research Center “M. V. Keldysh Institute of Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences”,
Moscow, Russia

The state and development trends of the supercomputer park abroad and in our country are considered. The possibilities of its application, including for the mass solution of industrial problems, are discussed.

The problems related to the adaptation of algorithms and applied mathematical software to the architecture of computing systems with extra-massive parallelism are considered. A number of examples of logically simple and efficient algorithms that allow successful parallelization are given, including for hybrid architecture systems that use graphics cards as accelerators.

In conclusion, examples are given showing the need and possibilities of using ultra-high performance systems, including for tasks related to the use of artificial intelligence and big data.

The necessity of creating in Russia in the near future a fleet of computing systems (about ten) with a capacity of 30–50 Pflops, as well as a research program for creating algorithms and applied mathematical software for ultra-high performance systems is emphasized.

ВИРУСНЫЕ ИНФЕКЦИИ XXI ВЕКА: МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭПИДЕМИЙ

Э. В. Карамов^{1,2}

¹ФГБУ «НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи» Минздрава России,
Москва, Россия

²ФГБУ «НМИЦ ФПИ» Минздрава России,

В биосфере вирусы распространены повсеместно. Генетическое разнообразие вирусов огромно. Число вирионов на порядок превышает количество клеток всех живых организмов Земли – от бактерий до человека. Ретровирусы (ретроэлементы) были генетическим резервуаром для эволюции и возникновения новых видов. Замечательный советский вирусолог В.М. Жданов обсуждал несколько гипотез о происхождении вирусов.

Человечеству удалось справиться с эпидемиями чёрной оспы и полиомиелита, взять под контроль с помощью вакцинопрофилактики корь и краснуху. Но в XXI веке нас дважды поражали эпидемии гриппа, трижды – коронавирусных инфекций; возникали вспышки лихорадки Эбола. Мы не можем справиться с пандемией ВИЧ/СПИД, лихорадкой Денге и другими опасными вирусными патогенами. Наши знания о месте вирусов в биосфере недостаточны и фрагментарны. Мы не всегда можем ясно представить и предсказать поведение вирусов. Особую угрозу представляет возможность использования вирусов в целях биотерроризма.

Одним из ключевых компонентов понимания вирусных эпидемий является математическое моделирование, сыгравшее положительную роль в описании и предсказании эпидемий гриппа. В настоящее время разработано несколько математических моделей эпидемии COVID-19. Перспективная модель создана коллективом отечественных учёных под руководством академика Г. Н. Рыкованова. В докладе обсуждается прикладное значение математического моделирования для борьбы с вирусными инфекциями.

VIRAL INFECTIONS OF XXI CENTURY: SIMULATION OF EPIDEMICS

E. V. Karamov^{1,2}

¹National Medical Research Center of Phthisiopulmonology and Infectious Diseases of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

²The National Research Center for Epidemiology and Microbiology named after Honorary Academician N. F. Gamaleya of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

Viruses in biosphere can be met everywhere. Genetic versatility of viruses is enormous. The number of virions surpasses by an order of magnitude the number of cells of the Earth's living creatures from bacteria to humans. Retroviruses (retroelements) were a genetic storage tank for evolution and genesis of new species. Remarkable Soviet virologist Viktor Zhdanov discussed several hypotheses of viruses genesis.

Humankind has managed to overcome the epidemics of black smallpox and poliomyelitis and to control

measles and rubella with the help of preventive vaccination. However in the XXI century we had two occurrences of the flue epidemics, three occurrences of coronavirus infections and outbreaks of Ebola fever. We cannot handle pandemics of HIV/AIDS, dengue fever and other dangerous viral pathogens. Our knowledge about the role of viruses in biosphere is insufficient and fragmentary. We can only occasionally imagine and predict behavior of viruses in a clear way. Use of viruses within the bioterrorism is a particular threat.

Numerical simulation that has played a positive role in description and prediction of the flue epidemics is a key component in understanding of viral epidemics. Several numerical models of COVID-19 epidemics have been developed today. Promising model has been developed by the team of Russian scientists led by academician Georgy Rykovanov. The presentation will discuss applied significance of numerical simulation for countering the viral infections.

Секция 1

**КОСМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ЗЕМЛИ,
ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ,
ТУРБУЛЕНТНОСТЬ**

Section 1

**SPACE PROTECTION OF THE EARTH,
HIGH-INTENSITY PROCESSES
AND TURBULENCE**

1-1

О ПРИЧИНАХ ИЗМЕНЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И КЛИМАТА ЗЕМЛИ

В. Ф. Анисичкин

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, Россия
E-mail: avf@hydro.nsc.ru

Уран и торий в составе тугоплавких и высокоплотных карбидов и оксидов могли осесть из расплавленной магмы на твердое ядро Земли [1]. В образовавшихся скоплениях актиноидов в течение миллиардов лет могут кратковременно и периодически протекать цепные ядерные реакции с воспроизводством легко делящихся изотопов [2, 3].

Возникающие над зонами реакций тепловые конвективные потоки меняют магнитное поле Земли, а в случаях затихания реакций к его ослаблению.

Периодически выносимое к поверхности в конвективных потоках и в результате теплопроводности тепло влияет на климат Земли.

Начало активного цикла может немедленно обнаруживаться увеличением потока электронных антинейтрино, испускаемых реагирующими актиноидами [4], затем изменениями магнитного поля Земли и, возможно, землетрясениями.

Такое понимание причин изменений магнитного поля и климата Земли дает возможность научно обоснованного прогноза изменений условий жизни на Земле и природных катастроф на многие годы вперед.

Литература

1. **Митрофанов, В. В.** О возможности взрывного энерговыделения в недрах планет [Текст] / В. В. Митрофанов, В. Ф. Анисичкин, Д. В. Воронин, А. А. Жилин, А. В. Федоров, Б. П. Крюков, А. И. Туркин // Труды Международной конференции «V Забабахинские научные чтения». – Снежинск : Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 1999. – С. 67–76.
2. **Анисичкин, В. Ф.** Цепные ядерные реакции деления нуклидов в ядре Земли в течение миллиардов лет [Текст] / В. Ф. Анисичкин, А. А. Безбородов, И. Р. Сулов // Атомная энергия. – 2005. – 98, вып. 5. – С. 370–379.
3. **Anisichkin, V. F.** Georeactor in the Earth [Text] / V. F. Anisichkin, A. A. Bezborodov, and I. R. Suslov // Transport Theory and Statistical Physics. – 2008. – 37. – P. 624–633.
4. **Bellinih, G.** Observation of Geo-Neutrinos [Text] / G. Bellinih, J. Benziger, et al. (Borexino Collaboration). – 2018. – arXiv:1003.0284 [hep-ex].

ON THE CAUSES OF CHANGES IN THE MAGNETIC FIELD AND CLIMATE OF THE EARTH

V. F. Anisichkin

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Siberian Branch of the
Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

E-mail: avf@hydro.nsc.ru

Uranium and thorium in the composition of high-melting and high-density carbides and oxides could settle from molten magma to the solid core of the Earth [1]. In the formed clusters of actinoids for billions of years can briefly and periodically occur nuclear chain reactions with the reproduction of easily fissional isotopes [2, 3].

Thermal convective flows arising above the reaction zones change the Earth's magnetic field, and in cases of subsidence of reactions to its weakening.

Periodically carried to the surface in convective flows and as a result of thermal conductivity, heat affects the Earth's climate.

The beginning of an active cycle can be immediately detected by an increase in the flow of electron antineutrinos emitted by reacting actinoids [4], then by changes in the Earth's magnetic field and possibly earthquakes.

Such an understanding of the causes of changes in the Earth's magnetic field and climate makes it possible to scientifically based forecast of changes in living conditions on Earth and natural disasters for many years to come.

References

1. **Ershov, A. P.** Natural neutron-fission wave / A. P. Ershov and V. F. Anisichkin // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2003. – 39, No. 2. – P. 226–231.
2. **Anisichkin, V. F.** Nuclear fission chain reactions of nuclides in the Earth's core over billions of years [Text] / V. F. Anisichkin, A. A. Bezborodov, and I. R. Suslov // Atomic Energy. – 2005. – 98, No. 5. UDC 621.039.5 Translated from Atomnaya Énergiya, 2005, Vol. 98, No. 5, P. 370–379.
3. **Anisichkin, V. F.** Georeactor in the Earth [Text] / V. F. Anisichkin, A. A. Bezborodov, and I. R. Suslov // Transport Theory and Statistical Physics. – 2008. – 37. – P. 624–633.
4. **Bellinih, G.** Observation of Geo-Neutrinos [Text] / G. Bellinih, J. Benziger, et al. (Borexino Collaboration). – 2018. – arXiv:1003.0284 [hep-ex].

1-2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕМПФИРОВАНИЯ ВЗРЫВНОЙ НАГРУЗКИ ДИАФРАГМЕННЫМИ КОЛЬЦАМИ

С. В. Балужкин, А. Ю. Симонов, Г. В. Куликов,
В. И. Беляков, М. В. Никифоров, С. Д. Пасюков,
В. П. Качаев, А. А. Тараканов, В. Н. Щербаков,
А. С. Степанов, И. Н. Гордеев,
А. К. Музыря, С. М. Ульянов

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забахина,
Снежинск, Россия

В докладе представлены результаты воздействия взрывной нагрузки на торцевые крышки взрывной камеры с установленными диафрагменными кольцами и без них. По условиям постановки опытов к месту расположения стенки приходит ударная волна с амплитудой давления 11,9 МПа в опыте № 1 и 22,7 МПа в опыте № 2 на расстоянии 1,3 м до торца крышки. В опыте

№ 2 в конструкцию взрывной камеры были добавлены диафрагменные кольца. Диафрагменное кольцо представляет собой круглую пластину с внутренним отверстием, которая вваривается внутрь цилиндрической части взрывной камеры. Диафрагма подкрепляется ребрами в виде треугольных пластин. Диафрагменное кольцо уменьшает сечение камеры в 2 раза.

Во время опытов проводились измерения перегрузок на торцах камеры, перемещения наружной поверхности торцов камеры, деформации полюсной зоны крышек. На крышках устанавливались датчики перегрузки типа АДП (с диапазоном 20 000g и 50 000g). Измерения перемещений крышек осуществлялись с применением радиоволновой методики. В эксперименте задействовались два одноканальных радиointерферометра. В качестве излучателей-приемников использовались конуса с фокусирующим элементом. Для оценки скорости перемещения наружной поверхности крышки использовались индикаторные объекты, устанавливаемые на поверхности крышки, перемещение которых регистрировалось двумя высокоскоростными камерами с частотой кадров 5000 и 20 000.

Показано, что введение в конструкцию диафрагменных колец, уменьшающих внутреннее сечение взрывной камеры на 50%, позволило снизить перегрузку в полюсе крышки на 55%, деформацию на полюсе крышки на 66,7%, скорость полюсной зоны крышки на 60,7%. При этом реакция цилиндрического корпуса на взрыв не изменилась. Таким образом, установка диафрагменных колец позволяет уменьшить нагрузку на торцевые зоны взрывной камеры.

EXPERIMENTAL STUDY OF DAMPING EXPLOSIVE LOAD USING DIAPHRAGM RINGS

S. V. Balushkin, A. Yu. Simonov, G. V. Kulikov,
V. I. Belyakov, M. V. Nikiforov, S. D. Pasyukov,
V. P. Kachaev, A. A. Tarakanov, V. N. Shcherbakov,
A. S. Stepanov, I. N. Gordeev,
A. K. Muzyrya, S. M. Ulyanov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

The work gives the results of studying the effect of explosive loading on the flange caps of the explosive chamber with diaphragm rings fixed in the chamber and without them. According to the experimental setup, a shock wave arrives to the place where the wall is located with the pressure amplitude of 11.9 MPa in experiment 1, and 22.7 MPa in experiment 2, the wall being located at the distance of 1.3 m from the cap flange. In experiment 2, diaphragm rings were additionally introduced into the explosive chamber structure. A diaphragm ring is a round plate with an internal orifice which is weld in the cylindrical part of the explosive chamber. The diaphragm is supported by ribs in the form of triangle plates. The diaphragm ring reduces the chamber section by half.

In the course of the experiments, overloads on the chamber flanges, displacements of the external surfaces

of the chamber flanges, and strains of the caps' pole areas were measured. ADP-like overload sensors (ranges of 20,000g and 50,000g) were installed on the caps. Displacements of the caps were measured using radio wave technique. In the experiment, two single channel radio interferometers were used. Cones with a focusing element were used as emitters-receivers. To measure the displacement rate of the cap's external surface, indicator objects were installed on the cap surface, and their displacement was recorded through two high-rate cameras with the frame rates of 5,000 and 20,000.

The introduction of diaphragm rings into the chamber structure reducing the explosive chamber section by 50% is shown to decrease the overload within the cap's pole areas by 55%, the strain over the cap pole by 66.7%, and the displacement rate of the cap pole area by 60.7%. At that, the response of the cylindrical enclosure to the explosion has not been changed. Therefore, the installation of diaphragm rings allows reducing the load on the explosive chamber flange areas.

1-3

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОМЕТ С ТЕЛАМИ АСТЕРОИДНОГО ПОЯСА. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ДОЛГО- И КОРОТКОПЕРИОДИЧЕСКИХ КОМЕТ

А. А. Баренбаум

Институт проблем нефти и газа РАН (ИПНГ РАН),
Москва, Россия

E-mail: azary@mail.ru

Известно [1], что при движении в Галактике Солнце периодически пересекает струйные потоки и галактические рукава, и тогда Солнечная система подвергается интенсивным бомбардировкам галактическими кометами. Последняя бомбардировка имела место от 5,0 до 0,7 млн лет назад при нахождении Солнца в струйном потоке Орион-Лебедь.

В связи с проблемой происхождения наблюдаемых комет [2], изучаются следствия столкновений высокоскоростных комет Орион-Лебедь с телами пояса астероидов. Кометы двигались относительно Солнца со скоростью 450 км/с, а их размеры, массы и энергии соответственно составляли 0,1–3,5 км, 10^{12} – 10^{17} г и 10^{20} – 10^{25} Дж.

Столкновения таких комет с астероидами приводят к образованию и выбросу из пояса большого числа дочерних тел – «кометоастероидов», состоящих из льдистого вещества разрушенных комет, смерзшегося с обломочным и испарившимся материалом астероидов, а также обильному испусканию пыли. Вероятность разрушения комет в поясе на 2 порядка выше, чем их падения на Солнце [1].

Найдены условия, при которых кометоастероиды, возникшие в поясе от 5,0 до 0,7 млн лет назад могут быть захвачены гравитацией Солнца и остаться на

околосолнечных орбитах. Выделены две группы таких тел. Первые вылетели из пояса со скоростями близкими критической скорости захвата их Солнцем, составляющей 25 км/с. Имеют сильно вытянутые орбиты с афелиями $\sim 10^4$ – 10^5 а.е. и сегодня многие из них впервые возвращаются назад к Солнцу. Распределение их по углам вылета из пояса практически изотропно. Вторые никогда не покидали Солнечную систему, тяготеют к плоскости эклиптики и сохранились лишь в межпланетном пространстве между планетами-гигантами и за ними. При случайных сближениях с планетами они отбрасываются в сторону Солнца, и тогда их обнаруживают и относят к семейству комет соответствующей планеты-гиганта.

Рассмотренный механизм полностью решает проблему происхождения комет Солнечной системы, поставленную более 200 лет назад.

Литература

1. Баренбаум, А. А. Галактоцентрическая парадигма в геологии и астрономии [Текст]. – М : ЛИБРОКОМ. – 2010.
2. Баренбаум, А. А. Новые представления о происхождении комет и их взаимодействиях с объектами Солнечной системы [Текст] // Кометный циркуляр. – Киев, 1990. – № 418. – С. 11–12.

INTERACTIONS OF GALACTIC COMETS WITH ASTEROID BELT BODIES. ORIGIN OF LONG-PERIODIC AND SHORT-PERIODIC COMETS

A. A. Barenbaum

Oil and Gas Research Institute RAS (OGRI RAS),
Moscow, Russia
E-mail: azary@mail.ru

It is known [1] that when moving in the Galaxy, the Sun periodically crosses jet streams and galactic arms, and in that case the Solar System is subjected to intense bombardments by galactic comets. The last bombardment took place from 5 to 0.7 Ma when the Sun was in the Orion-Cygnus jet stream [3].

In connection with the problem of the observed comets origin [2], we theoretically investigated the consequences of collisions of high-speed comets Orion-Cygnus with the asteroid belt bodies. Comets moved relative to the Sun at a speed of 450 km/s, and their sizes, mass and energy were, respectively, 0.1–3.5 km, 10^{12} – 10^{17} g and 10^{20} – 10^{25} J [1].

The collisions of such comets with asteroids lead to abundant dust-formation as well as to the formation and ejection from the belt of a large number of daughter bodies – “cometoasteroids”, consisting of icy matter of destroyed comets, frozen together with debris and evaporated material of asteroids. It is shown that the probability of destruction of comets in the asteroid belt is 2 orders of magnitude higher than their falls on the Sun.

The conditions were found under which cometoasteroids, formed in the belt from 5 to 0.7 Ma, can be captured by the Sun gravity and remain in circumsolar orbits. Two groups of such bodies have been identified. The first ones flew out of belt at a speed close to the critical speed of

their capture by the Sun, which is 25 km/s. They have strongly elongated orbits with aphelions of $\sim 10^4$ – 10^5 AU, and today many of them are returning to the Sun for the first time. Their distribution over the angles of fly out from the belt is practically isotropic. The latter never left the Solar System, gravitate towards ecliptic plane and have survived only in interplanetary space between giant planets and behind them. In the case of accidental encounters with planets, they are thrown towards the Sun, after which astronomers discover them and refer to the comets family of corresponding giant planet.

References

1. Barenbaum, A. A. Galactocentric Paradigm in Geology and Astronomy [Text]. – М : LIBROCOM. – 2010.
2. Barenbaum, A. A. New representations about the origin of comets and their interactions with objects of the Solar System [Text] // Kometnyy tsirkulyar. – Kiev, 1990. – No. 418. – P. 11–12 (In Russian).

1-4

О ВЫБРОСЕ ЧАСТИЦ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЛАЙНЕРОВ ИЗ МЕДИ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ, КВАЗИИЗЭНТРОПИЧЕСКОМ И ИЗЭНТРОПИЧЕСКОМ РЕЖИМАХ ИХ УСКОРЕНИЯ

И. А. Блинов, В. А. Огородников, С. В. Ерунов,
А. О. Бликов, Е. В. Кулаков, Е. А. Чудаков,
М. В. Антипов, К. Н. Панов, М. А. Сырунин,
В. Н. Князев, Н. Б. Давыдов, А. Б. Георгиевская,
А. О. Яговкин, И. В. Юртов,
Д. Н. Замыслов, А. В. Котин

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия
E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

В физике ударных волн в последние десятилетия подробно исследовали и широко обсуждали эффект ударно-индуцированного «пыления», связанный с выбросом частиц материала со свободной поверхности (СП) лайнера при выходе на нее ударной волны [1]. Главные источники выброса частиц связаны с микронеровностями на СП и дефектами структуры материала лайнера (поры, включения и т. п.). Обсуждаемый эффект может привести к экранировке СП «подушкой» из этих частиц, которая препятствует регистрации тонкой структуры динамики ее движения с использованием, например, доплеровских методов. В ряде случаев наличие частиц перед СП вообще недопустимо, например, в устройствах для сжатия плазмы при исследовании термоядерного синтеза.

В связи с этим возникает проблема подавления или даже полного исключения эффекта ударно-индуцированного «пыления». В данном сообщении приводятся экспериментальные результаты по сравнению эффектов «пыления» при ударно-волновом, квазиизэн-

тропическом и изэнтропическом способах нагружения лайнеров в виде пластин при их ускорении до скорости $\sim(4-5)$ км/с.

Литература

1. **Огородников, В. А.** О выбросе частиц со свободной поверхности металлов при выходе на нее ударной волны и методах диагностики этих частиц [Текст] / В. А. Огородников, А. Г. Иванов, А. Л. Михайлов, М. И. Крюков // ФГВ. – Т. 34, № 6. – С. 103 (1998).

ON EJECTION OF PARTICLES FROM THE FREE SURFACE OF COPPER LINERS UNDER SHOCKWAVE, QUASI-ENTHROPIC AND ISENTHROPIC REGIMES OF THEIR ACCELERATION

I. A. Blinov, V. A. Ogorodnikov, S. V. Yerunov, A. O. Blikov, E. V. Kulakov, E. A. Chudakov, M. V. Antipov, K. N. Panov, M. A. Syrunin, V. N. Knyazev, N. B. Davydov, A. B. Georgievskaya, A. O. Yagovkin, I. V. Yurtov, D. N. Zamyslov, A. V. Kotin

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

In the physics of shock waves the effect of shock-induced “ejection” has been studied in detail and widely discussed in recent decades. It is associated with the ejection of material particles from the free surface (FS) of a liner when a shock wave enters it [1]. The main sources of particle ejection are associated with microroughnesses on the FS and defects in the structure of the liner material (pores, inclusions, etc.). The discussed effect can lead to screening of the FS by a “cloud” of these particles, which prevents the registration of the fine structure of the dynamics of its motion using, e. g., Doppler methods. In some cases, the presence of particles in front of the FS is generally unacceptable, e. g., in devices for compressing plasma in the study of thermonuclear fusion.

Concerning this, the problem arises of suppressing or even completely eliminating the effect of shock-induced “ejection”. This report presents experimental results comparing the effects of “dusting” in shock-wave, quasi-isentropic and isentropic methods of loading liners in the form of plates when it is accelerated to a speed of $\sim(4-5)$ km/s.

References

1. **Ogorodnikov, V. A.** Ejection of particles from the free surface of metals at the moment a shock wave reaches it and methods of diagnostics of these particles [Text] / V. A. Ogorodnikov, A. G. Ivanov, A. L. Mikhailov, N. I. Kryukov // Combustion, Explosion and Shock Waves. – Т. 34, No. 6. – P. 103 (1998).

1-5

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ АСТЕРОИДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

В. И. Гроховский

Физико-технологический институт, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

E-mail: grokh47@mail.ru

Обзор. Опасность взаимодействия природных космических объектов с Землей была, есть и будет. Интересы материаловедов в обеспечении астероидной безопасности связаны с исследованием состава, свойств и физики разрушения метеоритов.

Опасность вторжения астероида зависит прежде всего от его размеров. Объекты размером менее десятков метров могут нанести небольшой ущерб и представляют основной интерес для сбора вещества метеоритов. При размерах более 500 м вряд ли есть возможность противостоять последствиям удара о Землю. Объекты размером 50–150 м трудно обнаружить астрономически, поэтому их трудно отклонить заранее, но они достаточно велики и могут разрушить при ударе крупный город. Поэтому важно понимать их поведение в атмосфере. К числу неопределенностей, необходимых для ответа на этот вопрос, относятся состав, строение, физические свойства и механика разрушения метеороидов. В настоящее время эти сведения можно получить в основном при исследовании метеоритов. Однако наблюдается существенная разница между соотношениями типов метеоритов и таксонометрической классификацией астероидов по астрономическим данным. Этот парадокс заключается в том, что самая большая группа метеоритов – обыкновенные хондриты, не имеют окончательного спектрального соответствия ни одному классу астероидов. Эти различия обусловлены тем, что вещество метеороидов изменяет спектральные свойства под действием факторов космического выветривания.

Множество данных об исследовании состава и строения метеоритов указывают на широкий спектр материалов, попадающих в атмосферу Земли. Особенностью любого вещества метеоритов является присутствие сплавов Fe-Ni-Co, при этом в них обнаружены продукты всех известных для металлических систем фазовых и структурных превращений. Разрушение наиболее опасных железных метеороидов определяется размерами кристаллов и прочностью межфазных границ. Максимальные значения ударной вязкости демонстрируют высоконикелевые атакситы с субмикроскопической смесью фаз.

В большинстве изученных каменных метеоритов из разных коллекций мира наблюдается трещиноватость. Кроме того, траекториями трещин могут служить ослабленные ударные прожилки, пустоты в хондритах, брекчии. В теле метеорита Челябинск ослабленными местами служили усадочные пустоты после кристаллизации ударного расплава.

MATERIALS SCIENCE QUESTIONS OF ASTEROID SAFETY

V. I. Grokhovsky

Institute of Physics and Technology, Ural Federal University,
Ekaterinburg, Russia
E-mail: grokh47@mail.ru

Overview. The hazard of interaction of natural space objects with the Earth was, is and will be. The interests of materials scientists in ensuring asteroid safety are related to the study of the composition, properties and physics of meteorites fracture.

The hazard of an asteroid invasion depends primarily on its size. The meter scale objects can cause minor damage and are of primary interest for collecting meteorite matter. It is hardly possible to withstand the consequences of an impact on the Earth for asteroids more than 500 m. The 50–150 m objects are difficult to detect, so they are difficult to deflect in advance, but they could destroy a large city in case of impact. Therefore, it is important to understand their behavior in the atmosphere. The uncertainties required to answer this question include the composition, structure, physical properties, and fracture mechanics of meteoroids. At present, this information can be obtained mainly from the study of meteorites. However, there is a significant difference between the ratios of the types of meteorites and the taxonomic classification of asteroids based on astronomical data. This paradox lies in the fact that the largest group of meteorites, ordinary chondrites, do not have the final spectral correspondence to any class of asteroids. These differences are due to the fact that the substance of meteoroids changes its spectral properties under the influence of space weathering factors.

A wealth of data on the study of the composition and structure of meteorites indicate a wide range of materials entering the Earth's atmosphere. A feature of any meteorite substance is the presence of Fe-Ni-Co alloys, while the products of all phase and structural transformations known for metallic systems are found in them. The fracture of the most dangerous iron meteoroids is determined by the size of the crystals and the strength of the interphase boundaries. High-nickel ataxites with a submicroscopic mixture of phases demonstrate the maximum values of impact strength.

Fracturing is observed in most of the studied stony meteorites from different collections of the world. In addition, weakened impact veins, voids in chondrites, and breccias can serve as crack trajectories. In the body of the Chelyabinsk meteorite, the weakened places were shrinkage voids after the crystallization of the shock melt.

1-6

ИМПУЛЬСНЫЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ АППАРАТ НА ОСНОВЕ ТРАНСФОРМАТОРА ТЕСЛА С НЕОДНОРОДНОЙ ФОРМИРУЮЩЕЙ ЛИНИЕЙ В РАЗРЯДНОЙ ЦЕПИ

А. В. Долгих^{1,2}, Е. И. Пальчиков^{1,2}, В. В. Клыпин^{1,3},
М. С. Самойленко¹, А. М. Рябчун^{1,2}

¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, Россия

²Новосибирский национальный исследовательский
государственный университет, Новосибирск, Россия

³Специализированный учебно-научный центр
университета, Новосибирск, Россия

E-mail: palchikov@hydro.nsc.ru, magnak@mail.ru,
klipvlad@gmail.com, saguru@inbox.ru,
ryabchun@hydro.nsc.ru

Рассматриваемая разрядная цепь состоит из конденсаторной батареи, разрядника, коаксиального кабеля и рентгеновской трубки с взрывной эмиссией, соединенных последовательно. Преимуществом предложенной разрядной цепи является то, что в случае трансформатора Тесла, компактная высоковольтная батарея конденсаторов с одним разрядником высокого давления всегда будет иметь меньшую индуктивность, нежели сборка на ту же емкость в виде генератора Аркадьева–Маркса, состоящая из последовательно включенных чередующихся разрядников и тех же конденсаторов.

Отсутствие цепей статической зарядки не только упрощает устройство, но и позволяет сделать ударную емкость с разрядником предельно малоиндуктивными, приблизив стенки их коаксиального кожуха на минимальное расстояние. Отсюда следует, что при одинаковых сопротивлении нагрузки и емкости и заданном выходном напряжении сборка в виде компактной батареи будет всегда давать более крутое нарастание тока и напряжения, нежели схема Аркадьева–Маркса. За счет меньшего волнового сопротивления у компактной сборки, состоящей из конденсаторной батареи и разрядника, имеется три преимущества:

- на кабеле и далее на нагрузке падает большее напряжение, что повышает лучевую отдачу;
- удвоение скорости нарастания напряжения (и амплитуды) импульса при отражении его от разомкнутого конца кабеля благотворно сказывается на стабильности срабатывания рентгеновских трубок и уширяет спектр излучения в «жесткую» область;
- аperiодический разряд возможен на нагрузку с меньшим сопротивлением, что позволяет подсоединять к сборке несколько нагрузок в виде кабелей с трубками параллельно.

Использование кабеля для соединения компактной батареи с каждой из трубок стабилизирует режим всего устройства – за счет независимого раздельного срабатывания отсутствует конкуренция рентгеновских трубок. Подборкой кабеля с волновым сопротивлением в диапазоне 20–75 Ом можно согласовать разрядную

цепь с различными промышленно производимыми рентгеновскими трубками.

В работе вычисляются электрофизические параметры предложенной разрядной цепи и приводятся конструкции и характеристики импульсных рентгеновских аппаратов, построенных по данной схеме на напряжения от 100 до 240 кВ с количеством рентгеновских трубок от одной до трех.

PULSE X-RAY DEVICE BASED ON TESLA TRANSFORMER WITH INHOMOGENEOUS FORMING LINE IN THE DISCHARGE CIRCUIT

A. V. Dolgikh^{1,2}, E. I. Palchikov^{1,2}, V. V. Klypin^{1,3},
M. S. Samoilenko¹, A. M. Ryabchun^{1,2}

¹Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS,
Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

³Specialized Educational Scientific Center of Novosibirsk State
University, Novosibirsk, Russia.

E-mail: palchikov@hydro.nsc.ru, magnak@mail.ru,
klypvlad@gmail.com, saguru@inbox.ru,
ryabchun@hydro.nsc.ru

The considered discharge circuit consists of connected in series capacitor bank, a spark gap, a coaxial cable, and an explosive emission X-ray tube. The advantage of the proposed discharge circuit is that in the case of a Tesla transformer, a compact high-voltage capacitor bank with one high-pressure spark gap will always have a lower inductance than an assembly for the same capacity in the form of a Marx generator, consisting of sequentially connected alternating spark gaps and the same capacitors.

The absence of static charging circuits not only simplifies the device, but also makes it possible to make the shock capacitance with the spark gap extremely low-inductive by putting the walls of coaxial casing at the minimum distance. This leads to that this assembly in the form of a compact battery will always produce a steeper voltage and current increase than the Marx circuit, with the same load resistance, capacity and given output voltage. Due to the lower wave impedance, the compact assembly, consisting of a capacitor bank and an spark gap, has three advantages:

- a higher voltage applied to the cable and further to the load, which increases the radiation efficiency;
- doubling rise speed of the pulse voltage (and amplitude) when it is reflected from the open end of the cable has a beneficial effect on the stability of the X-ray tube operation and widen the radiation spectrum to the “hard” range;
- an aperiodic discharge is possible on a load with a lower resistance, which makes it possible to connect several parallel loads (cables with X-ray tubes).

The use of a cable to connect a compact battery to each of the tubes stabilizes the mode of the entire device due to independent separate tube igniting, there is no competition between X-ray tubes. By selecting a cable with wave impedance in the range of 20–75 Ohm, it is possible to match the discharge circuit with various commercially available X-ray tubes.

The paper has calculations the electrophysical parameters of the proposed discharge circuit and presents

the designs and characteristics of pulsed X-ray devices for voltages from 100 to 240 kV with up to 3 connected X-ray tubes, built in accordance to this circuit.

1-7

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ДИАГНОСТИКЕ ФОКУСНОГО ПЯТНА ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ

П. А. Колесников¹, В. Ю. Политов¹,
С. А. Колесников¹, А. Р. Ахметов¹, А. В. Каплунов¹,
В. Ю. Эверт¹, О. А. Черница¹, О. А. Никитин¹,
Ю. А. Трунев², Д. И. Сквородин², М. Г. Атлуханов²,
А. В. Бурдаков², В. В. Данилов², В. В. Куркучеков²,
С. С. Попов², К. И. Живанков²

¹Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, Россия

В РФЯЦ – ВНИИТФ введена в эксплуатацию установка на базе линейного индукционного ускорителя (ЛИУ) для исследования динамически развивающихся объектов за счет взрывного нагружения по методу импульсной рентгенографии. Одним из основных преимуществ ЛИУ является высококачественный электронный пучок и малый размер фокусного пятна. Для настройки ускорителя необходимо создание комплекса быстродействующих и эффективных диагностик.

Разработана система диагностики ЛИУ, контролирующая размер фокусного пятна в обратном направлении движению электронов. При этом контроль осуществляется в каждом пуске независимо от наличия тест-объектов на оси рентгенографирования.

Представлена разработанная система диагностики фокусного пятна в обратном направлении, принцип ее работы. Представлены результаты расчетных и экспериментальных исследований по определению фокусного пятна ЛИУ с использованием системы диагностики методом «полутени от резкого края».

FINDINGS ON DIAGNOSING THE SIZE OF FOCAL SPOT OF LINEAR-INDUCTION ACCELERATOR

P. A. Kolesnikov¹, V. Yu. Politov¹, S. A. Kolesnikov¹,
A. R. Akhmetov¹, A. V. Kaplunov¹, V. Yu. Evert¹,
O. A. Chernitsa¹, O. A. Nikitin¹, Yu. A. Trunev²,
D. I. Skovorodin², M. G. Atlukhanov², A. V. Burdakov²,
V. V. Danilov², V. V. Kurkuchekov²,
S. S. Popov², K. I. Zhivankov²

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

²Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS,
Novosibirsk, Russia

RFNC – VNIITF has put into operation a facility based on linear-induction accelerator (LIA) to study dynamically evolving objects through explosive loading using flash radiography technique. One of the main LIA advantages is a high-quality electron beam and a small-sized focal spot. A variety of responsive and efficient diagnostic tools is required to adjust the accelerator.

A system to diagnose the LIA is developed which allows sizing the focal spot size in the backward direction as to the direction of electron motion. At that, this is done in each run regardless the presence of test objects on the X-ray radiography axis.

The system developed to diagnose the focal spot in the backward direction is depicted, and its operation principle is described. The computational and experimental results are presented on determining the LIA focal spot through “half-shadow from sharp edge” diagnostic technique.

1-8

СОВМЕСТНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДОПЛЕРОВСКОЙ ВЕЛОСИМЕТРИИ И КОГЕРЕНТНОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ЗОНДИРОВАНИЯ ПЫЛЕВЫХ ВЫБРОСОВ УДАРНО-НАГРУЖЕННЫХ ОБРАЗЦОВ

А. Н. Кондратьев, А. В. Андрияш, Ш. М. Исмаилов,
В. Г. Каменев, Г. В. Каплюков, П. В. Кубасов,
С. Е. Куратов, Д. В. Рогозкин, А. А. Тихов, И. В. Тур,
А. С. Шубин, С. А. Шубин, П. Н. Ярошук

Всероссийский научно-исследовательский институт
автоматики имени Н. Л. Духова, Москва, Россия

Представлены результаты экспериментов по ударному нагружению стальной пластины с нанесенным абразивным порошком корунда Al_2O_3 . На основе подхода [1, 2] восстановлены характеристики пылевого облака по данным доплеровского гетеродинного зондирования (PDV) и измерений углового профиля когерентного обратного рассеяния (КОР). Определены распределение частиц корунда по скорости и поверхностная плотность пыления.

Тот факт, что усредненная спектральная мощность гетеродинных биений может быть связана с решением транспортного уравнения [1, 2], позволяет провести теоретическое моделирование PDV данных. Варьируя параметры пылевого выброса (транспортную оптическую толщину пылевого облака и начальное распределение частиц по скоростям), удается добиться хорошего согласования динамики рассчитанных доплеровских спектров с данными измерений в заданном временном интервале и тем самым восстановить значения этих параметров. Учтены эффекты, обусловленные конечной начальной толщиной слоя частиц и ограниченным полем зрения PDV-системы.

Применительно к диагностике пылевых выбросов ударно-нагруженных образцов, впервые представлены результаты измерений углового профиля КОР в различные моменты времени. Этот метод дает дан-

ные о пространственно-временном распределении выброшенной массы (аналогичные лидарным) и ее абсолютных значениях. Показано, что обработанные угловые профили КОР, менее подвержены флуктуациям по сравнению с доплеровскими спектрами, и это позволяет повысить точность экспериментального определения транспортной оптической толщины пылевого слоя.

Представленные результаты демонстрируют, что одновременное использование двух независимых каналов измерений, PDV и КОР, дает новые возможности в восстановлении параметров пылевого выброса (в частности, при его неавтомодельном расширении).

Литература

1. **Андрияш, А. В.**, С. А. Дьячков, В. В. Жаховский и др. [Текст]. – ЖЭТФ. – 2020. – 157 (3), 406.
2. **Kondrat'ev, A. N.**, A. V. Andriyash, S. E. Kuratov and D. V. Rogozkin [Text]. – JQSRT. – 2020. – 246, 106925.

APPLICATION OF SIMULTANEOUS MEASUREMENTS BY PHOTON DOPPLER VELOCIMETRY AND THE COHERENT BACKSCATTERING FOR PROBING EJECTA FROM SHOCK-LOADED SAMPLES

A. N. Kondrat'ev, A. V. Andriyash, Sh. M. Ismailov,
V. G. Kamenev, G. V. Kaplyukov, P. V. Kubasov,
S. E. Kuratov, D. V. Rogozkin, A. A. Tihov, I. V. Tur,
A. S. Shubin, S. A. Shubin, P. N. Yaroshchuk

FSUE Dukhov Automatics Research Institute of (VNIIA),
Moscow, Russia

The results of experiments on shock loading of a steel plate with applied abrasive corundum powder (Al_2O_3) are presented. Based on the approach [1, 2], the characteristics of ejecta cloud were reconstructed from the data of photon Doppler velocimetry (PDV) and measurements of the angular profile of coherent backscattering (CBS). The velocity distribution of corundum particles and the areal density of ejecta have been determined.

The fact that the averaged spectral power of heterodyne beats can be related to the solution of the transport equation [1, 2] allows theoretical modeling of PDV data. By varying the parameters of the ejecta (the transport optical thickness of the ejecta cloud and the initial velocity distribution), it is possible to achieve a good agreement between the dynamics of the calculated Doppler spectra and the measurement data in a given time interval and thereby restore the values of these parameters. The effects due to the finite initial thickness of the particle layer and the limited field of view of the PDV system are taken into account.

With regard to the diagnostics of ejecta from shock-loaded samples, the results of measurements of the CBS angular profile at different times are presented for the first time. This method provides data on the space-time distribution of the ejected mass (similar to LIDAR measurements) and its absolute values. It is shown that the processed CBS angular profiles are less susceptible to

fluctuations in comparison with the Doppler spectra, and this makes it possible to increase the accuracy of the experimental determination of the transport optical thickness of the ejecta layer.

The presented results demonstrate that the simultaneous use of two independent measurement channels, PDV and CBS, provides new opportunities for recovering the parameters of ejecta (in particular, with its non-self-similar expansion).

References

1. **Andriyash, A. V.**, S. A. Dyachkov, V. V. Zhahovsky et al. [Text]. – JETP. – 2020. – 157 (3), 406.
2. **Kondratev, A. N.**, A. V. Andriyash, S. E. Kuratov and D. B. Rogozkin [Text]. – JQSRT. – 2020. – 246, 106925.

1-9

МОДЕЛЬ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА И РАСШИРЕНИЯ ВСЕЛЕННОЙ В ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ С РАЗЛЕТОМ КОНЕЧНОЙ МАССЫ ГАЗА ИЗ ТОЧКИ В ПУСТОТУ

А. Н. Крайко

Центральный институт авиационного моторостроения
им. П. И. Баранова, Москва, Россия

E-mail: akraiko@ciam.ru

Построена новая модель Большого взрыва и расширения Вселенной с описанием в рамках общей и специальной теорий относительности (ОТО и СТО) начавшегося внутри сферы гравитационного радиуса Вселенной разлета из точки в пустоту конечной массы идеального газа («начальной горячей сингулярности – НГС»). На первый взгляд он, как и разлет сингулярности черной дыры, невозможен. Принципиальное отличие, однако, в том, что черная дыра – результат коллапса после выгорания в массивной звезде термоядерного горючего. Поэтому несмотря на неограниченный рост давления при коллапсе силы тяготения всегда больше противостоящего им перепада давления. При разлете НГС все наоборот из-за огромных начальных энергии и давления всех безмассовых и массовых частиц и античастиц при пренебрежимом вкладе избыточных (над антибарионами и позитронами) барионов и электронов. В процессе разлета ситуация изменяется и энергия атомов, образованных этими барионами и электронами, становится доминирующей, оставаясь такой практически все миллиарды лет расширения Вселенной из тех же барионов и сформированных ими галактик.

В построенной модели сферически симметричный разлет из точки газа с конечными числом барионов N_0 , массой m_0 и энергией $E_0 = m_0 c^2$ (c – скорость света) описывается уравнениями ОТО с метрикой

$$ds^2 = e^{2\phi} dt^2 - \frac{e^{2\psi}}{c^2} dr^2 - \frac{r^2}{c^2} d\Omega^2,$$

где t и r – время и расстояние от центра разлета. Плотность числа частиц n , скорость u , давление p и энтальпия единицы объема w газа и функции ϕ и ψ удовлетворяют уравнению неразрывности и нелинейным относительно ϕ , ψ и их производных по t и r четырем уравнениям Эйнштейна.

При разлете плотность в его центре сразу становится конечной, убывая с ростом t . Благодаря этому $\phi = \psi = 0$ при $r = 0$ и $t > 0$, а область вокруг центра разлета, в которой ϕ и ψ малы и метрика близка к галилеевой («квазигалилеева область»), растет. При малых ϕ и ψ уравнение неразрывности ОТО становится уравнением неразрывности СТО, а уравнения Эйнштейна сводятся к двум уравнениям энергии-импульса СТО и к двум линейным относительно ϕ_r , ψ_r , ψ_t и ψ_r уравнениям. Связанные с тяготением функции ϕ и ψ в уравнения СТО не входят. Следствие этого – решение: $u = r/t$ и $p = 0$ в квазигалилеевой области. Показано, что разлет начальной сингулярности, моделирующий расширение Вселенной, ограничен сферой ее гравитационного радиуса $r_g = 2E_0 G/c^4$, где G – гравитационная постоянная. ОТО определяет эволюцию сферического слоя от границы квазигалилеевой области до сферы гравитационного радиуса.

Для более двухсот вариантов NASA найденное решение согласует значения времен жизни Вселенной и постоянной Хаббла не хуже современных космологических теорий. В свете построенного решения, формулы которого, включая $u = r/t$, не содержат эмпирических постоянных и не зависят от вида уравнений состояния, введение «темной энергии» излишне.

Полное изложение выполненного исследования приведено в [1, 2]

Работа выполнена при поддержке РФФИ (20-01-00100).

Литература

1. **Kraiko, A. N.** A Model of the Big Bang and Universe Expansion in General Relativity with Spread of a Gas Mass from a Point to Empty Space [Text] // Gravitation and Cosmology. – 2020. – V. 26. – No. 4. – P. 399–407.
2. **Крайко, А. Н.** Модель Большого взрыва и расширения Вселенной в общей теории относительности с разлетом конечной массы газа из точки в пустоту [Текст] // International Conference on Aviation Motors – ICAM 2020. Moscow, Russia, May 18–21, 2021. – Сб. тезисов. – Т. 1. – 466 с. – С. 126–131.

A MODEL OF THE BIG BANG AND THE EXPANSION OF THE UNIVERSE IN GENERAL RELATIVITY WITH A SPREAD OF THE FINITE MASS OF GAS FROM A POINT TO A VOID

A. N. Kraiko

Central Institute of Aviation Motors Named after P. I. Baranov,
Moscow, Russia

E-mail: akraiko@ciam.ru

A new model of the Big Bang and the expansion of the Universe is constructed with a description in the framework of the General and Special Relativity (GR and SR)

of the spread of the finite mass of an ideal gas, which began inside the sphere of the Universe's gravitational radius from a point (the “initial hot singularity – IHS”) to the void. At first glance it, like the spread of the black hole singularity, seems impossible. The fundamental difference, however, is that the black hole is the result of collapse after burning out of a massive star of thermonuclear fuel. Therefore, despite the unlimited increase in pressure during the collapse, the gravitational forces are always greater than the pressure drop that opposes them. In the case of the IHS expansion, the opposite is true because of the huge initial energy and pressure of all massless particles and antiparticles with a negligible contribution of excess (over anti-baryons and positrons) baryons and electrons. In the process of expansion, the situation changes and the energy of the atoms formed by these baryons and electrons becomes dominant, remaining so for almost all the billions of years of expansion of the Universe from the same baryons and the galaxies formed by them.

In the constructed model, a spherically symmetric expansion from a point of gas with a finite number of baryons N_0 , mass m_0 , and energy $E_0 = m_0 c^2$ (c is the light speed) is described by the GR equations with a metric

$$ds^2 = e^{2\varphi} dt^2 - \frac{e^{2\psi}}{c^2} dr^2 - \frac{r^2}{c^2} d\Omega^2,$$

where t and r are the time and distance from the center of the expansion. The density of the number of particles n , the velocity u , the pressure p , and the enthalpy of the unit volume w of the gas and the functions φ and ψ satisfy the continuity equation and the four Einstein equations that are nonlinear with respect to φ , ψ and their derivatives per t and r .

During the expansion, the density at its center immediately becomes finite, decreasing with the growth of t . Due to this, $\varphi = \psi = 0$ at $r = 0$ and $t > 0$, and the region around the center of the expansion, in which φ and ψ are small and the metric is close to the Galilean (“quasi-Galilean region”), increases. At low φ and ψ continuity equation of GR becomes the continuity equation of SR, and the Einstein equations reduce the two equations of energy – momentum of SR and two linear relative φ_r , ψ_r , ψ_t and φ_t equations. The gravity-related functions φ and ψ are not included in the SR equations. The consequence of this is the solution: $u = r/t$ and $p = 0$ in the quasi-Galilean domain. It is shown that the expansion of the initial singularity, which modulates the expansion of the Universe, is limited by the sphere of its gravitational radius $r_g = 2E_0 G/c^4$, where G is the gravitational constant. GR determines the evolution of a spherical layer from the boundary of a quasi-Galilean region to a sphere of gravitational radius.

For more than two hundred NASA variants, the solution found agrees on the values of the lifetime of the Universe and the Hubble constant as well as modern cosmological theories. In the light of the constructed solution, whose formulas, including $u = r/t$, do not contain empirical constants and do not depend on the type of the state equations, the introduction of “dark energy” is unnecessary.

The full description of the performed research is given in [1, 2].

The work was supported by the RFBR (20-01-00100).

References

1. **Kraiko, A. N.** A Model of the Big Bang and Universe Expansion in General Relativity with Spread of a Gas Mass from a Point to Empty Space [Text] // Gravitation and Cosmology. – 2020. – V. 26. – No. 4. – P. 399–407.
2. **Kraiko, A. N.** A Model of the Big Bang and the Expansion of the Universe in General Relativity with the Spread of a Finite Mass of Gas from a Point to the Void [Text] // International Conference on Aviation Motors-ICAM 2020. – Moscow, Russia, May 18–21, 2021. – Collection of abstracts. – Vol. 1. – 466 p. – 126–131.

1-10

ОПРОБОВАНИЕ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА КОНСТРУКТИВНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ

Д. П. Кучко, В. Н. Ногин, М. М. Шатов,
А. Г. Попцов, Д. Г. Панкратов

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: d.p.kuchko@vniitf.ru

В некоторых инженерных конструкциях, подвергающихся ударно-волновому нагружению, присутствуют конструктивные неоднородности (например, стыки деталей), из которых при прохождении волн могут инжектироваться струи материала. Эти струи, скорости которых достигают сотен и тысяч метров в секунду, могут воздействовать на другие детали конструкции, по которым, в свою очередь, будут распространяться ударные волны. Все это необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации изделий.

В данной работе опробовано расчетно-экспериментальное описание такого процесса на примере Н-образного сопряжения трех деталей, изготовленных из разных материалов: железо, медь, свинец, алюминий. В качестве генератора ударной волны использовался заряд ВВ. Двумерными расчетами вычислялись три параметра, характеризующие процесс струеобразования: угол наклона струи, скорость струи и амплитуда слабых ударных волн, образующихся при столкновении струи с другой деталью. Продемонстрировано влияние материала деталей на исследуемый процесс, а также размера расчетной сетки при описании столь тонкого явления. В экспериментах с помощью лазерной интерферометрии диагностировалась сама струя, а также слабые возмущения (~100 м/с) на тыльной поверхности детали, на которую воздействовала высокоскоростная струя. Результаты экспериментов показали, что расчетная модель качественно правильно

описывает процесс струеобразования, но для адекватного количественного прогнозирования необходима калибровка на результатах тестовых экспериментов.

Таким образом, продемонстрирована перспективность такого расчетно-экспериментального метода описания процессов, происходящих при прохождении ударных волн через конструктивные неоднородности.

**TESTING OF CALCULATION
AND EXPERIMENTAL METHOD
OF JET FORMATION RESEARCH
UNDER SHOCK-WAVE IMPACT
ON CONSTRUCTIVE INHOMOGENEITIES**

D. P. Kuchko, V. N. Nogin, M. M. Shatov,
A. G. Poptsov, D. G. Pankratov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

E-mail: d.p.kuchko@vniitf.ru

In some engineering constructions under shock wave loading there are constructive inhomogeneities (for example, workpieces joints) from which material jets can be injected under the waves passage. These jets, which velocities reach hundreds and thousands meters per second, can impact on the other constructional workpieces along which shock waves propagation will take place. All these items should be taken into account while product development and implementation.

The calculation and experimental description of such process using H-shaped joints of three workpieces made of different materials (iron, copper, lead, and aluminum) is tested in this paper. HE charge was used as shock-wave generator. Three parameters defining the process of jet formation were calculated by two-dimensional calculations: jet angle, jet velocity and weak shock wave amplitude formed at jet impingement with another workpiece. Influence of the workpiece material on the process under investigation, and also influence of the computational grid size at the description of such a delicate event phenomenon was demonstrated. The jet itself, and also weak disturbances (~100 m/s) on the workpiece back surface under high-velocity jet impact, was diagnosed in the experiments using laser interferometry. Results of experiments have shown that the computing model qualitatively correctly describes jet formation process, but calibration based on the results of test experiments is necessary for adequate quantitative forecasting.

Thus, viability of such calculation and experimental method to describe the processes arising during shock wave passage through constructive inhomogeneities is shown.

1-11

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ПРОЦЕССОВ ИМПУЛЬСНОГО ВЗРЫВНОГО
НАГРУЖЕНИЯ РАЗРУШАЕМЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ЗАЩИТНЫХ
КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ**

М. В. Манзук¹, Д. И. Алексеев¹, С. И. Кривошеев²,
С. Г. Магазинов², В. В. Харченко¹, В. О. Юрченко¹

¹АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», Санкт-Петербург,
Россия

²Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: manzuk@sintez.niiefa.spb.su

Согласно данным МАГАТЭ, в мире насчитывается 62 электрофизические установки типа токамак, находящиеся на различных стадиях жизненного цикла: 52 находятся в эксплуатации, 5 на стадии сооружения, 1 закрыт, а 4 на стадии конструирования.

Переход к сверхпроводящим магнитным системам позволил на порядок снизить энергозатраты на создание и удержание плазмы при помощи магнитных полей и увеличить уровень индукции в вакуумной камере, однако такая магнитная система имеет чрезвычайно высокую стоимость и легко может быть разрушена в случае перехода в нормальное состояние.

Для защиты сверхпроводниковых катушек необходимо быстро вывести энергию, запасенную в магнитном поле, чтобы избежать перегрева участка обмотки, потерявшего сверхпроводящие свойства. Сбой в процессе вывода энергии может вызвать необратимые повреждения установки стоимостью в миллиарды долларов, поэтому к надежности устройств вывода энергии предъявляются высокие требования (вероятность безотказного срабатывания – 0,99, при доверительной вероятности 0,9).

Защитные аппараты нашли широкое применение в системах питания современных токамаков со сверхпроводниковой магнитной системой, так защитный размыкатель, рассматриваемый в данной работе, нашел свое применение в токамаках ИТЭР, JT-60SA, KSTAR. Конструкция защищена патентом РФ [1].

Цель данной работы состояла в уточнении расчетно-экспериментальных методов определения давлений и усилий от продуктов взрыва (ПВ) для последующей оптимизации элементов конструкции, обеспечивающих коммутацию аварийных токов за счет разрушения при импульсном взрывном нагружении.

В работе выполнены оценочные расчеты возникающих давлений и усилий на конструктивные элементы размыкателя от ПВ в воздушной и водной среде, рассчитаны коэффициенты запаса по разрушению, включая разрушение цилиндрического токоподвода, находящегося в водной среде по теории Мизеса. Определена скорость разлета капсулы с гексогеном по методу Гарни. Выполнено численное моделирование с использованием пакета ANSYS [2–11].

Проведены предварительные измерения давлений от ПВ в водной среде на внутренней границе цилиндрического тоководящего элемента. Выполнен сравнительный анализ полученных экспериментальных данных с результатами расчетов значений давлений по методу Нобля–Абеля с затуханием давлений в воде по Р. Коулу.

Результаты были получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (www.spbstu.ru) [12].

Литература

1. **Пат. РФ на изобретение**, дата подачи заявки 12.10.2020. Взрывной размыкатель [Текст] / С. Д. Аванесов, М. В. Манзук, С. М. Волков, К. О. Бестужев, М. И. Семёнова, Д. И. Алексеев; АО «НИИЭФА»; решение к заявке № 2020133574/07 (061327).
2. **Котомин, А. А.** Эмпирические методы расчета взрывчатых веществ и композиций [Текст] / А. А. Котомин, С. А. Душенок, А. С. Козлов. – Санкт-Петербург : Лань, 2020. – 384 с.
3. **Дубнов, Л. В.** Промышленные взрывчатые вещества [Текст] / Л. В. Дубнов, Н. С. Бахаревиц, А. И. Романов. – Изд. 3-е дополненное и переработанное. – М. : Недра, 1988. – 188 с.
4. **Работнов, Ю. Н.** Сопrotivление материалов [Текст]. – М. : Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. – 456 с.
5. **Феодосьев В. И.** Сопrotivление материалов: учебник [Текст]. – Изд. 10-е переработанное и дополненное. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – 592 с.
6. **Ландау, Л. Д.** Теория упругости [Текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц. – М. : Изд-во «Наука», 1987. – Т. 7. – 259 с.
7. **Забабахин, Е. И.** Явления неограниченной кумуляции [Текст] / Е. И. Забабахин, И. Е. Забабахин. – М. : Изд-во «Наука», 1988. – 163 с.
8. **Забабахин, Е. И.** Кумуляция и неустойчивость [Текст]. – Снежинск : Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 1998.
9. **Дерибас, А. А.** Метание металлических пластин тангенциальной детонационной волной [Текст] // Прикладная математика и техническая физика. – 2000. – Т. 41, № 5.
10. **Физика взрыва** [Текст] : в 2 т. / под ред. Л. П. Орленко. – Изд. 3-е переработанное и дополненное. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002.
11. **Коул, Р.** Взрывы в воде [Текст] : [пер. с английского]. – 1948. – 439 с.
12. **ANSYS**, лицензия № 668315.

ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF PULSED EXPLOSIVE LOADING PROCESSES OF DESTRUCTIVE ELEMENTS OF PROTECTIVE SWITCHES (PSS)

M. V. Manzuk¹, D. I. Alekseev¹, S. I. Krivosheev², S. G. Magazinov², V. V. Harchenko¹, V. O. Yurchenko¹

¹Joint Stock Company “D. V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus”, St. Petersburg, Russia

²Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University (SPbPU), St. Petersburg, Russia

E-mail: manzuk@sintez.niiefa.spb.su

According to the IAEA there're 62 tokamaks which are at various stages of their life cycle.

Superconducting magnetic systems enable to reduce energy consumption for the creation/confinement of plasma by magnetic fields and to increase the induction level in the vacuum vessel however this system's expensive and can be destroyed in case of quench.

To protect superconducting coils, it's necessary to extract the energy stored in the magnetic field to avoid overheating of the winding part that has lost superconductivity. Failure in the energy extraction can cause damage of the facility, therefore high requirements are imposed on the FDUs reliability (the component reliability is 0.99 with a confidence probability of 0.9).

The protective circuit breaker and other PSs have found wide application in tokamaks. The switch design is protected by the RF patent [1].

The aim of this work was to specify the analytical-experimental methods of pressures/forces assessment produced by the explosion products (EP) for using in the subsequent optimization of structural elements that ensure the switching of fault currents due to destruction during pulsed explosive loading.

Arising pressures/forces assessments on the structural elements of the circuit breaker from the EP in air/water are carried out, the safety factors for destruction are calculated, including the destruction of a cylindrical current lead located in water according to the Mises' theory. The expansion velocity of the capsule with RDX was determined by Garni's method. Numerical modeling has been performed using the ANSYS [2–11].

The measurements of pressure values from the EP in water at the inner boundary of the cylindrical current-conducting element are performed. A comparative analysis of pressure values results according to Noble–Abel with the decay of pressures in water according to R. Cole is carried out.

The work results were obtained using computational resources of the supercomputer center in SPbPU [12].

References

1. **Patent of RF for an invention**, filing date 10/12/2020. Explosive current breaker [Text] / S. D. Avanesov, M. V. Manzuk, S. M. Volkov, K. O. Bestuzhev, M. I. Semyonova, D. I. Alekseev; JSC “NIIEFA”; decision to application No. 2020133574/07 (061327).
2. **Kotomin, A. A.** Empiricheskie metody raschyota vzryvchatyx veshhestv i kompozicij [Empirical calculation method of explosives and compositions] [Text] / A. A. Kotomin, S. A. Duшенок, A. S. Kozlov. – St. Petersburg : Lan Publ., 2020. – 384 p.
3. **Dubnov, L. V.** Promyshlennye vzryvchatye veshhestva [Text] / L. V. Dubnov, N. S. Baxarevich, A. I. Romanov. – 3-e izdanie dopolnennoe i pererabotannoe [Industrial explosives]. – М. : Nedra Publ., 1988. – 188 p.
4. **Rabotnov, Yu. N.** Sopotivlenie materialov [Strength of materials] [Text]. – М. : Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury' Publ., 1962. – 456 p.
5. **Feodosev, V. I.** Sopotivlenie materialov: uchebник [Text]. – Izdanie desyatoe pererabotannoe i dopolnennoe, [Strength of materials]. – М. : Bauman University Publ., 1999. – 592 p.

6. Landau, L. D. Teoriya uprugosti [Text] / L. D. Landau, E. M. Livshicz. – М. : Nauka Publ., 1987. – Т. 7 [Linear elasticity]. – 259 p.
7. Zababaxin, E. I. Yavleniya neogranichennoj kumulyacii [Phenomena of unbounded cumulation] [Text] / E. I. Zababaxin, I. E. Zababaxin. – М. : Nauka Publ., 1988. 163 p.
8. Zababaxin, E. I. Kumulyaciya i neustojchivost' [Cumulation and instability] [Text]. – Snezhinsk : VNIITF Publ., 1998.
9. Deribas, A. A. Metanie metallicheskih plastin tangencial'noj detonacionnoj volnoj [Text] // Applied mechanics and technical physics. – 2000. – Т. 41, No. 5. [Throwing metal plates with a tangential detonation wave].
10. Fizikavzryva [Text] : v 2 t. / L. P. Orlenko (pod redakciej). – Izd. 3-e pererabotannoe i dopolnennoe, [Explosion physics]. – М. : FIZMATLIT Publ., 2002.
11. Cole, R. H. Underwater explosions [Text]. – 1948. – 439p.
12. ANSYS, license No. 668315.

1-12

ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТОНКИХ ПЛАСТИН

А. К. Музыря

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: A.K.muzyrya@vniitf.ru

В практике исследования ударно-волновых процессов используется широкий набор нагружающих устройств. В их число входят разнообразные системы, использующие энергию взрыва. Удар ускоренной взрывом пластиной создает в мишени импульс, характеризующийся следующими параметрами. Длительность импульса составляет $\tau = 2h/c$, где h – толщина пластины; c – скорость звука в ее материале. Давление на контактной границе зависит от скорости пластины и соотношения акустических жесткостей пластины и мишени.

Определенный интерес в практических приложениях вызывают импульсы короткой длительности и их действие на мишень. Однако нагружение ударом тонких пластин сопряжено с рядом проблем:

- обеспечение необходимого диапазона скоростей;
- устойчивость их движения;
- целостность пластины в процессе ускорения, полета и удара по мишени;
- сохранение формы пластины и приемлемая одновременность удара по площади мишени.

В представленной работе экспериментально изучены прикладные возможности системы взрывного метания в широком диапазоне отношения удельных масс пластины и взрывчатого вещества (0,2–6).

Полученная зависимость скорости от отношения удельных масс в диапазоне 0,5–2,30 км/с сравнивается с аналитическим решением для одномерного случая и результатами других авторов. Отмечается удовлетворительная корреляция. В поисках границы

устойчивости полета пластины ее толщина уменьшалась от 0,5 мм до 0,1 мм. Пластина 0,5 мм движется устойчиво, сохраняет свою форму. Удар такой пластиной по преграде характеризуется одновременностью не более $0,2 \pm 0,01$ мкс по полю 40×40 мм. В случае пластины 0,1 мм полет неустойчивый. Этот эффект исследователи связывают с влиянием рэлей-тейлоровской неустойчивости на ускорение плоского слоя твердого вещества. Сохранение сплошности пластины к моменту удара по образцу определялось по качеству отпечатка на медном приемнике. Композиция ВВ + стальная пластина толщиной 0,5 мм в режиме скользящей детонации обеспечивает устойчивое движение пластины, ее целостность и приемлемую одновременность удара по мишени.

HIGH-VELOCITY MOTION OF THIN PLATES

А. К. Музыря

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: A.K.muzyrya@vniitf.ru

In studying shock wave processes a wide range of loading devices is commonly used. They include various systems using explosive energy. When a plate accelerated by the explosion strikes a target, it creates a pulse within the target having the following parameters. The pulse duration is $\tau = 2h/c$, where h is the plate thickness, and c is the speed of sound in the material. The interface pressure depends on the plate velocity and on the ratio of acoustic stiffnesses of the plate and the target.

Short-duration pulses and their effect on the target are of particular interest for practical applications. However, the impact loading of the thin plates is associated with such challenges as:

- Ensuring required velocity range;
- Ensuring stable motion of thin plates;
- Ensuring plate integrity during plate acceleration and flight, and on impact of the plate over the target; and
- Preserving the plate shape and achieving acceptable asynchronicity of the impact over the target area.

The work is devoted to the experimental study of applied capabilities of the explosive throwing system in a wide range of ratios of specific masses of the plate and the explosive (0.2 to 6).

The obtained dependency of the velocity on specific masses ratio within 0.5 to 2.30 km/s is compared to the analytical solution for one-dimensional case and to the results obtained by other authors. A satisfactory correlation is highlighted. We reduced the plate thickness from 0.5 down to 0.1 mm seeking for the plate flight stability limits. The plate 0.5 mm thick is characterized by a stable flight and preserves its shape. When such plate strikes the barrier, the asynchronicity of the impact does not exceed 0.2 ± 0.01 μ s over the area 40×40 mm. The flight of the plate 0.1 mm thick is unstable. The researchers correlate this effect with the influence of Rayleigh–Taylor instability on the acceleration of a flat layer of the solid. Preserving the plate integrity by the moment when the plate strikes the specimen was determined through the quality

of the impression into the copper target. The composition explosive + steel plate 0.5 mm thick in the sliding detonation mode ensures stable flight of the plate, its integrity, and acceptable synchronicity of the impact over the target.

1-13

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КРИТИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ ПРОНИКАНИЯ КС ИЗ ЧУГУНА В ПРЕГРАДУ ИЗ ЧУГУНА

А. Г. Нескин, А. Н. Зеленев

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Статья посвящена экспериментальному исследованию проникания кумулятивной струи (далее КС) из чугуна в преграду из чугуна. Целью исследований являлось определение критической скорости проникания КС в преграду с плотностью, равной плотности струи. Поскольку, как известно, при равных плотностях кумулятивной струи и преграды критическая скорость проникания равна половине скорости КС [1]. Экспериментальные результаты исследований позволили определить критическую скорость проникания кумулятивной струи из чугуна для зарядов массой 9,0 г и 10,5 г и оценить плотность КС из чугуна, ее длину и энергетическую составляющую КС.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF CRITICAL VELOCITY OF SCJ PENETRATION FROM CAST-IRON INTO CAST-IRON BARRIER

A. G. Neskin, A. N. Zelenov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

The work is devoted to experimentally study penetration of shaped charge jet (SCJ) from cast-iron into a cast-iron barrier. The objective was to determine critical velocity of SCJ penetration into a barrier of a density equal to the jet density. It is known that critical penetration velocity is equal to half a SCJ velocity at equivalent densities of shaped charge jet and barrier [1]. The experimental results allowed determining critical velocity of cast-iron SCJ penetration for charges 9.0 g and 10.5 g and evaluating cast-iron SCJ density, length, and energetic component.

1-14

ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА НА МАССУ ИНЖЕКТИРУЕМОЙ ПЫЛИ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ ПЫЛЕНИИ

К. В. Новосёлов¹, К. А. Тен¹,
Э. Р. Прууэл¹, Е. Б. Смирнов²

¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, Россия

²Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Исследования воздействия ударно-волнового нагружения на различные материалы выявили эффект, известный как пыление. Суть этого эффекта заключается в образовании потока (облака) из микро- и наночастиц при выходе сильной ударной волны на свободную поверхность. При взаимодействии волны разрежения с шероховатостями поверхности материала развиваются неустойчивости, приводящие к формированию микроструй, распадающихся в пылевой поток. Экспериментальные исследования разреженного скоростного пылевого потока представляют собой сложную научно-техническую проблему.

В работе представлены результаты экспериментального исследования пылевого потока, формирующегося от специально нанесенных прямолинейных канавок разной глубины. С использованием методики синхротронного излучения были проведены эксперименты по измерению рентгеновской тени от потока частиц, инжектируемых со свободной поверхности оловянных образцов, имеющих разную шероховатость (от 5 до 82 мкм). По полученным данным была проведена калибровка и расчет интегральной массы пыли, вылетевшей с одной канавки. Была проверена оценочная модель, по которой считается, что масса инжектируемой со свободной поверхности пыли примерно равна массе вещества, соответствующего объему канавки свободной поверхности материала. Показано хорошее соответствие эксперименту.

INFLUENCE OF METAL SURFACE ROUGHNESS ON THE MASS OF EJECTED DUST DURING SHOCK-WAVE EJECTION

K. V. Novosyolov¹, K. A. Ten¹,
E. R. Prueel¹, E. B. Smirnov²

¹Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Siberian Branch of
the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

²Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

Investigations of the effect of shock wave loading on various materials reveal the effect known as dusting. The essence of this effect is the formation of a stream (cloud) of micro- and nanoparticles when a strong shock wave emerges on a free surface. When the rarefaction wave interacts with the

surface roughness of the material, instabilities develop, leading to the formation of microjets that decay into a dust flow (ejecta). Experimental studies of a rarefied high-speed dust flow represent a complex scientific and technical problem.

The paper presents the results of an experimental study of an ejecta formed from specially applied rectangular grooves of different depths. Using the synchrotron radiation technique, experiments were carried out to measure the X-ray shadow from the flux of particles ejected from the free surface of tin samples with different roughness (from 5 to 82 μm). The data obtained were used to calibrate and calculate the integral mass of dust escaping from one groove. An evaluation model was tested, according to which it is considered that the mass of dust ejected from the free surface is approximately equal to the mass of the substance corresponding to the volume of the groove of the free surface of the material. Good agreement with experiment is shown.

1-15

СТРУКТУРА И ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ СТОЛБЧАТЫХ КОГЕРЕНТНЫХ ВИХРЕЙ В ТРЕХМЕРНОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ

Л. Л. Огородников¹, С. С. Вергелес^{1,2}

¹Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

²Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН, Черноголовка, Россия

Уравнению Навье–Стокса, главному уравнению гидродинамики, скоро исполнится 200 лет [1]. Однако до сих пор его решение для многих экспериментально наблюдаемых систем и практически важных задач [2] затруднительно, если потоки характеризуются большим числом Рейнольдса. В последние десятилетия точность регистрации скорости потока резко возросла за счет технологических достижений в оптических системах. Кроме того, увеличилась мощность компьютеров, что сделало возможным проведение массового моделирования уравнения Навье–Стокса [3–4]. Все это помогло создать почву для построения теории двумерных когерентных вихрей, что было сделано в последние несколько лет [5]. Одним из следующих достижений статистической гидродинамики могут быть результаты предлагаемого исследования – статистической теории трехмерных когерентных вихрей в жидкости. Такие вихри наблюдаются как в природе, так и в искусственном эксперименте [6].

Когерентные вихри – статистически устойчивые образования. В двумерном потоке такие вихри компенсируют потерю энергии из-за трения, связанного непосредственно с мелкомасштабными флуктуациями [5]. Стоит отметить, что в двумерных и трехмерных потоках передача энергии между крупномасштабными вихрями и пульсациями происходит по-разному [7]. В частности, в двумерном когерентном вихре

мелкомасштабные флуктуации, возбуждаемые внешними случайными силами, передают кинетическую энергию вихрю. В то время как в трехмерном потоке энергия передается от крупномасштабного сдвигового течения к мелкомасштабным флуктуациям. Модель двумерного потока в ряде случаев представляет собой упрощенное представление трехмерного потока, в котором третья компонента скорости подавлена. Однако подавление третьей компоненты скорости может быть вызвано вращением и не иметь отношения к геометрическому механизму. Теорема Прудмана–Тейлора утверждает [8], что при большом числе Россби скорость потока перестает изменяться вдоль оси вращения из-за действия сил Кориолиса. В результате потоки в удаленных от центра плоскостях и в третьем направлении разделяются.

Широко известным примером такого потока является торнадо [9]. Похожие течения реализуются также в жидком внешнем ядре Земли и других астрономических объектов [10]. Поэтому изучение когерентных вихрей имеет существенное практическое применение для решения задач, связанных с предсказанием погоды и различных природных явлений.

В данной работе трехмерное движение исследуется на фоне сильного вращения и слабого сдвигового потока. Представлено описание эволюции слабых пульсаций скорости в крупномасштабном сдвиговом течении вращающейся жидкости, а также исследование их пространственных корреляций. Посчитаны пространственные одновременные корреляции различных компонент флуктуирующей части поля скорости на различных масштабах и в различных направлениях. Существенная часть результатов, связанных со структурой вихря, представлена в [11].

Литература

1. **Landau, L. D.** Theoretical physics. Hydrodynamics [Text] / L. D. Landau, E. M. Lifshitz // FIZMATLIT. – 2001. – Vol. VI.
2. **Saffman, P. G.** Two-Dimensional Problems in Hydrodynamics and Aerodynamics [Text] // Journal of the Franklin Institute. – 1966. – 281 (1). – P. 78–79. ISSN 0016-0032.
3. **Donzis, Diego A.** et al. Vorticity moments in four numerical simulations of the 3D Navier–Stokes equations [Text] // Journal of fluid mechanics. – 2013. – Vol. 732. – P. 316–331.
4. **Subich, Christopher J.** Simulation of the Navier–Stokes equations in three dimensions with a spectral collocation method [Text] / Christopher J. Subich, Kevin G. Lamb and Marek Stasna [Text] // Int. J. Numer. Meth. Fluids. – 2013; 73:103–129.
5. **Kolokolov, I.** Structure of coherent vortices generated by the inverse cascade of two dimensional turbulence in a finite box [Text] / I. Kolokolov, V. Lebedev / Physical Review E. – 2016. – 93(3), 033104.
6. **Orlov, A. V.** Large-scale coherent vortex formation in two dimensional turbulence [Text] / A. V. Orlov, M. Y. Brazhnikov, A. A. Levchenko // JETP Letters. – 2018. – 107(3). – P. 157–162.
7. **Kraichnan, R. H.** Small-Scale Structure of a Scalar Field Convected by Turbulence [Text] // The Physics of Fluids. – 1968. – P. 11, 5.
8. **Proudman, J.** On the motion of solids in a liquid possessing vorticity [Text] / Proc. R. Soc. Lond. – 1916, July 1. – A. 92: 408–424.

9. **Staley, D. O.** Hydrodynamic instability of Small Eddies in Tornado Vortex [Text] / D. O. Staley and R. L. Gall // Journal of the Atmospheric Sciences. – 1983. – Vol. 41. – P. 3.
10. **Schubert, G.** Treatise on geophysics [Text] // Volume 8, Core dynamics (2nd edition). – Elsevier. – 2015.
11. **Kolokolov, I. V.** Structure of coherent columnar vortices in three-dimensional rotating turbulent flow / I. V. Kolokolov, L. L. Ogorodnikov, S. S. Vergeles. // Physical Review Fluids. – 2020. – Vol. 5. – No. 3. – P. 034604.

STRUCTURE AND SPATIAL CORRELATIONS OF COLUMN COHERENT VORTEX IN A THREE-DIMENSIONAL ROTATING TURBULENT FLOW

L. L. Ogorodnikov¹, S. S. Vergeles^{1,2}

¹National Research University Higher School of Economics,
Physics Department, Moscow, Russia

²Landau Institute for Theoretical Physics RAS,
Chernogolovka, Russia

The Navier–Stokes equation, the main equation of hydrodynamics, will soon be 200 years old [1]. However, until now, its solution for many experimentally observed systems and practically important problems [2] is difficult if the flows are characterized by a large Reynolds number. In recent decades, the accuracy of measurement the flow velocity has increased dramatically due to technological advances in optical systems. In addition, the power of computers has increased, which made it possible to carry out mass modeling of the Navier–Stokes equation [3, 4]. All this helped to create the ground for the construction of the theory of two-dimensional coherent vortices, which has been done in the last few years [5]. One of the next advances in statistical hydrodynamics can be the results of the proposed research – the statistical theory of three-dimensional coherent vortices in a fluid. Such eddies are observed both in nature and in artificial experiments [6].

Coherent vortices are statistically stable formations. In a two-dimensional flow, such vortices compensate for the loss of energy due to friction associated directly with small-scale fluctuations [5]. It should be noted that in two-dimensional and three-dimensional flows, the transfer of energy between large-scale eddies and pulsations occurs in different ways [7]. In particular, in a two-dimensional coherent vortex, small-scale fluctuations excited by external random forces transfer kinetic energy to the vortex. Whereas in a three-dimensional flow, energy is transferred from large-scale shear flow to small-scale fluctuations. A two-dimensional flow model in some cases is a simplified representation of a three-dimensional flow, in which the third velocity component is suppressed. However, the suppression of the third velocity component can be caused by rotation and not related to the geometric mechanism. The Proudman–Taylor theorem states [8] that for a large Rossby number, the flow velocity ceases to change along the axis of rotation due to the action of Coriolis forces. As a result, the flows in the planes remote from the center and in the third direction are separated.

A well-known example of such a flow is a tornado [9]. Similar flows are also realized in the liquid outer core of

the Earth and other astronomical objects [10]. Therefore, the study of coherent vortices has significant practical application for solving problems associated with predicting weather and various natural phenomena.

In this paper, three-dimensional motion is investigated against the background of strong rotation and weak shear flow. The investigation of the evolution of weak velocity fluctuations in a large-scale shear flow of a rotating fluid is presented, as well as a study of their spatial correlations. The spatial simultaneous correlations of various components of the fluctuating part of the velocity field on different scales and in different directions are calculated. A significant part of the results related to the vortex structure are presented in [11].

References

1. **Landau, L. D.** Theoretical physics. Hydrodynamics [Text] / L. D. Landau, E. M. Lifshitz // FIZMATLIT. – 2001. – Vol. VI.
2. **Saffman, P. G.** Two-Dimensional Problems in Hydrodynamics and Aerodynamics [Text] // Journal of the Franklin Institute. – 1966. – 281 (1). – P. 78–79. ISSN 0016-0032.
3. **Donzis, Diego A.** et al. Vorticity moments in four numerical simulations of the 3D Navier–Stokes equations [Text] // Journal of fluid mechanics. – 2013. – Vol. 732. – P. 316–331.
4. **Subich, Christopher J.** Simulation of the Navier-Stokes equations in three dimensions with a spectral collocation method [Text] / Christopher J. Subich, Kevin G. Lamb and Marek Stasna [Text] // Int. J. Numer. Meth. Fluids. – 2013; 73:103–129.
5. **Kolokolov, I.** Structure of coherent vortices generated by the inverse cascade of two dimensional turbulence in a finite box [Text] / I. Kolokolov, V. Lebedev / Physical Review E. – 2016. – 93(3), 033104.
6. **Orlov, A. V.** Large-scale coherent vortex formation in two dimensional turbulence [Text] / A. V. Orlov, M. Y. Brazhnikov, A. A. Levchenko // JETP Letters. – 2018. – 107(3). – P. 157–162.
7. **Kraichnan, R. H.** Small-Scale Structure of a Scalar Field Conected by Turbulence [Text] // The Physics of Fluids. – 1968. – P. 11, 5.
8. **Proudman, J.** On the motion of solids in a liquid possessing vorticity [Text] / Proc. R. Soc. Lond. – 1916, July 1. – A. 92: 408–424.
9. **Staley, D. O.** Hydrodynamic instability of Small Eddies in Tornado Vortex [Text] / D. O. Staley and R. L. Gall // Journal of the Atmospheric Sciences. – 1983. – Vol. 41. – P. 3.
10. **Schubert, G.** Treatise on geophysics [Text] // Volume 8, Core dynamics (2nd edition). – Elsevier. – 2015.
11. **Kolokolov, I. V.** Structure of coherent columnar vortices in three-dimensional rotating turbulent flow / I. V. Kolokolov, L. L. Ogorodnikov, S. S. Vergeles. // Physical Review Fluids. – 2020. – Vol. 5. – No. 3. – P. 034604.

1-16

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВУМЕРНЫХ АВТОМОДЕЛЬНЫХ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА

Е. И. Понькин^{1,2}, С. П. Баутин¹

¹Снежинский физико-технический институт
Национального исследовательского ядерного университета
«МИФИ», Снежинск, Россия

²ФГУП ПО «Маяк», Озёрск, Россия

E-mail: spbautin@mail.ru, epnk@rambler.ru

Рассматривается двумерное истечение политропного газа в вакуум с косою стенки, а также сильное сжатие призматических объемов газа. Для системы уравнений газовой динамики ставятся соответствующие начально-краевые задачи, которые являются характеристическими задачами Коши стандартного вида [1]. Решения этих задач строятся в виде сходящихся рядов по степеням переменной ϑ для искомого газодинамических параметров c , u , v – скорости звука и проекций вектора скорости газа на декартовы оси [2]. Здесь ϑ – известная функция переменных x/t , y/t , задающая звуковую характеристику, разделяющую искомое течение и центрированную волну Римана [2]. Нахождение в явном виде неизвестных коэффициентов рядов c_i , u_i , v_i ($i \geq 1$) для искомого функций сводится к нахождению в явном виде решения транспортного уравнения, задающего коэффициент c_1 .

Имеет место частный случай, когда выполняется условие согласования: $\operatorname{tg} 2\alpha = (\gamma + 1)/(3 - \gamma)$, где γ – показатель политропы газа; α – угол наклона косою стенки в случае истечения в вакуум или в задачах сжатия – угол наклона одной из сторон у призматического объема [3]. В этом, согласованном случае коэффициенты c_1 , u_1 , v_1 задаются линейными функциями от независимых переменных x/t , y/t , а остальные коэффициенты c_i , u_i , v_i ($i \geq 2$) равны нулю. То есть искомое решение системы уравнений газовой динамики в согласованном случае линейно относительно независимых переменных [2]. В согласованном случае в задаче об истечении газа в вакуум в явном виде определены все газодинамические параметры и свободная граница, разделяющая газ и вакуум. В задаче о сжатии газа показано, что возможно неограниченное сжатие газа при воздействии непроницаемых сжимающих газ поршней с различными законами движения и исследованы газодинамические параметры течения. В частности выявлено сильно неравномерное распределение давления при обжатии таких призматических мишеней.

В несогласованном случае решение транспортного уравнения – искомый коэффициент c_1 , выписан в квадратурах. А в двух частных случаях $\gamma = 3$ (продукты взрыва) и $\gamma = 5/3$ (водород) коэффициент c_1 найден в явном виде и является аналитической функцией. В этих двух случаях и все остальные коэффициенты: u_1 , v_1 , c_i , u_i , v_i ($i \geq 2$) записываются в явном виде.

Использование начального отрезка ряда в этих случаях позволило приближенно построить соответствующие течения газа. Для задачи об истечении газа в вакуум определены свободные поверхности, раз-

деляющие двумерное течение и вакуум. Для задачи о сжатии газа эти приближенные решения так же, как и в согласованном случае, передают сильно неравномерное распределение давления при обжатии соответствующих призматических мишеней. В случае, когда $\alpha = \pi/3$ построенное решение моделирует течение газа при сильном сжатии мишени, являющейся в начальный момент времени замкнутым равнобедренным треугольником.

Литература

1. Баутин, С. П. Характеристическая задачи Коши и ее приложения в газовой динамике [Текст]. – Новосибирск : Наука, 2009. – 368 с.
2. Баутин, С. П. Автомодельные решения задачи об истечении политропного газа в вакуум с косою стенки [Текст] / С. П. Баутин, Е. И. Понькин // Прикладная механика и техническая физика. – 2021. – Т. 62, № 1. – С. 32–42.
3. Сучков, В. А. Истечение газа в вакуум на косою стенке [Текст] // Прикладная математика и механика. – 1963. – Т. 27, № 4. – С. 739–740.

USE OF TWO-DIMENSIONAL AUTOMODELED GAS FLOWS

Е. И. Pon'kin^{1,2} and S. P. Bautin¹

¹Snezhinsk Institute of Physics and Technology, National
Research Nuclear University «MEPhI», Snezhinsk, Russia

²Federal State Unitary Enterprise “Mayak Production
Association” State Enterprise “Rosatom”, Ozyorsk, Russia

E-mail: spbautin@mail.ru, epnk@rambler.ru

A two-dimensional outflow of a polytropic gas into vacuum from an oblique wall is considered, as well as a strong compression of prismatic gas volumes. For the system of equations of gas dynamics, the corresponding initial-boundary value problems are posed, which are characteristic Cauchy problems of the standard form [1]. Solutions to these problems are constructed in the form of converging series in powers of the variable ϑ for the sought gas-dynamic parameters c , u , v – the speed of sound and the projections of the gas velocity vector on the Cartesian axes [2]. Here ϑ is the well-known function of the variables x/t , y/t , giving the sound characteristic that separates the desired flow and the centered Riemann wave [2]. Finding in an explicit form the unknown coefficients of the series c_i , u_i , v_i ($i \geq 1$) for the required functions is reduced to finding in an explicit form the solution of the transport equation that sets the coefficient c_1 .

There is a special case when the matching condition is met: $\operatorname{tg} 2\alpha = (\gamma + 1)/(3 - \gamma)$, γ – where is the gas polytropic index; α – the angle of inclination of the oblique wall in the case of outflow into vacuum or in compression problems – the angle of inclination of one of the sides of the prismatic volume [3]. In this consistent case, the coefficients c_1 , u_1 , v_1 are given by linear functions of independent variables x/t , y/t , and the remaining coefficients c_i , u_i , v_i ($i \geq 2$) are equal to zero. That is, the desired solution to the system of equations of gas dynamics in the consistent case is linear with respect to independent variables [2]. In the agreed case, in the problem of gas outflow into

vacuum, all gas-dynamic parameters and the free boundary separating the gas and vacuum are determined explicitly. In the problem of gas compression, it is shown that unlimited gas compression is possible under the action of impermeable pistons compressing the gas with different laws of motion, and the gas-dynamic parameters of the flow are investigated. In particular, a strongly uneven pressure distribution was revealed during the compression of such prismatic targets.

In the inconsistent case, the solution to the transport equation – the desired coefficient c_1 – is written in quadratures. And in two special cases $\gamma = 3$ (explosion products) and $\gamma = 5/3$ (hydrogen) the coefficient is found explicitly and is an analytical function. In these two cases, all other coefficients: u_i, v_i, c_i, u_i, v_i ($i \geq 2$) are written explicitly.

The use of the initial segment of the series in these cases made it possible to approximately construct the corresponding gas flows. For the problem of gas outflow into vacuum, free surfaces separating the two-dimensional flow and vacuum are determined. For the problem of gas compression, these approximate solutions, as in the matched case, convey a highly nonuniform pressure distribution during the compression of the corresponding prismatic targets. In the case when $\alpha = \pi/3$ the constructed solution simulates the gas flow under strong compression of the target, which at the initial moment of time is a closed equilateral triangle.

References

1. **Bautin, S. P.** Characteristic Cauchy Problem and Its Applications in Gas Dynamics [Text]. – Nauka, Novosibirsk, 2009. [in Russian].
2. **Bautin, S. P.** Self-similar solutions of the problem of polytropic gas flow along an oblique wall into vacuum / S. P. Bautin, E. I. Pon'kin / Prikl. Mech. Tekh. Fiz. – 63 (1), 32–42 (2021) [J. Appl. Mech. and Tech. Phys. 62 (1), 27–37 (2021)].
3. **Suchkov, V. A.** Flow into a Vacuum along an Oblique Wall / Prikl. Mat. Mekh. – 27 (4), 739–740 (1963) [J. Appl. Math. Mech. 27 (4), 1132–1134 (1963)].

1-17

РЕГИСТРАЦИЯ ПЫЛЕВОГО ОБЛАКА МЕТОДАМИ СИ, ЛГМ И ПЬЕЗОДАТЧИКАМИ

К. А. Тен¹, Э. Р. Прууэл¹, А. О. Кашкаров¹,
И. А. Рубцов¹, Д. В. Петров², А. Ю. Гармашев²,
Е. Б. Смирнов², Д. П. Кучко², В. В. Малев²,
Д. В. Мухин², А. Е. Ширококов², С. А. Фефилов²,
А. Ю. Фёдоров², Л. И. Шехтман³,
В. В. Жуланов³, Б. П. Толочко⁴

¹Институт гидродинамики имени М. А. Лаврентьева
СО РАН, Новосибирск, Россия

²Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

³Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, Россия

⁴Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,
Новосибирск, Россия

E-mail: kten276@gmail.com

При сильном ускорении металлов впереди поверхности появляется облако микрочастиц (пылевое облако). В работах [1, 2] проводилось его исследование с помощью синхротронного излучения (СИ) на ускорительном комплексе ВЭПП-3 – ВЭПП -4 (г. Новосибирск).

Традиционно регистрация потока частиц с ударно-нагруженного металлов проводится при помощи скоростной рентгенографии, пьезодатчиками и, в последние годы, также еще многоканальным лазерным гетеродинным измерителем скорости (ЛГМ, PDV).

Использование пьезодатчиков нашло широкое применение благодаря доступности и простоты получения информации о динамических потоках микрочастиц. Из недостатков можно отметить отсутствие динамической калибровки, большая ошибка в определении массы пыли на начальном этапе и невозможность определения размеров частиц в облаке. Лазерные методики ЛГМ сильно развиваются в последние годы. Растет число измерительных каналов. Получаемый спектр измеренных скоростей методом ЛГМ связан как с разбросом скоростей самих частиц, так и их отражательной способности. Поэтому обе эти методики желательно использовать совместно с другими методиками, которые могут оценить массу и скорости потоков. Использование скоростной радиографии СИ (мягкий рентген, 100 кадров, 124 нс между кадрами) является идеальным дополнением к ним. Одновременное использование современных методик позволило не только измерить распределение массы вдоль облака, но и значительно увеличить достоверность измеряемых величин.

В 2020–2021 годах на ускорителе ВЭПП-3 были проведены первые успешные экспериментальные исследования пылевого облака при выходе ударной волны на свободную поверхность металла. В экспериментах синхронно использовались три методики.

- Скоростная рентгенография с использованием синхротронного излучения ускорительного комплекса ВЭППЗ.

- Лазерная многоканальная гетеродинная методика измерения скорости (ЛГМ, PDV).

- Измерение давления потока с использованием пьезокерамических датчиков.

В докладе приводятся сравнения результатов измерений, их обсуждения и выводы.

Литература

1. **Тен, К. А.** Регистрация выброса частиц из ударно-нагруженных металлов методами СИ [Текст] / К. А. Тен, Э. Р. Прууэл, А. О. Кашкаров, и др. // ФГВ. – 2018. – Т. 54, № 5. – С. 103–111.
2. **Тен, К.** Experimental Study of Ejection of Particles from Shock-Loaded Metals [Text] / K. Ten, E. Prueel, A. Kashkarov, et al. // Fundamentals of 31st International Symposium on Shock Waves. – Springer, Switzerland. – 2019. – P. 953–959. ISBN 978-3-319-91019-2, ISBN 978-3-319-91020-8 (eBook) <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91020-8>.

DETECTION OF EJECTA CLOUD BY SYNCHROTRON RADIATION, PDV AND PIEZO-ELECTRIC SENSORS

K. A. Ten¹, E. R. Prueel¹, A. O. Kashkarov¹,
I. A. Rubtsov¹, D. V. Petrov², A. Yu. Garmashev²,
E. B. Smirnov², D. P. Kuchko², V. V. Malev²,
D. V. Mukhin², A. E. Shirobokov², S. A. Fefilov²,
A. Yu. Fedorov², L. I. Shekhtman³,
V. V. Zhulanov³, B. P. Tolochko⁴

¹Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, SB RAS,
Novosibirsk, Russia

²Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

³Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS,
Novosibirsk, Russia

⁴Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry, SB
RAS, Novosibirsk, Russia
E-mail: kten276@gmail.com

When metals are accelerated to high speeds, a cloud of microparticles, or an ejecta cloud, appears ahead of the surface. This phenomenon was studied in [1, 2] using synchrotron radiation (SR) from the VEPP-3/VEPP-4 collider facility (Novosibirsk).

It is common practice to detect a flow of particles ejected from shock-loaded metals using high-speed radiography, piezo-electric sensors, and, in recent years, the multi-channel photon Doppler velocimeter (PDV).

The piezo-electric sensors are widely used due to their availability and the ease of acquiring data on the dynamic flows of microparticles. The absence of dynamic calibration function, low accuracy in ejecta mass determination at the initial stage, and inability to determine the size of particles inside the cloud could be mentioned as their drawbacks. As for the PDV methods, they have been developed greatly in recent years. The number of measuring channels continues to grow. The PDV velocity spectrum deals with the spread in velocities of the particles, as well as with their reflectivity. It is thus desirable that both these techniques be combined with some other methods that allow us to determine the mass and velocity of flows. And the high-speed radiography using synchrotron radiation (soft spectrum of radiation, 100 frames with a 124-ns interval between frames) is a perfect complementary variant. When used together, these up-to-date techniques make it possible not only to measure mass distribution along the cloud but also to significantly increase credibility of measured quantities.

In 2020–2021, first-ever successful experiments were performed at the VEPP-3 facility to study ejecta cloud at shock wave arrival to the free surface of metal. In these experiments, three different techniques were used simultaneously. They are:

- High-speed radiography using synchrotron radiation from the VEPP-3 facility;
- Multi-channel photon Doppler velocimetry (PDV);
- Flow pressure measurement using piezo-ceramic sensors.

The paper compares and discusses results of the measurements and draws the conclusions.

References

1. Ten, K. A. Detection of Particle Ejection from Shock-Loaded Metals by Synchrotron Radiation Methods [Text] / K. A. Ten, E. R. Prueel, A. O. Kashkarov et al. // Combustion, Explosion, and Shock Waves (Fizika goreniya i vzryva), – 2018. – Vol. 54, # 5. – P. 103–111
2. Ten, K. Experimental Study of Ejection of Particles from Shock-Loaded Metals [Text] / K. Ten, E. Prueel, A. Kashkarov et al. // Fundamentals of 31st International Symposium on Shock Waves. Editors: Akihiro Sasoh, Toshiyuki Aoki, Masahide Katayama. Springer, Switzerland, 2019, P. – 953-959. ISBN 978-3-319-91019-2, ISBN 978-3-319-91020-8 (eBook) <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91020-8>,

1-18

МОДИФИКАЦИИ ($k-\epsilon$)-МОДЕЛИ ДЛЯ ДВУМЕРНЫХ УДАРНОВОЛНОВЫХ ТЕЧЕНИЙ

Ю. В. Третьяченко, А. Р. Гужова,
В. П. Стаценко, Ю. В. Янилкин

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

E-mail: yuvtryachenko@vniief.ru

Феноменологические модели турбулентности нашли широкое применение при описании разнообразных течений. Наиболее распространенная среди них – ($k-\epsilon$)-модель, которая отличается относительной простотой и не требует значительных машинных ресурсов. При этом в [1] для модели удалось подобрать единый набор констант, позволяющий удовлетворительно описывать широкий класс турбулентных течений.

Корректное описание порождения турбулентности на ударной волне (УВ) представляет собой сложную проблему для феноменологических моделей. Данный вопрос рассматривался в ряде работ.

В настоящей работе исследуется вопрос о генерации турбулентности в ($k-\epsilon$)-модели турбулентного перемешивания [1] при прохождении УВ. На основе такого анализа предложены модификации генерационных членов ($k-\epsilon$)-модели. По этой методике для нескольких тестовых задач проведено исследование развития турбулентности на границе раздела двух различных газов при прохождении УВ. Отметим, что все указанные эксперименты промоделированы по методике ЭГАК с ($k-\epsilon$)-моделью без изменения подобранных ранее констант модели, и эти результаты являются содержанием данной работы.

Литература

1. Гужова, А. Р. Уточнение констант ($k-\epsilon$)-модели турбулентности на основе результатов прямого численного моделирования простейших турбулентных течений и измерений [Текст] / А. Р. Гужова, А. С. Павлушин, В. П. Стаценко // ВАНТ: сер. ТПФ. – 2005. – Вып. 3. – С. 37–48.

THE (k - ϵ)-MODEL MODIFICATIONS FOR TWO-DIMENSIONAL SHOCK-WAVE FLOWS

Yu. V. Tretyachenko, A. R. Gughova,
V. P. Statsenko, Yu. V. Yanilkin

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific
Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

E-mail: yuvtretyachenko@vniief.ru

Phenomenological models of turbulence are widely used for describing various flows. One of the most popular of them is the (k - ϵ)-model that differs in relative simplicity and does not require significant computational resources. At the same time, in [1] for this model, it was possible to select a unified set of constants that satisfactorily describes a wide class of turbulent flows.

It is a difficult problem to define correctly the generation of turbulence on a shock wave (SW) for such phenomenological models. This issue has been considered in a number of works.

In a present work, we investigate the question of turbulence generation during the passage of a SW for the (k - ϵ)-model of turbulent mixing [1]. Based on this analysis, modifications of the generation terms of the (k - ϵ)-model are proposed. Using this technique, a study of the development of turbulence at the interface of two different gases during the passage of the SW was carried out for several test problems. Note that experiments were simulated using an EGAK code with the (k - ϵ)-model without changing the previously selected model constants and these results are the content of this work.

References

1. Gughova, A. R. Refining the Constants of the (k - ϵ) Turbulence model on the Basis of Results of Direct Numerical Simulation of the Simplest Turbulent Flows and Measurements [Text] / A. R. Gughova, A. S. Pavlunin, and V. P. Statsenko // *Vopr. Atom. Nauki Tekh.: Ser. Teor. Prikl. Fiz.* – 2005. – 3, 37–48.

1-19

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА ПОРОШКА ВОЛЬФРАМОВЫХ ЧАСТИЦ, МЕТАЕМЫХ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

А. С. Туманик¹, К. А. Тен¹, Э. Р. Прууэл¹,
Е. Б. Смирнов², Д. П. Кучко², А. Е. Ширококов²

¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, Россия

²Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забахина,
Снежинск, Россия

В работе проведено исследование формирования и распространения потока частиц вольфрама метаемых свободной поверхностью металла при выходе на нее ударной волны. Порошок вольфрамовых частиц с известными размерами предварительно наносился на свободную поверхность метаемой пластины.

Внимание уделено взаимной калибровке ряда экспериментальных методик одновременно используемых для исследования потока в одном эксперименте.

Скоростное рентгенографирование с использованием синхротронного излучения позволило определить среднюю плотность пылевого потока, его скорость и скорость смещения тестовых фольг, подвергаемых воздействию пылевого потока. Для этого использовался ускорительный комплекс ВЭППЗ Института ядерной физики СО РАН.

Лазерной гетеродинной методикой определялась скорость свободной поверхности, мечущей частицы вольфрама, самого пылевого облака и скорость смещения фольг. Использовались фольги из алюминия, тантала и кварца. Проведено сравнение скоростей смещения фольг с результатами скоростного рентгенографирования.

Дополнительно в исследуемый поток устанавливались пьезокерамические датчики давления, определяющие динамический напор в пылевом потоке. Проведено сравнение с данными скоростного рентгенографирования.

Одновременное использование трех разных методик позволило провести их взаимную калибровку.

INVESTIGATION OF THE PARAMETERS OF THE POWDER FLOW OF TUNGSTEN PARTICLES EJECTED BY A SHOCK WAVE

A. S. Tumanik¹, K. A. Ten¹, E. R. Prueel¹,
E. B. Smirnov², D. P. Kuchko², A. E. Shirobokov²

¹Federal State Institution of Science M. A. Lavrentiev Institute
of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian
Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

²Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

The paper studies the formation and propagation of a stream of tungsten particles ejected by a free metal surface when a shock wave enters it. The powder of tungsten particles with known dimensions was previously applied to the free surface of the thrown plate.

Attention is paid to the mutual calibration of a number of experimental techniques simultaneously used to study the flow in one experiment.

High-speed radiography using synchrotron radiation made it possible to determine the average density of the dust flow (ejecta), its velocity and the displacement rate of test foils exposed to the dust flow. For this purpose, the VEPP3 accelerator complex of the Institute of Nuclear Physics SB RAS was used.

The laser heterodyne technique was used to determine the velocity of the free surface, the scattering tungsten particles, the dust cloud itself, and the mixing rate of the foils. Foils made of aluminum, tantalum and quartz were used. The displacement rates of foils are compared with the results of high-speed radiography.

Additionally, piezoceramic pressure sensors were installed in the studied flow, which determine the dynamic pressure in the dust flow. A comparison with the data of high-speed radiography is carried out.

The simultaneous use of three different methods made it possible to carry out their mutual calibration.

1-20

КРИТИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

А. Я. Учаев, Е. В. Кошелева, Н. И. Сельченкова

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

E-mail: otd@expd.vniief.ru

Работа посвящена установлению общих закономерностей динамических деструктивных процессов (динамического разрушения и диспергирования), протекающих в металлах при высокоинтенсивном внешнем воздействии в динамическом диапазоне неравновесных состояний $t \sim 10^{-6} \div 3 \cdot 10^{-10}$ с.

Установлены количественные характеристики кинетических процессов, которые являются откликом системы на внешнее воздействие. Определены фрактальная размерность, показатель Херста диссипативных структур – продуктов диспергирования, гидродинамических мод, кластеров центров разрушения.

Диссипативные структуры обладают свойством самоподобия [1, 2]. Самоподобие диссипативных структур является следствием самоорганизации в неравновесных системах; кинетика процессов динамического разрушения и диспергирования демонстрирует примеры масштабно-инвариантного поведения [3, 4].

Масштабная инвариантность возникающих диссипативных структур указывает на то, что неравновесная система достигла критического состояния.

Также признаком того, что система находится в критическом состоянии является обращение в бесконечность сжимаемости (восприимчивости) χ , $\chi \sim K^{-1}$, K – упругий модуль [5].

Используя парный потенциал кристаллической решетки определено выражение для сжимаемости (восприимчивости) нагружаемого образца, которая зависит от плотности центров разрушения.

Проведено численное моделирование процессов диспергирования, возникающих при воздействии импульсов релятивистских электронов на металлические образцы с нанесенными возмущениями в виде пирамидок, с использованием неструктурированных многогранных лагранжевых сеток ТИМ-3D [6] и двумерной лагранжево-эйлеровой расчетной методики [7]; проведено численное моделирование процесса динамического разрушения тонких металлических фольг при воздействии импульсов релятивистских электронов с использованием расчетной методики ТИМ-2D [8].

Предлагаемая методология исследования высокоинтенсивных динамических деструктивных процессов основана на подходе, который позволяет изучать количественные характеристики кинетических

процессов, являющихся откликом неравновесных систем на внешнее воздействие, что и позволяет прогнозировать поведение неисследованных металлических образцов различной геометрии в экстремальных условиях.

Литература

1. **Илькаев, Р. И.** Временные закономерности процесса динамического разрушения металлов, обусловленные иерархическими свойствами диссипативных структур – каскада центров разрушения [Текст] / Р. И. Илькаев, В. Т. Пунин, А. Я. Учаев, С. А. Новиков, Е. В. Кошелева, Л. А. Платонова, Н. И. Сельченкова, Н. А. Юкина // ДАН. – 2003. – Т. 393, № 3. – С. 326–331.
2. **Кошелева, Е. В.** Общие закономерности иерархических релаксационных процессов в металлах при воздействии импульсов проникающих излучений: монография [Текст] / Е. В. Кошелева, В. Т. Пунин, Н. И. Сельченкова, А. Я. Учаев. – Саров : РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2015. – 211 с.
3. **Кошелева, Е. В.** Динамические деструктивные процессы – аналоги критических явлений в металлических образцах различной геометрии в широких диапазонах амплитудно-временных характеристик внешнего воздействия [Текст] / Е. В. Кошелева, Н. И. Сельченкова, С. С. Соколов, И. Р. Трунин, А. Я. Учаев // Научно-технический семинар «Конструкционные материалы активных зон быстрых и термоядерных реакторов-2019» («КОМАЗ-2019») ВНИИИМ. – 2019. – С. 4–5.
4. **Кошелева, Е. В.** О критическом поведении динамических систем при высокоинтенсивном воздействии [Текст] / Е. В. Кошелева, Н. И. Сельченкова, С. С. Соколов, И. Р. Трунин, А. Я. Учаев. – Международная конференция «XXII Харитоновские тематические научные чтения. Суперкомпьютерное моделирование и искусственный интеллект». – Саров : РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2021. – С. 70–72.
5. **Стенли, Г.** Фазовые переходы и критические явления [Текст]. – М. : Наука, 1973. – 419 с.
6. **Соколов, С.С.** Методика ТИМ расчета трехмерных задач механики сплошных сред на неструктурированных многогранных лагранжевых сетках [Текст] / С. С. Соколов, А. И. Панов, А. А. Воропинов, И. Г. Новиков и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. матем. моделирование физ. процессов. – 2005. – Вып. 3. – С. 37–52.
7. **Янилкин, Ю. В.** Комплекс программ ЭГАЗ для расчетов двумерных течений многокомпонентной среды [Текст] / Ю. В. Янилкин, А. А. Шанин, Н. П. Ковалев и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. матем. моделирование физ. процессов. – 1993. – Вып. 4. – С. 69–75.
8. **Соколов, С. С.** Методика ТИМ-2D для расчета задач механики сплошной среды на нерегулярных многоугольных сетках с произвольным количеством связей в узлах [Текст] / С. С. Соколов, А. А. Воропинов, И. Г. Новиков и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. матем. моделирование физ. процессов. – 2006. – Вып. 4. – С. 29–43.

CRITICAL BEHAVIOR OF DYNAMIC SYSTEMS AT HIGH-INTENSE ACTION

A. Ya. Uchaev, E. V. Kosheleva, N. I. Sel'chenkova

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific
Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

E-mail: otd@expd.vniief.ru

The paper is dedicated to establishing of common regularities of dynamic destructive processes (dynamic failure and dispersion), passing in metals at high-intense external action in the dynamic range of non-equilibrium states $t \sim 10^{-6} \div 3 \cdot 10^{-10}$ s.

Specification of quantity of kinetics processes is determined. They are system's response to the external action. There were specified fractal dimensionality, Hearst index of dissipative structures – dispersion products, hydrodynamic oscillations, failure centers clusters.

Dissipative structures possess a self-similarity property [1, 2]. Self-similarity of dissipative structures is a consequence of self-organization in non-equilibrium systems; dynamic failure processes' kinetics and dispersion demonstrate examples of scale-invariant behavior [3, 4].

Scale invariance of originating dissipative structures points out to the fact that non-equilibrium system has approached a critical state.

Also the evidence that the system is in a critical state, is conversion the compressibility (receptivity) χ into infinity, $\chi \sim K^{-1}$, K – elastic module [5].

Using a pair potential of crystal lattice, there was specified an expression for compressibility (receptivity) of the loaded sample, depending on the density of failure centers.

There was carried out a numerical modeling of dispersion processes, appearing at relativistic electron pulse effects up on metal samples with applied perturbations in the form of pyramids, using an irregular Lagrange technique TIM-3D [6] and two-dimensional Lagrangian–Eulerian calculation procedure [7]; numerical modeling of the dynamic failure process of thin metallic foils under the action of relativistic electron pulses using TIM 2 calculation procedure [8] was performed.

The proposed methodology to study high-intense dynamic destructive processes is based on the approach, which permits to investigate specification of quantity of kinetics processes, being a response of non-equilibrium systems to external action, what allows behavior prediction of unstudied different geometry metal samples under extreme conditions.

References

1. **И'каев, Р. И.** Time regularities of the dynamic metals' failure process, conditioned by hierarchy properties of dissipative structures – failure center cascades [Text] / R. I. И'каев, V. T. Punin, A. Ya. Uchaev, S. A. Novikov, E. V. Kosheleva, L. A. Platonova, N. I. Sel'chenkova, N. A. Yukina // RAN. – 2003. – Vol. 393, No. 3. – P. 326–331.
2. **Kosheleva, E. V.** Common regularities of hierarchy relaxation processes in metals under the action of penetrating radiation pulses: monograph [Text] / E. V. Kosheleva, V. T. Punin, N. I. Sel'chenkova, A. Ya. Uchaev. – Sarov RFNC – VNIIEF, 2015. – 211 p.
3. **Kosheleva, E. V.** Dynamic destructive processes–analogous critical phenomena in various geometry metal samples in wide ranges of amplitude-time characteristic for external action [Text] / E. V. Kosheleva, N. I. Sel'chenkova, S. S. Sokolov, I. R. Trunin, A. Ya. Uchaev // Scientific-and-technical workshop “Constructional materials of fast and thermo-nuclear reactors-cores-2019” (“KOMAZ-2019”) VNIINM. 2019. – P. 4–5.
4. **Kosheleva, E. V.** On critical behavior of dynamic systems at high-intense action [Text] / E. V. Kosheleva, N. I. Sel'chenkova, S. S. Sokolov, I. R. Trunin, A. Ya. Uchaev. International conference “XXII Khariton scientific talks. Supercomputer simulations and artificial intelligence”. – Sarov : RFNC – VNIIEF, 2021. – P. 70–72.
5. **Stanly, G.** Phase transitions and critical phenomena [Text]. – M. : Nauka, 1973. – 419 p.
6. **Sokolov, S. S.** The procedure of TIM calculation of three-dimensional problems of mechanics of continuaon irregular Lagrange nets [Text] / S. S. Sokolov, A. I. Panov, A. A. Voropinov, I. G. Novikov et al. // Vopr. Atomn. Nauki i Tekhn. Ser. Mathem. Model. FyzikProtc. – 2005. –Vol. 3. – P. 37–52.
7. **Yanilkin, Yu. V.** EGAK software complex for calculations of two-dimensional flows of multicomponent medium [Text] / Yu. V. Yanilkin, A. A. Shanin, N. P. Kovalev et al. // Vopr. Atomn. Nauki i Tekhn. Ser. Mathem. Model. FyzikProtc. – 1993. – Vol. 4. – P. 69–75.
8. **Sokolov, S. S.** ProcedureTIM-2D for calculation of mechanics problems of continuum on irregular nets with arbitrary amount of bounds in nods [Text] / S. S. Sokolov, A. A. Voropinov, I. G. Novikov et al. // Vopr. Atomn. Nauki i Tekhn. Ser. Mathem. Model. FyzikProtc. – 2006. –Issue 4. – P. 29–43.

1-21

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПОТОКОВ МИКРОЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРАМ И СКОРОСТЯМ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ГОЛОГРАФИИ

А. В. Федосеев, М. В. Антипов, А. Н. Подувалов,
В. А. Огородников, А. В. Блинов,
А. А. Утенков, О. Б. Согрина

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия
E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

В последнее время интенсивно исследуется процесс ударно-индуцированного выброса частиц с поверхности металлов при выходе на нее УВ. Наиболее интересными и малоисследованными характеристиками этого процесса являются распределения частиц по скоростям и размерам. Использование теневого методов фоторегистрации не позволяет получить такие данные о потоке частиц в целом из-за ограничений, связанных с глубиной резкости тневых изображений микрочастиц ($\leq 0,5$ мм) и небольшого поля обзора ($\sim 4 \times 4$ мм) при больших увеличениях. Голографический метод позволяет устранить эти недостатки. В проводимых исследованиях потоки частиц создавали при помощи электровзрыва проволок или ударно-волновым нагружением свинцовых образцов. Голографическую регистрацию проводили при помощи разработанного в ИФВ мобильного регистратора с использованием метода осевой голографии Фраунгофера. В качестве

регистрирующей среды использовали КМОП матрицу или голографические пластины. Восстановление изображений, записанных на голограммах, проводили на стационарной части макета голографического комплекса с использованием аналоговых или численных методов. В докладе в качестве результатов исследований представлены примеры голографической регистрации ударно-индуцированных пылевых потоков частиц с размерами от 4 мкм и более, движущихся со скоростями от 0,1 до 2,0 км/с, при этом поперечный размер регистрируемой области достигал $\varnothing 19$ мм, а глубина регистрации была около 20 мм.

EXPERIMENTAL CONFIRMATION OF POSSIBILITY FOR RECORDING DISTRIBUTION OF SHOCK-INDUCED FLOWS OF MICROPARTICLES IN SIZES AND VELOCITIES BY THE PULSE HOLOGRAPHY METHOD

A. V. Fedoseev, M. V. Antipov, A. N. Poduvalov,
V. A. Ogorodnikov, A. V. Blinov,
A. A. Utenkov, O. B. Sogrina

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific
Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

Recently process of shock-induced ejection of particles from a metals surface at an exit on it shock wave is intensively investigated. The most interesting and slightly researched characteristics of this process are distributions of the particles in speeds and sizes. A shadow methods use of photo registration don't permit to obtain such data a particles flow as a whole because of the restrictions coupled with the depth of shadow images sharpness of a micro particles ($\leq 0,5$ mm) and a little field of vision ($\sim 4 \times 4$ mm) at the great magnifications. The holographic method allows to eliminate these lacks. In carried out researches the particles flow created by wires electric explosion or shock-wave loaded lead samples. The holographic registration made by means of developed in IPE the mobile device using in-line Fraunhofer holography method. For the registering environment used a CMOS matrix or holographic plates. Restoration of the images which have been written down on holograms realized on a stationary part of a breadboard model of a holographic complex using analogue or numerical methods. In the report as results of the researches are presented holographic images examples of the shock-induced "dust" flows of particles with the sizes from 4 μm and more, moving with speeds from 0,1 to 2,0 km/s, thus the cross-section size of registered area reached $\varnothing 19$ mm and depth of registration was about 20 mm.

1-22

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ПЫЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

A. В. Фёдоров, С. А. Финюшин, Е. А. Чудаков,
Д. А. Калашников, И. С. Гнатов, А. О. Яговкин

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

С помощью лазерных интерферометрических методов проведены экспериментальные исследования параметров пыления свинца, олова, меди и других металлов при их ударноволновом нагружении в широком диапазоне давлений. Метод PDV позволяет регистрировать скорость свободной поверхности, поле скоростей и удельную массу потока частиц, определять размер частиц по их торможению в газовой среде.

В большинстве экспериментов регистрировались скорость поверхности и, с помощью индикаторных фольг и тонких стекол, удельная масса пылевого потока. Построены зависимости распределения удельной массы частиц от времени и относительной скорости. Проанализировано влияние шероховатости и фазового состояния вещества после ударно-волнового нагружения на возможности регистрации скорости свободной поверхности и определения удельной массы выброшенных частиц. Показано, что при заданной шероховатости поверхности удельная масса пыли, выбрасываемая с поверхности при ударно-волновом плавлении исследуемых металлов, существенно больше, чем для образца, находящегося в твердом состоянии. Для полированных образцов при достижении порогового давления, соответствующего плавлению вещества, происходит резкое увеличение массы выбрасываемых частиц. С помощью этого эффекта определена величина начала плавления ряда металлов на волне разгрузки после их ударно-волнового нагружения.

Исследовалась также динамика движения частиц металлов в газовых средах. Для определения характерного размера частиц использовался закон их торможения в газах. Для исследуемых металлов определены характерные размеры частиц и фрагментов. Размер частиц в каждом конкретном случае определяется источником пыления (материал, шероховатость, фазовое состояние и т. п.).

APPLICATION OF LASER INTERFEROMETRIC METHODS FOR STUDYING OF EJECTION PARAMETERS OF SHOCK LOADED METALS

A. V. Fedorov, S. A. Finyushin, E. A. Chudakov,
D. A. Kalashnikov, I. S. Gnatov, A. O. Yagovkin

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific
Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

By using laser interferometric methods, experimental studies of the ejection parameters of lead, tin, copper and

other metals were carried out at their shock-wave loading in a wide pressure range. The PDV method makes it possible to register the free surface velocity, the velocity field and the specific weight of a particle flow, and to determine the particle sizes by their deceleration in a gaseous medium.

In most experiments, the surface velocity and the specific weight of a particle flow were recorded with the help of indicator foils and thin glasses. The time dependences of distribution of the particle specific weight and the relative velocity were plotted. The authors analyzed the effect of the roughness and the substance phase state after shock loading on the possibility of recording the free surface velocity and determining the specific weight of ejected particles. It was shown that when the surface roughness is specified, the specific weight of particles ejected from the surface at shock melting of test metals is significantly higher than the specific weight of a solid sample. The mass of ejected particles increases rapidly for polished samples when the threshold pressure is reached that corresponds to the substance melting. With the help of this effect, the onset value of melting under unloading was determined for a number of metals after their shock loading.

The dynamics of metal particles in gaseous media was also studied. To determine a characteristic size of particles, the law of their deceleration in gases was used. The characteristic sizes of particles and fragments were defined for test metals. The particle size in each specific case is determined by the source of ejection (material, roughness, phase state, etc.).

симметрии схождения и потеря устойчивости, полное схождение, начальная стадия разлета, разлет.

Во всех оболочках наблюдается радиальное изменение структуры и микротвердости, связанное с повышением степени деформации и температуры по мере приближения к оси схождения. В структуре поперечных сечений цилиндров, полученных из больших оболочек, обнаружено три кольцевые зоны. В меди это зоны деформации, рекристаллизации и плавления; в стали наличие трех зон обусловлено не только деформацией, но и $\alpha \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha$ и $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ циклами превращений.

Схождение оболочек большего диаметра в целом более устойчиво. Схождение оболочек меньшего диаметра менее устойчиво, закономерная локализованная деформация имеет место на всех радиусах, однако вид течений изменяется по мере приближения к оси фокусировки. Локализация вблизи поверхности обусловлена сдвиговыми напряжениями, но значительная ширина полос сдвига и наличие изгибной составляющей деформации приводит к дуговой (волнообразной) форме наблюдаемых на поверхности возмущений.

Показано, что процесс схождения медных оболочек малого диаметра можно разделить на четыре стадии. Сначала в исходной оболочке под действием ударной волны образуется зона откольных повреждений. Поры и трещины откольного происхождения располагаются в средней части по толщине оболочки. При дальнейшем инерционном схождении происходит высокоскоростная деформация меди. Оболочка становится толще, поэтому зона откольных явлений расширяется. Поры и трещины залечиваются при деформации, при этом формируется средняя зона хаотической деформации. Внутренняя и наружная поверхности оболочки теряют форму круга, возникают выступы и вмятины, происходит гофрирование. Число выступов, формирующихся на поверхности оболочки при схождении (следствие гофрирования стенок при компактировании) увеличивается при увеличении мощности заряда. При этом теряется устойчивость гладкого фронта деформации. В местах вмятин образуются полосы локализованной деформации, расположенные под углом 45 градусов к поверхности. Далее потеря устойчивости фронта деформации «усиливается», на внутренней поверхности оболочки возникают выбросы – пластические струи. На последней стадии схождения выбросы сливаются, но сохраняются границы их соприкосновения, похожие на трещины. Вследствие этого в центральной части цилиндра деформационная картина имеет вид цветка. Таким образом, потеря устойчивости фронта радиальной деформации осуществляется по двум структурным механизмам – деформационному и гидродинамическому. В центре «цветка» вследствие высокой скорости деформации температура повышается до температуры рекристаллизации меди, $\sim 500^\circ\text{C}$, а при высокоскоростном захлопывании откольных пор в малых локальных областях температура плавления меди, 1083°C .

Обнаружено, что осевая деформация оболочек, нагруженных скользящей детонационной волной с интенсивностью, немного превышающей необходимую

1-23

СХОЖДЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЗРЫВА

А. Э. Хейфец¹, В. И. Зельдович¹, Н. Ю. Фролова¹,
А. А. Дегтярев², Е. В. Шорохов²,
Е. Б. Смирнов², С. М. Долгих²

¹Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

²Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забахина,
Снежинск, Россия

E-mail: kheifetz@imp.uran.ru

Цилиндрические оболочки из меди и стали диаметром от 48 до 130 мм окружали слоем взрывчатого вещества (ВВ). Возбуждение детонационной волны в ВВ осуществляли с торца оболочки с помощью кольцевой системы инициирования. В результате взрыва вдоль боковой поверхности оболочек распространялась скользящая детонационная волна, под действием которой происходило схождение оболочки к оси симметрии. Интенсивность нагружения изменяли за счет изменения толщины слоя ВВ. По мере увеличения мощности заряда последовательно наблюдались: неполное схождение, нарушение

для полного схождения, неоднородна и носит периодический (пульсирующий) характер. Области полного схождения и разлета чередуются с интервалом несколько десятков миллиметров.

Электронно-микроскопические исследования были проведены на оборудовании ЦКП «Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов» ИФМ УрО РАН.

Работа выполнена в рамках государственной программы по теме «Структура» No. АААА-А18-118020190116-6).

CONVERGENCE OF METAL CYLINDRICAL SHELLS UNDER EXPLOSION

A. E. Kheyfets¹, V. I. Zeldovich¹, N. Yu. Frolova¹,
A. A. Degtyarev², E. V. Shorokhov²,
E. B. Smirnov², S. M. Dolgikh²

¹M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

²Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: kheifetz@imp.uran.ru

Cylindrical shells of copper and steel with a diameter of 48 to 130 mm were surrounded by a layer of explosives. The detonation wave in the explosive was initiated from the end of the shell using an annular initiation system. As a result of the explosion, a sliding detonation wave propagated along the lateral surface of the shells, under the action of which the shell converged to the axis of symmetry. The loading intensity was changed by changing the thickness of the explosive layer. As the charge power increased, the following were consistently observed: incomplete convergence, violation of convergence symmetry and loss of stability, complete convergence, the initial stage of expansion, destruction.

In all shells, a radial change in the structure and microhardness is observed, associated with an increase in the degree of deformation and temperature as it approaches the convergence axis. Three annular zones were found in the structure of the cross-sections of the cylinders obtained from the massive shells. In copper, these are zones of deformation, recrystallization and melting; in steel, the presence of three zones is due not only to deformation, but also $\alpha \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha$ and $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ transformation cycles.

The convergence of larger diameter shells is generally more stable. The convergence of shells with a smaller diameter is less stable, localized deformation occurs at all radii, but the form of flows changes as they approach the focusing axis. Localization near the surface is due to shear stresses, but the significant width of the shear bands and the presence of the flexural component of deformation lead to an arc (wavy) shape of the disturbances observed on the surface.

It is shown that the process of convergence of small diameter copper shells can be divided into four stages. First, a zone of spall damage is formed in the initial shell under the action of the shock wave. Pores and cracks of spall origin are located in the middle part of the shell thickness. With further inertial convergence, high-speed deforma-

tion of copper occurs. The shell becomes thicker, so the zone of spalling phenomena expands. Pores and cracks are healed during deformation, while a middle zone of chaotic deformation is formed. The inner and outer surfaces of the shell lose their circular shape, protrusions and dents appear, and corrugation occurs. The number of protrusions formed on the surface of the shells during convergence (a consequence of the corrugation of the walls during compaction) increases with an increase in the charge power. In this case, the stability of the smooth deformation front is lost. In places of dents, localized deformation bands are formed, located at an angle of 45 degrees to the surface. Further, the loss of stability of the deformation front “increases”, on the inner surface of the shell there are ejections – plastic jets. At the last stage of convergence, the outliers merge, but the boundaries of their contact remain, similar to cracks. As a result, in the central part of the cylinder, the deformation pattern looks like a flower. Thus, the loss of stability of the front of radial deformation occurs by two structural mechanisms – deformation and hydrodynamic. In the center of the “flower”, due to the high rate of deformation, the temperature rises to the temperature of copper recrystallization, $\sim 500^\circ\text{C}$, and at high-speed collapse of the spall pores in small local areas, it exceeds 1083°C (copper melting point).

It was found that the axial deformation of the shells loaded with a sliding detonation wave with an intensity slightly exceeding that required for complete convergence is inhomogeneous and has a periodic (pulsating) character. The areas of complete convergence and expansion alternate with an interval of several tens of millimeters.

Electron microscopic studies were carried out on the equipment of the Center for Collective Use “Testing Center for Nanotechnologies and Advanced Materials” of the IPM Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

The work was performed within the framework of the state program on the topic “Structure” No. АААА-А18-118020190116-6).

1-24

ПЛАНЫ ПО МОДЕРНИЗАЦИИ ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ С ГРАНИЧНОЙ ЭНЕРГИЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ ДО 2 МэВ

А. О. Черница¹, И. А. Карачинский¹,
П. А. Колесников¹, О. А. Никитин¹,
Д. А. Старостенко², Д. А. Никифоров², Я. В. Куленко²,
П. А. Бак², О. А. Павлов²

¹Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²ФГБУН Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера
СО РАН, Новосибирск, Россия

В РФЯЦ – ВНИИТФ в 2011 г. введена в эксплуатацию рентгенографическая установка на базе линейного индукционного ускорителя (ЛИУ). ЛИУ использу-

ется для исследования динамически развивающихся объектов при взрывном нагружении. В ходе опытной эксплуатации ЛИУ были отработаны различные узлы ускорителя и выявлены недостатки.

Для повышения надежности работы ускорителя и информативности получаемых результатов принято решение провести модернизацию системы импульсного питания, системы транспортировки пучка, индукторной системы.

В докладе рассмотрены выявленные недостатки, пути их устранения, представлены этапы модернизации ЛИУ, внедрение новых решений по обеспечению стабильности работы ускорителя.

**PLANS ON UPGRADING
THE LINEAR-INDUCTION ACCELERATOR
WITH THE ELECTRON BOUNDARY ENERGY
OF UP TO 2 MeV**

A. O. Chernitsa¹, I. A. Karachinsky¹, P. A. Kolesnikov¹,
O. A. Nikitin¹, D. A. Starostenko², D. A. Nikiforov²,
Ya. V. Kulenko², P. A. Bak², O. A. Pavlov²

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

²Budker Institute of Nuclear Physics Siberian Branch of RAS,
Novosibirsk, Russia

In 2011, RFNC – VNIITF put into operation a radiography facility based on linear-induction accelerator (LIA). The LIA is applied to study dynamically evolving objects under explosive loading. In the course of the LIA pilot operation, various accelerator assemblies were worked-up, and the shortcomings were revealed.

To improve accelerator operation reliability and information value of the obtained results, it has been decided to upgrade the pulsed power system, the beam transport system, and the inductor system.

In the work, the revealed shortcomings are analyzed, and paths to eliminate them are considered. The work presents the stages of the LIA upgrade, and describes new solutions to be implemented to ensure accelerator stable operation.

1-25

**РЕГИСТРАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ
УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ПЫЛЕВОГО
ПОТОКА С ПОМОЩЬЮ ОДНОВРЕМЕННОГО
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ ГЕТЕРОДИН-
ИНТЕРФЕРОМЕТРА И ЛАЗЕРНОГО
ДАЛЬНОМЕРА**

Е. А. Чудаков, С. А. Финюшин, А. В. Фёдоров,
Д. А. Калашников, И. С. Гнутов,
И. В. Шмелев, Е. А. Разумков

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

Лазерные доплеровские измерители скорости, основанные на методе гетеродин-интерферометра (PDV), позволяют в непрерывном режиме регистрировать скорость отражающей поверхности, а также спектр скоростей микрокумулятивных струй и пылевых потоков, выбрасываемых со свободной поверхности при ее ударно-волновом нагружении и последующей разгрузке. При этом величина перемещения объектов попадающих в пятно зондирующего луча рассчитывается путем интегрирования экспериментальных зависимостей скорости от времени. Однако указанный способ получения информации о перемещении является косвенным и зачастую бывает неприменим. Для интегрирования необходимо наличие однозначной непрерывной зависимости скорости от времени, которая зачастую отсутствует в условиях интенсивного «пыления» исследуемой поверхности, ее возможного плавления или разрушения на сдвиговых деформациях. Обойти указанные ограничения можно посредством дополнения гетеродинных измерений прямой регистрацией в опыте величины перемещения отражающей поверхности с помощью лазерного дальномера.

В настоящей работе представлены результаты серии экспериментов по одновременной лазерной диагностике скорости и перемещения свободной поверхности и пылевых потоков при ударно-волновом нагружении образцов из стали, меди и свинца. Продемонстрирована эффективность комбинированных измерений, показана согласованность данных, полученных с помощью двух методик. Для стального образца зарегистрированы несколько треков скорости (со значениями $W \approx 1,12 \div 1,31$ км/с) соответствующие движению отдельных откольных слоев, максимальное удаление которых от свободной поверхности составило $\Delta x \approx 2,5$ мм. В опыте со свинцом зарегистрирован спектр скоростей, характерный для расплавленного состояния материала, максимальная толщина пылевого потока при этом составила $\sim 2,2$ мм.

**REGISTRATION OF THE PARAMETERS
OF A SHOCK-INDUCED EJECTA
WITH THE SIMULTANEOUS USE
OF THE METHODS OF A HETERODYN
INTERFEROMETER AND A BROADBAND
LASER RANGE**

E. A. Chudakov, S. A. Finyushin, A. V. Fedorov,
D. A. Kalashnikov, I. S. Gnutov,
I. V. Shmelev, E. A. Razumkov

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific
Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

Laser Doppler velocity meters based on the heterodyne-interferometer (PDV) method make it possible to continuously record the velocity of the reflecting surface, as well as the velocity spectrum of microcumulative jets and particle fluxes ejected from the free surface during its shock-wave loading and subsequent unloading. In this case, the magnitude of the displacement of objects moving into the spot of the probing beam is calculated by integrating the experimental dependences of the speed on time. However, this method of obtaining information on movement is indirect and often inapplicable. Integration requires the presence of an unambiguous continuous dependence of the velocity on time, which is often absent under conditions of intense ejection of the investigated material, its possible melting or destruction due to shear deformations. It is possible to circumvent these limitations by supplementing heterodyne measurements with direct registration in the experiment of the magnitude of the displacement of the reflecting surface using a laser ranging.

This paper presents the results of a series of experiments on the simultaneous laser diagnostics of the velocity and displacement of the free surface and ejecta fluxes under shock-wave loading of samples of steel, copper, and lead. The efficiency of combined measurements is demonstrated, and the consistency of the data obtained using the two methods is shown. For a steel specimen, several velocity tracks were recorded (with values of $W \approx 1.12 \div 1.31$ km/s) corresponding to the movement of individual spall layers, the maximum distance of which from the free surface was $\Delta x \approx 2.5$ mm. In the experiment with lead, a velocity spectrum characteristic of the molten state of the material was recorded; the maximum thickness of the ejecta flux was ~ 2.2 mm.

1-26

**ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ
С УЧЕТОМ ИСТОРИИ ПРОЦЕССА**

Ю. В. Янилкин, А. Р. Гужова, Л. И. Дегтяренко,
В. Ю. Колобянин, В. А. Шмелёв

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

В работе предложен новый подход к моделированию турбулентного перемешивания. Предпосылки для разработки данного подхода заключаются в том, что в основе метода концентраций [1], алгоритмах анализа и расчета потоков на эйлеровом этапе газодинамики работают математические механизмы, искусственно препятствующие перемешиванию веществ в процессе прямого численного моделирования. Ячейки могут переходить из чистого состояния в смешанное и обратно. Основная идея нового метода – оценить состояние веществ в ячейке по окружающему полю концентраций, далее вещества в ячейке с гомогенной смесью переводятся в новые вещества, которые рассчитываются по специально разработанному алгоритму. Модификация должна обеспечить сохранение истории перемешивания, а именно, чтобы вещества, уже перешедшие в состояние гомогенного смешения, оставались в таком состоянии и в дальнейшем счете. Таким образом, описанный метод позволяет учесть историю процесса перемешивания для определения локальной (в каждой смешанной ячейке) степени гомогенного смешения при прямом численном моделировании турбулентного перемешивания. Алгоритм реализован для случая нескольких исходных компонентов, которые могут переходить в состояние гомогенной смеси.

Предложенный метод верифицирован на задаче о гравитационном перемешивании ($g = -1$, $At = 0,5$) для случая несмешивающихся и смешивающихся веществ. В проведенных расчетах в различных постановках описано автоматическое решение. Величина α_b приведенной координаты проникновения легкого вещества в тяжелое хорошо согласуется с данными других авторов. Это говорит в целом о корректности предложенного подхода с переводом веществ в новое состояние. Расчетные данные по интегральной степени гомогенности для несмешивающихся веществ составили 0,35–0,4, для смешивающихся веществ 0,65–0,9, что качественно согласуется с известными расчетными и экспериментальными данными.

Литература

1. Бахрах, С. М. Расчет газодинамических течений на основе метода концентраций [Текст] / С. М. Бахрах, Ю. П. Глаголева, М. С. Самигулин, В. Д. Фролов, Н. Н. Яненко, Ю. В. Янилкин // ДАН СССР. – 1981. – Т. 276, № 4

DIRECT NUMERICAL SIMULATION OF A TURBULENT MIXING ACCOUNTING THE HISTORY OF THE PROCESS

Yu. V. Yanilkin, A. R. Guzhova, L. I. Dyagterenko,
V. Yu. Kolobyenin, V. A. Shmelyov

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific
Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

A new approach to modeling turbulent mixing is proposed in this paper. The prerequisites for the development of this approach are that the concentration method [1], algorithms for analyzing and calculating flows at the Eulerian stage of gas dynamics are based on mathematical mechanisms that artificially prevent the mixing of substances in the process of direct numerical simulation. Cells can transfer their state from a pure one to mixed and vice versa. The main idea of the new method is to evaluate the state of substances in the cell by the surrounding concentration field, then the substances in the cell with a homogeneous mixture are converted into new substances, which are calculated according to a specially developed algorithm. The modification should ensure that the mixing history is preserved, namely, that substances that have already passed into a state of homogeneous mixing remain in this state in the future account. Thus, the de-

scribed method makes it possible to take into account the history of the mixing process to determine the local (in each mixed cell) degree of homogeneous mixing in direct numerical simulation of turbulent mixing. The algorithm is implemented for the case of several initial components that can transform into a state of a homogeneous mixture.

The proposed method is verified on the problem of gravitational mixing ($g = -1$, $At = 0.5$) for the case of immiscible and miscible substances. In the calculations performed, a self-similar solution is described in different settings. The value α_b of the given coordinate of the penetration of a light substance into a heavy substance agrees well with the data of other authors. This generally indicates the correctness of the proposed approach with the transfer of substances to a new state. The calculated data on the integral degree of homogeneity for immiscible substances were 0.35–0.4, for miscible substances 0.65–0.9, which qualitatively agrees with the known calculated and experimental data.

References

1. **Bakhrakh, S. M.** Simulation of gasdynamic flows using concentration method [Text] / S. M. Bakhrakh, Yu. P. Glagoleva, M. S. Samigulin, V. D. Frolov, N. N. Yanenko, Yu. V. Yanilkin // DAN USSR. – 1981. – Vol. 276, No. 4 (in Russian).

Секция 2

ВЗРЫВНЫЕ И ДЕТОНАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Section 2

EXPLOSION AND DETONATION PHENOMENA

2-1

НОВАЯ МЕТОДИКА АНАЛИЗА ДЕФЕКТНОСТИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И АМОРФНЫХ ВЕЩЕСТВ

Н. А. Алёхина, А. В. Станкевич,
А. Р. Бакиров, Н. П. Тайбинов,
Е. Б. Смирнов, А. Ю. Гармашев

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Степень дефектности является важной характеристикой материалов. В отдельных случаях дефектность определяет место зарождения и направление протекания различных физико-химических процессов. Очевидно, что с физико-математической точки зрения рассмотрение задачи определения дефектности веществ требует разделение вклада дефектов той или иной природы: искажения молекулярного строения, кристаллической структуры, микроморфометрии, компоновки, дисперсности и пористости.

В данной работе предложен оригинальный алгоритм проведения исследований дефектности и физико-математического сопряжения результатов, полученных различными методами: рентгеновской дифрактометрии (монокристалльной и порошковой), газовой адсорбции (пикнометрии и изотермии), малоуглового рентгеновского рассеяния. Результаты исследований представляются в виде разноплотностной характеристики дефектности материалов по шкале монокристалл–порошок–изделие с разделением вклада в потерю плотности для каждого типа искажений.

NEW TECHNIQUE OF ANALYZING DEFECTIVENESS OF CRYSTALLINE AND AMORPHOUS MATTERS

N. A. Alyokhina, A. V. Stankevich, A. R. Bakirov,
N. P. Taibinov, E. B. Smirnov, A. Yu. Garmashev

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

The degree of defectiveness is an important characteristic of materials. In individual cases, the defectiveness determines the place of origin and the direction of various physicochemical processes. It is evident that from physical and mathematical prospective, the problem of determining the defectiveness of matters requires differentiating contributions depending on the nature of a defect: distortion of molecular structure, micromorphometry, arrangement, dispersion, and porosity.

The present work suggests an original algorithm to study defectiveness and physical and mathematical correlation of the results obtained through various techniques: X-ray diffractometry (single-crystal and powder), gas adsorption (pycnometry and isothermy), and low-angle X-ray scattering. The findings are presented as various-density characteristic of material defectiveness according

to the scale single-crystal – powder – product while differentiating contribution of each distortion type into density loss.

2-2

ЭЛЕКТРОИЗОЛИРУЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ МАНГАНИНОВЫХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТА СОПОЛИМЕРА ИЗОДЕЦИЛМЕТАКРИЛАТА И БЕНЗИЛМЕТАКРИЛАТА С ПЛОТНОСТЬЮ 6,8 г/см³

И. М. Антонов¹, Б. П. Толочко^{1,2}, А. В. Варанд^{1,2},
М. А. Михайленко^{1,2}, И. В. Ельцов³,
А. А. Брызгин², Е. Б. Смирнов⁴

¹Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,
Новосибирск, Россия

²Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, Россия

³Новосибирский национальный исследовательский
государственный университет, Новосибирска, Россия

⁴Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: iliya.antonov92@yandex.ru

Целью работы являлось разработка и изготовление образцов непроводящих покрытий на основе композитов с плотностью не менее 6 г/см³ согласно указаниям заказчика. Данные композиты планируются использовать в качестве покрытия датчиков давления.

Сополимер изодецил- и бензилметакрилата, получали методом радиационного инициирования. Мономеры подвергались обработке ускоренными электронами с использованием ускорителя ИЛУ-6 (ИЯФ СО РАН) и далее проводили термическую обработку. Оптимизацией процесса термической обработки удалось добиться получения однородного сополимера (1:1 по моль) с молекулярной массой $M_w \sim 1,7 \cdot 10^6$. У растворов полученного сополимера наблюдается увеличение вязкости при повышении температуры, что характерно для переходов «клубок-цепь» [1].

Композиты получали в растворах сополимера в этилацетате путем постепенного внесения частиц вольфрама с чередованием циклов нагрева-охлаждения.

Частицы вольфрама, получаемого методом взрывзрыва, которые были стабилизированы стеариновой кислотой и представляли собой агломераты. Полученные частицы вольфрама фракционировали. Для получения композитов использовали среднюю фракцию 20–40 мкм, размеры отдельных частиц в которой не превышал 5 мкм.

Получен ряд композитов с плотностью, лежащей в диапазоне 3–6,8 г/см³.

Результаты сканирования полученных покрытий по элементному составу с использованием энергодисперсионного анализатора электронного микроскопа

свидетельствуют об равномерном характере распределения вольфрама для образцов с объемной долей наполнителя более 30%.

Электрофизические исследования показали отсутствие сквозной проводимости у покрытия с расчетной плотностью 6,8 г/см³.

Литература

1. **Birshtein, T. M.** Coil-globule type transitions in polymers.
2. **Theory of coil-globule transition in linear macromolecules [Text] / T. M. Birshstein, V. A. Pryamitsyn // Macromolecules. – 1991. – 24, 7, 1554–1560.**

ELECTRICAL INSULATING COATINGS BASED ON COPOLYMER OF ISODECYL METHACRYLATE AND BENZYL METHACRYLATE WITH W WITH MAXIMUM DENSITY

I. M. Antonov¹, B. P. Tolochko^{1,2}, A. V. Varand^{1,2},
M. A. Mikhailenko^{1,2}, I. V. Eltsov³,
A. A. Bryazgin², E. B. Smirnov⁴

¹Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SB RAS, Novosibirsk, Russia

²Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

³Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

⁴Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: iliya.antonov92@yandex.ru

The aim of the work was to develop and manufacture samples of non-conductive coatings based on composites with a density of at least 6 g/cm³ per client directive. These composites are planned to be used as coatings for pressure sensors.

A copolymer of isodecyl- and benzyl methacrylate was obtained by using the method of radiation initiation. The monomers were treated with accelerated electrons using an ILU-6 accelerator (BINP SB RAS) and then heat treated. By optimizing the heat treatment process, it was possible to obtain a homogeneous copolymer (1:1 mol) with a molecular weight of $M_w \sim 1,7 \cdot 10^6$. In solutions of the obtained copolymer, an increase in viscosity is observed with increasing temperature, which is typical for coil-chain transitions [1].

The composites were produced in solutions of the copolymer in ethyl acetate by the gradual introduction of tungsten particles with alternating heating-cooling cycles.

Particles of tungsten were made by the method of electric explosion. Particles were agglomerates, which were stabilized with stearic acid. The obtained tungsten particles were fractionated. To produce composites, an average fraction of 20–40 μm was used, the size of individual particles in which did not exceed 5 μm.

Due to the absence of direct contact of tungsten particles with air, the composites lack or had an extremely insignificant fraction of tungsten oxide.

A number of composites with a density ranging from 3 to 6.8 g/cm³ have been obtained.

Elemental composition scans of the coatings were carried out using energy-dispersive electron microscope analyzer. The results of scanning indicate a uniform distribution of tungsten for samples with a volume fraction of the filler of more than 30%.

Electrophysical studies have shown the absence of percolation conductivity in the coating with a calculated density of 6.8 g/cm³.

References

1. **Birshtein, T. M.** Coil-globule type transitions in polymers.
2. **Theory of coil-globule transition in linear macromolecules [Text] / T. M. Birshstein, V. A. Pryamitsyn // Macromolecules. – 1991. – 24, 7, 1554–1560.**

2-3

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ И ПОРИСТОСТИ НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВВ ТАТБ

И. А. Ахлюстин, И. Э. Косолапов, К. М. Просвирнин,
К. М. Мирошкин, К. В. Еганов, Ю. А. Беленовский,
Е. Б. Смирнов, А. Ю. Гармашев

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

В работе представлены результаты исследования инициирования, развития и распространения детонации во взрывчатом веществе (ВВ) ТАТБ и влияние на эти процессы дисперсности и пористости кристаллов. Для исследования инициирования детонации в ВВ ТАТБ использовался метод «инертной преграды» (Gap-test). Для исследования развития и распространения детонации использовалась электроконтактная методика, с помощью которой регистрировалось распространение детонации в цилиндрических образцах различного диаметра из ВВ ТАТБ. Также использовался фотохронографический метод для регистрации формы фронта детонационной волны.

В результате исследований установлено, что при одинаковых условиях инициирования процесс развития детонации ВВ завершается после прохождения детонационной волной расстояния 3,5 диаметра ВВ и не зависит от пористости и дисперсности образцов ВВ.

CRYSTAL PARTICLE SIZE AND POROSITY IMPACT ON GAS-DYNAMIC PERFORMANCE OF TATB

I. A. Akhlyustin, I. E. Kosolapov, K. M. Prosvirnin,
K. M. Miroshkin, K. V. Eganov, Yu. A. Belenovskiy,
E. B. Smirnov, A. Yu. Garmashev

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

The work presents the results of the investigation into TATB high explosive (HE) detonation. It considers TATB initiation, development, and propagation as well as the role

of crystal particle size and porosity in these processes. Gap-test technique was used to study detonation initiation in TATB. Electrocontact technique was used to study detonation development and propagation. Detonation propagation in TATB cylindrical samples of various diameters was registered with this technique. Streak photography technique was used to register detonation wavefront shape.

The study showed that under similar initiation conditions HE detonation development process is stopped after the detonation wave reaches the distance of 3.5 HE diameters and it doesn't depend on HE samples porosity and particle size.

2-4

**КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЗРЫВЧАТЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
МОДЕЛЬНЫХ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ
СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ
1,1-ДИАМИНО-2,2-ДИНИТРОЭТИЛЕНА**

А. И. Ахметзянов, В. А. Вирченко
В. Г. Куликов, А. А. Казак

ФГУП «СКТБ «Технолог», Санкт-Петербург, Россия

E-mail: lpfv@bk.ru

Актуальной задачей при разработке новых взрывчатых смесей для специзделий является создание малочувствительных взрывчатых составов (МЧВС).

TATB и термопластичные составы на его основе показывают высокие характеристики безопасности, но по метательному действию МЧВС на основе TATB незначительно превосходят тротил [1]. 1,1-диамино-2,2-динитроэтилен (апрол, FOX-7) по взрывчатому свойству и характеристикам безопасности является одним из перспективных кандидатов для создания термопластичных МЧВС метательного действия [2, 3].

В работе представлены результаты комплексного исследования взрывчатых характеристик и чувствительности к внешним воздействиям семи модельных ВС, содержащих 1,1-диамино-2,2-динитроэтилен и полимерное связующее брутто-состава $C_{5,14}H_{7,5}N_{0,19}O_{1,76}$ ($\rho_0 = 1200 \text{ кг/м}^3$). Содержание полимера в составе менялось от 0% до 20% объемных.

Определены:

- условия прессования ВС;
- прочностные характеристики ВС;
- скорость детонации;
- зависимость скорости детонации от диаметра;
- детонационное давление в плоскости Жуге;
- метательное действие и изоэнтропы продуктов взрыва по методике T-20;
- чувствительность к удару и трению по ГОСТ;
- ударно-волновая чувствительность по барьерной методике;
- пожаробезопасность для одного из составов по методике РФЯЦ – ВНИИТФ.

Полученная информация показала, что на основе 1,1-диамино-2,2-динитроэтилена можно компоно-

вать термопластичный МЧВС, на 10% превышающий по метательному действию состав ПБС и по безопасности находящийся на уровне литого тротила. Несколько полученные характеристики удовлетворяют параметрам безопасного ВС для специзделий требует дальнейшего исследования.

Благодарность. Работа была начата и проводилась благодаря заинтересованности и помощи покойного Б. Г. Лобойко, РФЯЦ – ВНИИТФ.

Литература

1. Dobratz, V. M. The Insensitive High Explosive Triaminotrinitrobenzene (TATB) [Text] : Development and Characterization – 1888 to 1994. – 1995. – Los Alamos, New Mexico. – 132 p.
2. Вирченко, В. А. 1,2-динитроацетамидин – новое мощное низкочувствительное ВВ [Текст] / В. А. Вирченко, В. В. Анискевич, А. П. Егоров, В. Г. Куликов // Актуальные проблемы и перспективы малочувствительных энергетических материалов и изделий пониженного риска. – Дзержинск, 2004.
3. Куликов, В. Г. Методы формирования малочувствительных взрывчатых составов, их анализ и оценка [Текст] : материалы конференции РВСН / В. Г. Куликов, А. И. Ахметзянов, В. А. Вирченко. – Балашиха. – 2018.

**COMPREHENSIVE STUDY OF EXPLOSIVE
CHARACTERISTICS OF MODEL
THERMOPLASTIC COMPOSITIONS BASED
ON 1,1-DIAMINO-2,2-DINITROETHYLENE**

A. I. Akhmetzyanov, V. A. Virchenko,
V. G. Kulikov, A. A. Kazak

FSUE “SKTB “Technolog”, St. Petersburg, Russia

E-mail: lpfv@bk.ru

An urgent task in the development of new explosive mixtures for special products is the creation of low-sensitivity explosive compositions (LSE).

TATB and thermoplastic compositions based on it show high safety characteristics, but in terms of the propellant effect of LSE based on TATB slightly exceed TNT [1]. 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene (APROL, FOX-7) in terms of explosive properties and safety characteristics is one of the promising candidates for creating thermoplastic LSE of propellant action [2, 3].

The paper presents the results of a comprehensive study of the explosive characteristics and sensitivity to external influences of seven model composition containing 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene and a polymer binder of the gross composition $C_{5,14}H_{7,5}N_{0,19}O_{1,76}$ ($\rho_0 = 1200 \text{ kg/m}^3$). The polymer content in the composition varied from 0% to 20% by volume.

The following are defined:

- conditions for pressing explosive;
- strength characteristics of the explosive;
- detonation rate;
- the dependence of the detonation velocity on the diameter;
- detonation pressure in the Jouguet plane;
- propellant action and isentropes of explosion products according to the T-20 method;

- sensitivity to impact and friction according to GOST;
- shock-wave sensitivity according to the barrier method;
- fire safety for one of the compositions according to the methodology of the RFNC – VNIITF.

The information obtained showed that on the basis of 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene, it is possible to compose a thermoplastic LSE that is 10% higher in propellant effect than the composition of PBS and safety level as cast TNT. To what extent the obtained characteristics satisfy the parameters of a safe aircraft for special products requires further research.

Gratitude. The work was started and carried out thanks to the interest and assistance of the late B. G. Loboiko, RFNC – VNIITF.

References

1. **Dobratz, B. M.** The Insensitive High Explosive Triamino-trinitrobenzene (TATB) [Text] : Development and Characterization – 1888 to 1994. – 1995. – Los Alamos, New Mexico. – 132 p.
2. **Virchenko, V. A.** 1,2-dinitroazetidine – new powerful low sensitivity explosive [Text] / V. A. Virchenko, V. V. Anishevich, A. P. Egorov, V. G. Kulikov // Actual problems and prospects of insensitive energetic materials and products of low risk. – Dzerzhinsk, 2004.
3. **Kulikov, V. G.** Methods of formation of low-sensitivity explosive compositions, their analysis and evaluation [Text] : materials of the conference of the Strategic Missile Forces / V. G. Kulikov, A. I. Akhmetzhanov, V. A. Virchenko. – Balashikha, 2018.

2-5

СОСТАВ ПРОДУКТОВ РЕАКЦИЙ МЕДЛЕННОГО ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВЧАТОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В НАНОТЕРМИТАХ CuO/Al, Ni/Al ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОФАЗОВОГО АНАЛИЗА

А. Р. Бакиров¹, А. В. Станкевич^{1,2}, Л. Х. Бадретдинова²,
Р. Н. Валиев¹, Н. П. Тайбинов¹, В. Я. Базотов²

¹Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²Казанский национальный исследовательский
технологический университет, Казань, Россия

Интерес к процессам самораспространяющегося высокотемпературного синтеза обусловлен в первую очередь возможностью получения различных химических соединений и изделий, обладающих уникальным набором свойств: теплоизоляционных, прочностных и электрофизических. Отдельным направлением принято считать нанотермитные смеси, отличающиеся большей химической активностью и, соответственно, большими скоростями протекания химических реакций.

В работе методами рентгенофазового анализа проведены исследования состава продуктов различных реакций взаимодействия компонентов нанотермитных смесей CuO/Al и Ni/Al. Установлено, что направление протекания быстрых (взрывных) реакций смещается в сторону образования элементарных оксидов и интерметаллидов. При снижении скорости реакции образуются более сложные промежуточные продукты структуры перовскитов и шпинелей, а также их смесей.

COMPOSITION OF PRODUCTS OF SLOW COMBUSTION AND EXPLOSIVE TRANSFORMATION REACTIONS IN NANOTHERMITE COMPOSITES CuO/Al, Ni/Al BASED ON X-RAY PHASE ANALYSIS DATA

A. P. Bakirov¹, A. V. Stankevich^{1,2}, L. Kh. Badretdinova²,
R. N. Valiev¹, N. P. Taibinov¹, V. Ya. Bazotov²

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

²Kazan National Research Technological University,
Kazan, Russia

The interest in self-propagating high-temperature synthesis arises primarily from a possibility of producing different chemical compounds and products which possess unique heat-insulating, strength, and electrophysical properties. Nanothermite mixtures distinguished for their high chemical activity and, accordingly, high reaction rates are commonly supposed to be a separate line of research.

The paper presents data on X-ray phase analysis of product compositions in various reactions of interaction between the components of CuO/Al and Ni/Al nanothermite mixtures. It is found that the direction of fast (explosive) reactions is shifted towards the formation of elementary oxides and intermetallics. When the reaction rate is reduced, more complex intermediate products of perovskite and spinel structure, as well as their mixtures are formed.

2-6

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОСТОЙКОСТИ И УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПЛАСТИЗОЛЬНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ КОМПОЗИЦИЙ ФУГАСНОГО ТИПА

И. А. Баталова, Т. В. Антипова, И. А. Ахлюстин,
Ю. А. Беленовский, А. Ю. Гармашев,
К. Э. Косолапов, К. М. Мирошкин,
К. М. Просвирнин, И. В. Чемагина

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

В настоящее время в боеприпасах наибольшее применение получили взрывчатые вещества на основе гексогена и октогена. При высоких показателях

мощности, уровень стойкости данных ВВ к внешним воздействиям не соответствует современным критериям безопасности. О чем свидетельствует ряд аварий, приведших к взрыву боеприпасов, произошедших при хранении и эксплуатации.

Замена в современных ВВ пластизольного типа высокочувствительных октогена и гексогена частично или полностью на низкочувствительное ТАТБ способна кардинальным образом повысить пожаровзрывобезопасность данных ВВ.

В данном докладе представлены результаты исследования трех пластизольных взрывчатых композиций фугасного типа и дана сравнительная оценка термической стойкости и ударно-волновой чувствительности в зависимости от их состава.

В результате проведенных исследований установлено, что использование в составе пластизольных взрывчатых композиций ТАТБ обеспечивает повышение их стойкости к тепловым и ударно-волновым воздействиям.

INVESTIGATING THE THERMAL STABILITY AND SHOCK SENSITIVITY OF PLASTISOL HIGH-EXPLOSIVE COMPOSITIONS

I. A. Batalova, T. V. Antipova, I. A. Akhlyustin,
Yu. A. Belenovsky, A. Yu. Garmashev, K. E. Kosolapov,
K. M. Miroshkin, K. M. Prosvirmin, I. V. Chemagina

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

Today, the RDX- and HMX-based explosives are most widely used in munitions. These are high-yield explosives whose resistance to external stimuli, however, fails to meet up-to-date safety criteria, as is evidenced by several accidents involving weapons initiation during their storage or operation.

Substitution, either in part or in whole, of insensitive TATB for high-sensitivity RDX and HMX used in modern plastisol explosives can lead to dramatic enhancement of their explosion and fire safety.

This paper presents the results of investigating three plastisol high-explosive compositions and compares how both thermal stability and shock sensitivity vary with composition.

The investigation conducted proves that introduction of TATB into plastisol explosive compositions increases their thermal and shock-wave resistance.

2-7

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФЛАГРАЦИИ И ДЕТОНАЦИИ В ВОДОРОД-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ

П. Е. Беляев^{1,2}, И. Р. Макеева^{1,2},
Д. А. Мастюк¹, Е. Е. Пигасов^{1,2}

¹Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²Южно-Уральский государственный университет (НИУ),
Челябинск, Россия

E-mail: belyaevpe@vniitf.ru

Воспламенение и детонация горючих составов давно и широко исследуются как экспериментальными, так и численными методами. Несмотря на несомненную пользу натуральных экспериментов, разносторонность и полноту данных, которые они позволяют собрать, проведение даже маломасштабных экспериментов с горением и детонацией может иметь весьма высокую стоимость, а крупномасштабные эксперименты, зачастую, и вовсе неосуществимы в силу несоизмеримых затрат и высокой опасности. Это приобретает особенную значимость в связи с ростом интереса к теме водородной энергетики и, соответственно, обеспечения ее безопасности.

Ранее была показана высокая точность моделирования ударно-волновых процессов с использованием модифицированного метода Куропатенко [1, 2]. Главной целью модификации было обеспечение возможности моделирования течений реагирующих составов в геометрически сложных расчетных областях. Представленный в [3] подход к моделированию химических превращений, дополненный решателем для жестких систем ОДУ [4], демонстрирует высокую точность при описании реакций окисления водорода. На данный момент, авторам не известно об опубликованных работах, представляющих моделирование течений химически реагирующих сред с использованием метода Куропатенко. Рассматриваемые наборы реакций и их параметры определяются механизмами Матвеева [5] и Бабушка [6].

Работоспособность разработанной модификации метода в части описания течений реагирующей смеси в расчетной области со сложной геометрией была проверена путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными. В работе [7] представлены результаты экспериментов с переходом дефлаграции в детонацию водород-воздушной смеси в ударной трубе с препятствиями. Доля водорода в рассмотренных составах варьировалась в широком диапазоне. Было произведено несколько серий экспериментов с различными расстояниями между перегородками. Сравнение скоростей детонации, полученных в результате моделирования, с полученными в эксперименте скоростями показало хорошее совпадение для серии экспериментов с частым расположением перегородок. Результаты моделирования, как и экспериментальные данные, демонстрируют

существенную зависимость скорости детонации от геометрии расчетной области.

Литература

1. Куропатенко, В. Ф. Модели механики сплошных сред [Текст]. – Челябинск : Челяб. гос. ун-т, 2007. – 303 с.
2. Беляев, П. Е. Адаптация метода Куропатенко для расчета ударных волн в эйлеровых координатах [Текст] / П. Е. Беляев, И. Р. Макеева, Е. Е. Пигасов, Д. А. Мастюк // Вестник ЮУрГУ: сер. Математическое моделирование и программирование (Вестник ЮУрГУ ММП). – 2021. – Т. 14, № 1. – С. 83–96
3. Пигасов, Е. Е. Математическое моделирование адиабатического теплового взрыва для реакции окисления водорода [Текст] / Е. Е. Пигасов, В. К. Рябинин, Ю. М. Ковалев // Вестник ЮУрГУ: сер. Математическое моделирование и программирование. – 2013. – Т. 6, № 3.
4. Gear, C. W. Numerical initial value problems in ordinary differential equations [Text] / Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1971.
5. Матвеев, В. Г. Упрощение механизма горения водорода [Текст] // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. 37.
6. Бабушок, В. И. Структура предела цепочно-теплового самовоспламенения [Текст] / В. И. Бабушок, Т. В. Крахтинова, В. С. Бабкин // Кинетика и катализ. – 1984. – Т. XXV, вып. 1.
7. Wang, L-Q. et al., Experimental study of detonation propagation in a square tube filled with orifice plates [Text] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.080>

DEFLAGRATION AND DETONATION SIMULATION IN HYDROGEN-AIR MIXTURES

P. E. Belyaev^{1,2}, I. R. Makeeva^{1,2},
D. A. Mastyuk¹, E. E. Pigasov^{1,2}

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

²South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia
E-mail: belyaevpe@vniitf.ru

Combustion and detonation processes are widely studied using numerical and experimental methods. Though there are undeniable benefits in experimental studies and versatility of received data, even the conduction of small-scale combustion and detonation experimental studies could be very expensive, and large-scale experiments are impracticable due to high cost and hazard. It becomes much more important due to rise of attention to hydrogen power engineering, and, as a consequence, to hydrogen safety.

Previous studies showed high accuracy of shock processes simulation with modified Kurapatenko method [1, 2]. The aim of modification was to provide opportunity to simulate reacting flows in geometrically complex areas. The approach for chemical reaction simulation [3] was supplemented with stiff ODE solver and shows high accuracy in hydrogen oxidation reaction simulation. For now, authors are not aware of any other papers devoted to reacting flow simulation with Kurapatenko method. Mat-

veev [5] and Babushok [6] detailed reaction mechanisms are used.

The ability of developed method modification to simulate reacting flow in geometrically complex area was verified by comparison with experimental data. Wang et al. [7] have conducted a series of experiment on deflagration to detonation (DDT) transition in hydrogen-air mixtures in shock tube filled with orifice plates. Hydrogen fraction was varied in wide range. A number of experimental series with different orifice plates spacing was conducted. Comparison of detonation velocities measured in experimental study and simulated with developed numerical method showed good agreement for dense orifice plate spacing. Simulation results and experimental data are both shown significant detonation velocity dependency of shock tube geometry.

References

1. Kurapatenko, V. F. Modeli mekhaniki sploshnikh sred [Models of Continuum Mechanics] [Text]. – Chelyabinsk : South Ural State University Publishing Centre, 2007. (in Russian)
2. Belyaev, P. E. Adaptation of Kurapatenko method for calculating shock waves in Euler coordinates [Text] / P. E. Belyaev, I. R. Makeeva, E. E. Pigasov, D. A. Mastyuk // Bulletin SUSU MMCS. – 2021. – Vol. 14, No. 1. – P. 83–96. (in Russian) DOI: 10.14529/mmp210107
3. Pigasov, E. E. Simulation of adiabatic heat explosion for hydroge oxidation reaction [Text] / E. E. Pigasov, V. K. Ryabinin, Y. M. Kovalev // Bulletin SUSU MMCS. – 2013. – Vol. 6, No. 3.
4. Gear, C. W. Numerical initial value problems in ordinary differential equations [Text] / Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1971. (in Russian)
5. Matveev, V. G. Hydrogen burning mechanism simplification [Text] // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2001. – Vol. 37.
6. Babushok, V. I. Threshold Structure of Thermal-Chain Self-Ignition [Text] / V. I. Babushok, T. V. Krakhtinova, V. S. Babkin // Kinetics and Catalysis. – 1984. – Vol. XXV, issue 1.
7. Wang, L-Q. et al., Experimental study of detonation propagation in a square tube filled with orifice plates [Text] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.080>

2-8

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАДЕРЖКИ
ТЕПЛООВОГО ВЗРЫВА
В СМЕСЯХ НАНОТЕРМИТНЫХ
КОМПОЗИТОВ CuO/Al, Al/Ni
И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРА ПРОТЕКАНИЯ
ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ
В ВОЛНЕ ТВЕРДОПЛАМЕННОГО ГОРЕНИЯ**

Р. Н. Валиев¹, А. В. Станкевич^{1,2}, Л. Х. Бадретдинова²,
А. Р. Бакиров¹, Н. П. Тайбинов¹, В. Я. Базотов²

¹Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²Казанский национальный исследовательский
технологический университет, Казань, Россия

Смеси дисперсных веществ, содержащих металлы и их оксиды, принято считать нанотермитами. Данные смеси, в силу их химической активности, после инициирования твердофазной диффузионной и окислительно-восстановительной реакции способны к ее самораспространению с большими скоростями и выделением большого количества тепла. Одной из характеристик инициирования высокоэнтальпийных реакций является время задержки теплового взрыва.

В данной работе проведены исследования задержки теплового взрыва в нанотермитах CuO/Al, Al/Ni. Установлен характер и механизм термического инициирования окислительно-восстановительной и диффузионной реакции между компонентами. Проведены исследования энергии активации процесса воспламенения. Результаты представлены графически и аналитически.

**STUDY OF THE THERMAL EXPLOSION
DELAY IN MIXTURES OF NANOTHERMITE
COMPOSITES CuO/Al AND Al/Ni,
AND ASSESSMENT OF THE HISTORY
OF CHEMICAL REACTIONS
IN A SOLID-PHASE COMBUSTION WAVE**

R. N. Valiev¹, A. V. Stankevich^{1,2}, L. Kh. Badretdinova²,
A. R. Bakirov¹, N. P. Taibinov¹, V. Ya. Bazotov²

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

²Kazan National Research Technological University,
Kazan, Russia

Mixtures of disperse materials containing metals and oxides are referred to as nanothermites. These mixtures, due to their reactivity, after initiating a solid-phase diffusive and oxidation-reduction reaction, are capable of self-propagation at high velocities with the generation of a large amount of heat. One of the characteristics of the initiation of high-enthalpy reactions is the thermal explosion delay time.

The paper presents the results of studies of the thermal explosion delay in nanothermite composites CuO/Al and

Al/Ni. The character and the mechanism of the thermal initiation of the oxidation-reduction and diffusive reaction between the components are determined. The energy of combustion activation is studied. The results are presented graphically and analytically.

2-9

**ИСПЫТАНИЕ БОЛТОВ РАЗРЫВНЫХ
И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ИХ РАЗРУШЕНИЯ
ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ**

Д. М. Гагаркин, И. Г. Галиуллин, А. Ю. Гармашев,
Д. П. Дудник, В. Н. Дунаев, А. В. Сарафанников,
Е. Б. Смирнов, С. В. Шахмаев,
А. П. Бекетов, Е. Ю. Емельянова

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: D.M.Gagarkin@vniitf.ru

В докладе представлены результаты испытаний болтов разрывных, изготовленных из титановых сплавов марки VT1-0, VT14, VT20 и предназначенных для использования в системах взрывного разделения. Болт разрывной имеет простую конструкцию, обеспечивающую технологичность изготовления, размеры под ключ выполнены в соответствии с ГОСТ 24671-84. Разрушение болта разрывного осуществляется за счет срабатывания малогабаритного детонирующего концевика.

По результатам испытаний построены две конечно-элементные модели (осесимметричная и трехмерная), работающие в связке друг с другом для проведения расчетов деформирования и последующего разрушения разрывных болтов, нагруженных взрывным воздействием. По сопоставлению расчетных данных с экспериментальными определены динамические прочностные характеристики (пределы прочности) трех марок титана.

**TESTING OF EXPLOSIVE BOLTS
AND SIMULATION OF THEIR SEPARATION
UNDER EXPLOSIVE LOADING**

D. M. Gagarkin, I. G. Galiullin, A. Yu. Garmashev,
D. P. Dudnik, V. N. Dunaev, A. V. Sarafannikov,
E. B. Smirnov, S. V. Shakhmaev,
A. P. Beketov, E. Yu. Emel'yanova

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

E-mail: D.M.Gagarkin@vniitf.ru

The work gives the results of testing the explosive bolts made of titanium alloys of three grades (VT1-0, VT14, and VT20) and designed to be used in explosive separation systems. The explosive bolt has a simple

structure ensuring its manufacturability. Width across the flats complies with GOST 24671-84. Separation of the explosive bolt occurs through the operation of a small-shaped detonating cap containing an explosive.

Two finite-element models (axial symmetric and three-dimensional) are developed based on the testing results. They work in tow to calculate deformation and subsequent separation of explosive bolts under shock-wave loading. The comparison of the computational and experimental data allowed determining the dynamic strength characteristics (ultimate strengths) of titanium of the above three grades.

2-10

ТОНКАЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК БТФ НА РАЗЛИЧНЫХ ПОДЛОЖКАХ

Д. М. Гагаркин, А. В. Станкевич, А. В. Соболевская,
А. Н. Грецова, О. А. Фролова, В. Н. Щербаков

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

В работе проведены исследования тонких пленок из БТФ различной толщины, полученных методом кристаллизации из газовой фазы на различных подложках. Проведена предварительная подготовка газообразных продуктов БТФ, которые были получены методом термовакuumной сублимации. Установлено, что тонкие пленки имеют молекулярное строение соответствующее БТФ, кристаллы которого текстурованы в направлении [040], состоят из частиц, имеющих столбчатую форму, неравновесную огранку и развитую поверхность. Измерения проводились методами рентгеновской дифрактометрии, спектроскопии комбинационного рассеяния света, ИК-спектроскопии, оптической и электронной микроскопии.

Исследовались скорости горения тонких слоев БТФ на различных подложках. Регистрация процесса горения осуществлялась с помощью высокоскоростной видеосъемки, скорость горения составила от 10 до 70 мм/с. Примечательно, что цепь реакций взаимодействия первичных актов распада БТФ на подложке из подпергамента периодически прерывалась. В эксперименте фиксировалось возобновление реакций, предположительно из-за формирования благоприятных с термодинамической и кинетической точки зрения условий воспламенения: снижения давления в зоне реакции и увеличение концентрации дефектных областей, позволяющих локализовать элементарные акты распада в короткий промежуток времени.

FINE CRYSTAL STRUCTURE AND COMBUSTION RATE OF BTF THIN FILMS ON VARIOUS SUBSTRATES

D. M. Gagarkin, A. V. Stankevich, A. V. Sobolevskaya,
A. N. Gretsova, O. A. Frolova, V. N. Shcherbakov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

The work is devoted to the study of BTF thin films of various thicknesses, obtained through crystallization from the gas-phase on various supports. Gaseous BTF products were preprepared, obtained through thermal vacuum sublimation. It has been established that the molecular structure of the thin films corresponds to that of benzo-trifurozane (BTF) which crystals are textured in direction [040] and consist of particles having column-like shape, non-equilibrium facet pattern, and extended surface. The measurements were performed using X-ray diffractometry, Raman scattering spectroscopy, IR spectroscopy, optical and electron microscopy.

The combustion rates of BTF thin layers on various substrates were studied. The combustion process was recorded using a streak video camera, and the combustion rates ranged from 10 to 70 mm/s. It is noteworthy that the chain of interactions of BTF disintegration primary events on imitation parchment support was regularly interrupted. In the experiment, the reactions were recorded to be resumed, presumably, due to the formation of favorable, in terms of thermodynamics and kinetics, ignition conditions that are: pressure decrease in the reaction zone and increase in defect region concentrations which allow localizing elementary disintegration events within a short period of time.

2-11

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗРЫВОСТОЙКОСТИ ОБРАЗЦОВ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ КОМПОЗИЦИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ СТРУИ КУМУЛЯТИВНОГО ЗАРЯДА

И. Г. Галиуллин, Е. Б. Смирнов, А. В. Сарафанников,
К. М. Просвирнин, К. В. Еганов, Д. М. Гагаркин,
Д. П. Дудник, П. А. Перегудов, А. С. Гремитских,
А. В. Ванчинов, С. В. Шахмаев

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: galiullin-igor@mail.ru

В работе представлены результаты исследований взрывостойкости образцов термопластичных взрывчатых композиций на основе ТАТБ и октогена при воздействии на них струи кумулятивного заряда. Исследования проводились на цилиндрических образцах диаметром 120 мм и высотой 60 мм, снаряжен-

ных в стальной корпус. Кумулятивный заряд представлял собой запрессованный в стальном корпусе заряд взрывчатого вещества (ВВ) на основе октогена с медной сферической кумулятивной облицовкой. Высота КЗ составляла 48 мм, а диаметр – 38 мм.

Факт взрывчатого превращения в исследуемых образцах ВВ регистрировался радиоволновой методикой с использованием зондирующего волновода и электроконтактной методикой с использованием электроконтактных датчиков, выполненных в виде витой пары.

По результатам исследований в случае отсутствия взрывчатого превращения определялась скорость распространения кумулятивной струи в образцах ВВ, а в случае взрывчатого превращения – скорость детонации и глубина возникновения детонации.

Также проведена оценка стойкости образцов ВВ по критерию Хельда (параметр V^2d , где V и d – скорость и диаметр кумулятивной струи соответственно).

Результаты исследований показали, что в случае воздействия кумулятивной струи на образец ВВ на основе ТАТБ наблюдается отсутствие взрывчатого разложения ВВ, при этом в образце ВВ образуется сквозное отверстие диаметром ~20 мм. Среднее значение скорости КС в образце ВВ составила 1,8 км/с. При воздействии кумулятивной струи на образец ВВ на основе октогена происходит детонационное превращение практически с поверхности образца. Скорость детонационной волны в данном случае составила более 8 км/с.

Оценивая степень воздействия кумулятивной струи на образцы ВВ по критерию Хельда, параметр V^2d равен $245 \text{ мм}^3/\text{мкс}^2$, что соответствует попаданию на заряд ВВ кумулятивно-осколочного элемента сверху (по стандарту STANAG 4526).

THERMOPLASTIC EXPLOSIVE COMPOSITIONS EXPLOSION RESISTANCE AT THE IMPACT OF CUMULATIVE CHARGE JET

I. G. Galiullin, E. B. Smirnov, A. V. Sarafannikov,
K. M. Prosvirnin, K. V. Eganov, D. M. Gagarkin,
D. P. Dudnik, P. A. Peregudov, A. S. Gremitikhin,
A. V. Vanchinov, S. V. Shakhmaev

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia
E-mail: galiullin-igor@mail.ru

The work presents the results of the investigation into explosion resistance of thermoplastic TATB- and HMX-based explosive compositions at the impact of cumulative jet. The study was conducted using cylindrical samples with the diameter of 120 mm and 60 mm high, packed into the steel case. The cumulative charge was a HMX-based charge sealed in the steel casing with a spherical cumulative cladding. Cumulative charge height was 48 mm and the diameter – 38 mm.

The fact of the explosive transformation was registered via radiowave technique, with the help of scanning waveguide, and electric-contact technique, using electric-contact sensors made as a twisted-pair.

If there was no explosion transformation, cumulative jet propagation speed was determined in the HE samples, and in case the explosion transformation took place, the detonation speed and the detonation depth were assessed.

HE sample cumulation resistance was assessed according to Held criterion (V^2d parameter, where V and d – are jet speed and diameter, respectively).

The results showed that in case of cumulative jet impact on the TATB-based sample there was an absence of the HE explosion decomposition, at the same time a through-hole was formed with the diameter of ~20 mm. The average cumulative jet speed in the sample was 1.8 km/s. At the cumulative jet impact against the HMX-based sample, detonation transformation takes place almost from the sample surface. In this case detonation wave velocity exceeded 8 km/s.

Assessing the cumulative jet impact against the HE sample using Held criterion, V^2d parameter is about $245 \text{ mm}^3/\mu\text{s}^2$, that is similar to the falling of a dual-purpose element falling from above (according to the STANAG 4526).

2-12

СВОЙСТВА И МЕХАНИЗМЫ НИЗКОСКОРОСТНОЙ ДЕТОНАЦИИ ПОРИСТЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Б. С. Ермолаев

Федеральный исследовательский центр химической
физики им. Н. Н. Семёнова РАН, Москва, Россия
E-mail: boris.ermolaev44@mail.ru

К настоящему времени низкоскоростная детонация (НСД) получена в энергетических материалах практически всех типов в широком интервале начальной плотности (пористости), от насыпной плотности в порошковых ВВ до почти максимальной плотности в прессованных и литых зарядах ВВ и топлив, заключенных в прочные, умеренно-прочные и бумажные оболочки. Хотя по устойчивости НСД заметно уступает нормальной детонации, опыты, аналогичные тем, что представлены в работе (Jones and Cumming, 1955), когда, варьируя амплитуду инициирующей волны, при прочих одинаковых условиях получали одну и ту же скорость НСД, дают основание признать этот процесс устойчивым гидродинамическим явлением.

Свойства и механизмы НСД подробно изучены на примере зеренных пироксилиновых порохов на зарядах повышенной и насыпной плотности. Известно, что пороховые зерна не дробятся при нагрузках, отвечающих нижнему диапазону скоростей НСД (на уровне 1 км/с), испытывая лишь пластические деформации при уплотнении (компактировании). Инструменты исследования: фоторегистрация, пьезокварцевые датчики давления и электромагнитный датчик массовой скорости. Условия инициирования: переход от горения или с помощью капсуля – детонатора через тонкий

слой (1–2 мм) пластикового ВВ. Эксперименты дополнены численным моделированием, которое проведено в квазиодномерном приближении в рамках механики двухфазных реагирующих сред. В докладе рассмотрены основные результаты исследования, в том числе механизм и закономерности возбуждения НСД во фронте волны конвективного горения в зависимости от диаметра пороховых зерен и начальной плотности заряда; две различные пространственные структуры фронта волны НСД, различающиеся в зависимости от того, по какой фазе, газовой фазе или твердому скелету передается энергия, контролирующая процесс воспламенения; условия, при которых осуществляется смена ведущего механизма от твердой к газовой фазе и обратно; размеры зоны экзотермического превращения; ускорение и стабилизация волны НСД за счет оболочки.

Для вторичных ВВ и взрывчатых смесей на основе перхлората и нитрата аммония в отличие от пироксилиновых порохов нет способа надежно оценить поверхность и скорость горения в условиях НСД. Чтобы получить информацию о пространственной структуре волны и скоростях экзотермического превращения при НСД, применяется математическое моделирование с константами, входящими в уравнение макрокинетики экзотермического превращения, величина которых подбирается так, чтобы обеспечить наилучшее согласие расчетов с опытными данными по зависимости скорости детонации от диаметра заряда. В докладе рассмотрены результаты исследования, полученные с использованием стационарной модели неидеальной детонации, которые включают: двухчленное уравнение макрокинетики, позволяющее воспроизвести единую зависимость скорости детонации от диаметра заряда, наблюдаемую из двух ветвей (нормальной и низкоскоростной детонации), располагающихся одна над другой; гипотезу, которая позволяет объяснить аномально затянутое искровое инициирование ВВ и явление delayed detonation за счет учета медленных экзотермических реакций, реализующихся при НСД; особенности экзотермического превращения при НСД в смесях перхлората и нитрата аммония с алюминием, в том числе увеличение скорости горения окислителя от 3 до 6 раз в зависимости от содержания алюминия в смеси, что обеспечивает резкое усиление детонационной способности алюминизированных смесей, и эффект псевдоидеальной детонации, когда при определенном соотношении между скоростями горения окислителя и алюминия на зависимости скорости детонации от обратного диаметра заряда появляется платообразный участок.

PROPERTIES AND MECHANISMS OF LOW VELOCITY DETONATION OF POROUS ENERGY MATERIALS

B. S. Ermolaev

N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics
RAS, Moscow, Russia

E-mail: boris.ermolaev44@mail.ru

Recently, low-velocity detonation (LVD) has been observed in energetic materials of all types in a wide range

of initial density (porosity), from loose-packed powder explosives to almost maximum density in pressed and cast explosives and propellants, confined in strong, moderately strong and paper casings. Although the stability of LVD is noticeably inferior to normal detonation, experiments similar to those presented in (Jones and Cumming, 1955), when the same LVD velocity was obtained by varying the amplitude of the initiating wave with the other conditions being the same, give grounds to recognize this process as a steady hydrodynamic phenomenon.

The properties and mechanisms of LVD have been studied in detail using the granulated single-base propellants in charges of loose-packed and enhanced density. These propellant grains are known to be not crushed under loads corresponding to the typical range of LVD velocities (at the level of 1 km/s), demonstrating only plastic deformation during compaction. The research instruments are photo registration, piezoelectric pressure sensors and electromagnetic mass velocity gauge. Initiation conditions are either transition from combustion or a detonator cap through a thin layer (1–2 mm) of a plastic explosive. The experiments are supplemented by numerical modeling, which was carried out in a quasi-1-D approximation within the frame of the mechanics of two-phase reacting media. The report presents the main results of this study, including the mechanism and regularities of the LVD generation in the front of the convective burning wave, depending on the powder grain diameter and the initial charge density; two different spatial structures of the LVD wave front, which differ depending on the energy being transferred through either the gas phase or solid skeleton; conditions under which the driving mechanism of LVD is changed from solid to gas phase and vice versa; the size of the exothermic conversion zone; acceleration and stabilization of the LVD wave due to the casing.

For secondary explosives and explosive mixtures based on ammonium perchlorate and nitrate, in contrast to the single-base propellants, there is no way a priori to estimate the surface and combustion rate under LVD conditions. In order to obtain information on the spatial structure of the wave and the rates of exothermic conversion during LVD, mathematical modeling is used with the constants of the macro-kinetic equation of exothermic conversion, the values of which are selected so as to ensure the best agreement of calculations with experimental data on the detonation diameter effect. The report presents the results of research obtained using a steady model of unideal detonation, which include: a two-term macro-kinetic equation, making it possible to reproduce a single dependence of the detonation velocity on the charge diameter, observed for secondary explosives of loose-packed density and consisting of two branches (normal and low-velocity detonations) located one above the other; a hypothesis that allows one to explain the abnormally prolonged spark initiation of explosives and the phenomenon of delayed detonation by taking into account the slow exothermic reactions taking place during LVD; features of exothermic conversion during LVD in mixtures of ammonium perchlorate and nitrate with aluminum, including an increase in the burning rate of the oxidizer from 3 to 6 times depending on the aluminum

content in the mixture, which provides a sharp increase in the detonation ability of aluminized mixtures, and the effect of pseudo-ideal detonation when at a certain ratio between the burning rates of the oxidizer and aluminum, a plateau-like section appears on the dependence of the detonation rate on the reciprocal charge diameter.

2-13

ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ МАССОВОЙ СКОРОСТИ

А. П. Ершов

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, Россия
E-mail: ers@hydro.nsc.ru

Электромагнитный метод, предложенный Е. К. Завойским в 1940-х годах прошлого века, применяется и в настоящее время для измерений массовой скорости в ударных и детонационных волнах. Обычно используют датчик скорости с длиной рабочего плеча L порядка 1 см. Это приводит к довольно жестким требованиям на одномерность исследуемого течения. Например, для детонационного течения диаметр заряда взрывчатого вещества должен значительно превышать L .

В последнее время нами отработаны малогабаритные датчики с типичным значением $L \approx 1$ мм. Соответственно уменьшаются и размеры исследуемого заряда, что позволяет перейти к опытам настольного масштаба. В частности, удалось исследовать детонацию нанодисперсных ВВ (которые по необходимости доступны в скромных количествах) при характерной массе зарядов порядка 10 г [1].

Проведен методический анализ отклика малогабаритного датчика. Исследовано распределение потенциала в подводящих проводниках и показано, что в одномерном приближении датчик эквивалентен рамке нулевой толщины, причем эффективная длина плеча L есть расстояние между средними линиями подводящих проводников. Рассмотрено влияние кривизны детонационной волны. Расходимость течения искажает сигнал, однако эту ошибку можно исключить, записывая два сигнала от датчиков, один из которых расположен в касательной к фронту волны плоскости, а другой – в плоскости, параллельной направлению течения. Менее удобный вариант – один датчик, размещенный на сферической поверхности, выпуклой навстречу падающей волне. При определенной кривизне этой поверхности она после прохождения волны становится плоской, что исключает искажение сигнала.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ N 18-03-00441.

Литература

1. **Ершов, А. П.** Детонация ультрадисперсных взрывчатых веществ [Текст] / А. П. Ершов, В. В. Андреев, А. О. Кашкаров и др. // Физика горения и взрыва. – 2021. – Т. 57, № 3. – С. 111–118.

ON ELECTROMAGNETIC MEASUREMENTS OF PARTICLE VELOCITY

A. P. Ershov

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS,
Novosibirsk, Russia
E-mail: ers@hydro.nsc.ru

Electromagnetic method of flow measurements, suggested by E. K. Zavoisky in 1940-s, is still in use for shock and detonation studies. Typically the length of the gauge working L is about 1 cm. This leads to rather strict requirements concerning one-dimensionality of the flow. For example, diameter of the detonating charge should exceed L significantly.

Recently we worked out small-scale ($L \approx 1$ mm) gauges. The charge's dimensions are reduced proportionally, which allowed us to conduct tabletop experiments. In particular, detonation of nanodisperse explosives (available in modest quantities) was studied [1], using charges masses of about 10 g.

The response of small gauge was analyzed. The distribution of the electric potential in the connecting leads was found. In one-dimensional case the gauge acts as thin contour, and the effective L value is simply the distance between the middle lines of connecting leads. The effect of curvature of the detonation wave was also considered. The flow divergence distorts the signal, but this error can be eliminated if two records are used, from gauges placed in two mutually perpendicular planes, one plane is tangent to the wave front and another is parallel to the flow velocity. There exists alternative (though less convenient) to place the single gauge onto spherical surface convex up to the incoming wave. This surface, for certain curvature, becomes flat, eliminating the curvature error.

This work was supported by RFBR grant 18-03-00441.

References

1. **Ershov, A. P.** Detonation of Ultrafine Explosives [Text] / A. P. Ershov, V.V. Andreev, A. O. Kashkarov et al. // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2021. – V. 57, No 3. – P. 356–363.

2-14

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ КОМПОЗИТОВ ТЕТРАНИТРАТ ПЕНТАЭРИТРИТА – НАНОЧАСТИЦЫ АЛЮМИНИЯ С ОКСИДНОЙ ОБОЛОЧКОЙ

А. А. Звекон, А. В. Каленский, В. В. Галкина,
А. С. Зверев, М. В. Ананьева

Кемеровский государственный университет,
Кемерово, Россия

Лазерное инициирование взрывчатых веществ рассматривается как возможность создания специальных оптических детонаторов, позволяющих повысить

безопасность взрывных работ. Создание моделей, позволяющих прогнозировать взрывную чувствительность данных систем является важным этапом их оптимизации. В экспериментальной работе Б. П. Адуева и сотр. [1] было показано, что увеличение доли оксида в наночастицах алюминия приводит к увеличению критической плотности энергии лазерного инициирования взрывного разложения композитов тетранитрат пентаэритрита (тэн) – наночастицы алюминия (Al). Задачи работы: создание модификации микроочаговой модели лазерного инициирования теплового взрыва, учитывающей оксидную оболочку наночастиц, проведение цикла расчетов, сравнение с экспериментальными данными. Адаптирован и апробирован пакет прикладных программ для расчета критических параметров инициирования композитов тэн – наночастицы Al с учетом оксидной оболочки лазерным импульсом. Сформулирована математическая модели инициирования химического разложения энергетических материалов, содержащих наночастицы со структурой «ядро-оболочка», лазерным импульсом. Введен коэффициент эффективности поглощения излучения системой металлической ядро – диэлектрическая оболочка в расчете на ядро. Показано, что данная величина возрастает при увеличении радиуса оболочки, если среда имеет показатель преломления ниже, чем у оболочки, и уменьшается в противоположном случае. Рассчитаны и проанализированы зависимости критических параметров инициирования взрывного разложения композитов тэн – наночастицы Al при различных радиусах включений и толщины оксидной оболочки лазерным импульсом длительностью на полувысоте 14 нс. Показано, что в соответствии с экспериментом, при уменьшении массовой доли металлического Al в наночастице от 74 до 13% по массе, порог взрывчатого разложения лазерным импульсом возрастает в 12,5 раза, за счет убывания коэффициента эффективности поглощения в 3,5 раза и роста критической плотности энергии в 2,7 раз.

Литература

1. Адуев, Б. П. и др. [Текст] // Физика горения и взрыва. – 2014. – Т. 50. – № 5. – С. 87–90.

MODELLING OF COMPOSITES PENTAERYTHRITOL TETRANITRATE – ALUMINUM NANOPARTICLES WITH OXIDE SHELL LASER INITIATION

A. A. Zvekov, A. V. Kalenskii, E. V. Galkina,
A. S. Zverev, M. V. Anan'eva

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

Laser initiation of explosives is considered as a possibility of the special optic detonators development allowing one to increase the safety of explosives' handling and utilization. The development of models for the sensitivity of such systems' prediction is an essential step in their optimization. Boris Aduiev and colleagues showed that increasing in the oxide content in the aluminum nanopar-

ticles leads to increasing in the critical energy density of the composites pentaerythritol tetranitrate (petn) – aluminum nanoparticles (Al) laser initiation of explosion [1]. The aim of the work is modification of the contemporary micro hot-spot model of laser initiation taking into account the oxide shell of the nanoparticles; conduction of the calculations; and comparison with experimental data. The math model of energetic materials containing metal nanoparticles with core-shell structure chemical decomposition with laser pulses was suggested. The absorption efficiency of core-shell particle calculated on the core was introduced, as the oxide shell is transparent. This absorption efficiency increases with shell layer thickness increasing, if the explosive medium's refractive index is higher than that of the shell, otherwise the trend is the opposite one. The dependencies of critical energy density of petn – Al nanoparticles on their radius and oxide shell thickness were calculated. The pulse duration was set at 14 ns fwhm. The decreasing in the metallic aluminum content in the nanoparticle form 74 to 13 wt% leads to 12.5 times increasing in the critical energy density matching the experimental data. The effect is concerned on absorption efficiency decreasing (3.5 times) and increasing in the critical energy density obtained from thermophysical part of the model (2.7 times).

References

1. Aduiev, B. P. et al [Text] // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2014. – Vol. 50. – No. 5. – P. 578–581.

2-15

ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНОЙ ПОРИСТОСТИ НА ОПТОАКУСТИЧЕСКИЙ ОТКЛИК КОМПОЗИТОВ ПРОЗРАЧНАЯ МАТРИЦА – НАНОЧАСТИЦЫ МЕТАЛЛОВ

A. A. Zvekov, A. V. Kalenskii, V. V. Galkina,
A. S. Zverev, M. V. Anan'eva

Кемеровский государственный университет,
Кемерово, Россия

Экспериментальное определение и моделирование оптических свойств композитов на основе прозрачной матрицы и наночастиц металлов (частные случаи: композиты на основе пентаэритрита тетранитрата и гексогена в видимой и ближней ИК области) является важным этапом при оптимизации составов для оптических детонаторов, поскольку в [1] было показано, что наименьшая плотность энергии наблюдается для состава с максимальной амплитудой оптоакустического сигнала. Поры могут оказывать влияние на оптоакустический сигнал, выступая в качестве центров рассеяния излучения и областей легко сжимаемой части матрицы. Цель работы: включение остаточной пористости композита в модель оптоакустического сигнала и выяснение возможной роли пор в изменении его параметров. Рассчитана зависимость показателей поглощения и рассеяния излучения в композите

гексоген – наночастицы алюминия от концентрации пор. В предположении, что поры меньше наночастиц и наночастицы заполняют поры, последние не влияют при малых концентрациях. В противоположном пределе показатель рассеивания линейно возрастает при увеличении концентрации пор. По этой причине в области высоких концентраций пор увеличивается эффективный показатель поглощения и снижается коэффициент поглощения. Разработана модель изменения давления в малом объеме композита при нагреве наночастиц с учетом пор. Модель основана на гипотезе механического квазиравновесия и приводит к квадратному уравнению для давления при заданном распределении температуры. Рассчитана кинетика изменения давления в малом объеме композита с учетом пор в изохорном приближении и функция источников для расчета оптоакустического сигнала. Показано, что поры вносят демпфирующий эффект, приводящий к уменьшению предельного давления и амплитуды функции источников. Рассчитанные оптоакустические сигналы при наличии пор имеют меньшую амплитуду по сравнению со случаем отсутствия пор, при этом показатель поглощения, оцениваемый по оптоакустическому сигналу, согласуется с вносимым распределением поглощенной энергии.

Литература

1. Адуев, Б. П. и др. [Текст] // Физика горения и взрыва. – 2016. – Т. 52. – № 6. – С. 104–110.

THE INFLUENCE OF RESIDUAL POROSITY ON THE PHOTOACOUSTIC RESPONSE OF THE COMPOSITES TRANSPARENT MATRIX – METAL NANOPARTICLES

A. A. Zvekov, A. V. Kalenskii, E. V. Galkina,
A. S. Zverev, M. V. Anan'eva

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

The experimental determination and modeling of the composites' based on transparent matrix and metal nanoparticles is an essential step in the optic detonators' optimization, because pentaerythritol tetramine and RDX are transparent in the near IR and visible range. B. P. Aduev and coworkers showed that optimal explosive composite's composition providing the minimal value of the critical energy density could be elucidated using photoacoustic approach as a composite with the highest photoacoustic response [1]. Pores are able to influence the photoacoustic signal acting as light scattering centers and areas of the matrix with high compressibility. The aim of the work is introduction of the residual porosity of the composite into the photoacoustic effect model and studying the pores influence on its parameters. The dependence of absorption and scattering linear coefficients in the RDX–Al nanoparticles composite on the pores' concentration were calculated. We assumed that pores' typical radius is lower than the radius of nanoparticles, so they do not influence when their concentration is lower than of the nanoparticles. The linear scattering coefficient increases linearly with the pores' concentration increasing

in the opposite limit. That leads to the respective increasing in the diffusion reflection and decreasing in the absorption coefficient in this limit. The model of pressure increasing in the volume element of the composite due to nanoparticles' heating was developed taking into account the residual pores. The model is based on the mechanical quasiequilibrium assumption leading to the square equation for pressure at the given temperature distribution. The kinetics of pressure increasing in the composite volume element in the isochoric approximation and pressure sources function were calculated. It was shown that the damper effect of pores leads to decreasing in the pressure and source function amplitude. The photoacoustic signals calculated taking into account pores have lower amplitudes comparing to those calculated without pores. The effective linear absorption coefficient estimated from the calculated photoacoustic signals matches well the light absorption distribution.

References

1. Aduev, B. P. et al. // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2016. – Vol. 52. – No. 6. – P. 713–718.

2-16

ВЛИЯНИЕ ОКСИДА ЦИНКА И МАТЕРИАЛОВ НА ЕГО ОСНОВЕ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ТЕТРАНИТРАТА ПЕНТАЭРИТРИТА К ЛАЗЕРНОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

А. С. Зверев¹, Д. Р. Нурмухаметов¹,
А. Ю. Митрофанов², Н. Н. Ильякова²

¹ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии» СО РАН, Кемерово, Россия

²Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

E-mail: anthon.zverev@yandex.ru

Развитие методов лазерного инициирования энергетических материалов открывает существенные перспективы для повышения безопасности использования взрывчатых веществ вне зависимости от отрасли их применения. Включение в процесс инициирования фотохимических механизмов, происходящих под действием лазерного излучения, способно увеличить селективную чувствительность энергетического материала к лазерному излучению, а также максимально полно использовать возможности лазера.

В работе рассмотрено применение оксид цинка и материалов на его основе как фотокаталитической добавки, способной заметно уменьшить порог инициирования взрывной реакции энергетического материала лазерным излучением на примере тетранитрата пентаэритрита (ТЭН). Изучена зависимость порога лазерного инициирования от концентрации оксида цинка при инициировании основной частотой (1064 нм), второй (532 нм) и третьей (355 нм) гармониками Nd:YAG-лазера с длительностью импульса 14 нс.

Показано, что в зависимости от концентрации оксида и длины волны инициирующего излучения порог может быть понижен в 2–5 раз. Также исследованы композиты на основе ТЭНа с добавкой ZnO легированного серебром, медью и железом. Показана возможность инициирования таких композитов лазерным диодом постоянного действия с длиной волны 450 нм и мощностью 21 Вт. Композит с добавкой ZnO:Ag также оказался чувствителен к излучению квазинепрерывного (1,5 кВт) лазера с длиной волны 1070 нм.

Рассматриваемый фотокаталитический процесс инициирования был теоретически предсказан в [Surf. Sci., 637, 19–28, (2015)] и экспериментально продемонстрированном для композита ТЭН-MgO в [Phys. Chem. Chem. Phys., 22(43), 25284–25296, (2020)]. Его ключевой стадией является фотоиндуцированный перенос валентного электрона оксида-фотокатализатора на низшую вакантную молекулярную орбиталь ТЭНа, с образованием метастабильного продукта, способного самопроизвольно экзотермически разлагаться, запуская взрывную реакцию в материале. По всей видимости, данный процесс в чистом виде реализуется только при инициировании композитов ТЭН-ZnO длиной волны 532 нм, при двухфотонной генерации зонного электрона в оксиде. В случае воздействия длиной волны в области поглощения добавки должен вносить вклад также и тепловой механизм разложения энергетического материала. Для таких случаев наблюдалось максимальное понижение порога инициирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект № 19-33-60013).

**EFFECT OF ZINC OXIDE,
AND MATERIALS BASED ON IT,
ON SENSITIVITY OF PENTAERYTHRITOL
TETRANITRATE TO LASER RADIATION**

A. S. Zverev¹, D. R. Nurmukhametov¹,
A. Yu. Mitrofanov², N. N. Ilyakova²

¹Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry SB RAS,
Kemerovo, Russia

²Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

E-mail: anthon.zverev@yandex.ru

The development of methods for laser initiation of energetic materials opens up significant prospects for improving the safety of using explosives, regardless of their industry. The use of photochemical mechanisms in the initiation process, which are induced by the laser radiation, can increase the selective sensitivity of the energetic material to laser radiation, and also makes the most of the capabilities of the laser.

The paper considers the use of zinc oxide and materials based on it as a photocatalytic additive capable of significantly reducing the initiation threshold of an energetic material explosive reaction by laser radiation using the example of pentaerythritol tetranitrate (PETN). The dependences of the laser initiation threshold on the concentration of zinc oxide upon initiation by the funda-

mental frequency (1064 nm), second (532 nm), and third (355 nm) harmonics of an Nd: YAG laser with a pulse duration of 14 ns has been studied. It is shown that, depending on the concentration of the oxide and the wavelength of the initiating radiation, the threshold can be reduced by a factor of 2–5. Composites based on PETN with the addition of ZnO doped with silver, copper, and iron have also been investigated. The possibility of initiation of such composites by a CW laser diode with a wavelength of 450 nm and a power of 21 W was shown. The composite with the addition of ZnO:Ag also turned out to be sensitive to radiation from a QCW (1.5 kW) laser with a wavelength of 1070 nm.

The considered photocatalytic initiation process was theoretically predicted in [Surf. Sci., 637, 19–28, (2015)] and experimentally demonstrated for the PETN-MgO composite in [Phys. Chem. Chem. Phys., 22(43), 25284–25296, (2020)]. Its key stage is the photoinduced transfer of the valence electron of the photocatalyst oxide to the lowest unoccupied molecular orbital of PETN, with the formation of a metastable product capable of spontaneously exothermically decomposing, triggering an explosive reaction in the material. Apparently, this process in its pure form is realized only upon initiation of PETN-ZnO composites with a wavelength of 532 nm, with the two-photon generation of a band electron in the oxide. In the case of exposure to a wavelength in the additive absorption region, the thermal decomposition mechanism of the energetic material should also contribute. For such cases, the maximum decrease in the initiation threshold was observed.

The reported study was funded by RFBR, project number 19-33-60013.

2-17

**ПЛАСТИЧНЫЕ ВЗРЫВЧАТЫЕ СОСТАВЫ
НА ОСНОВЕ ТЭНА И БТФ
ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТОНКОСЛОЙНЫХ ЗАРЯДОВ
С МИНИМАЛЬНОЙ КРИТИЧЕСКОЙ
ТОЛЩИНОЙ ДЕТОНАЦИИ**

С. И. Карачинский, Н. Г. Багаветдинов,
М. А. Воробьев, А. К. Музыря, С. В. Мыггарев,
Е. А. Потеряева, И. Р. Шакиров

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: vniitf@vniitf.ru

В РФЯЦ – ВНИИТФ разработаны и освоены в производстве пластичные взрывчатые составы (ПВВ) на основе ТЭНа и БТФ, предназначенные для создания систем взрывной автоматики в авиационной и ракетно – космической технике и адаптивных боеприпасах (взрывные логические схемы, системы разделения ступеней и отстрела парашютов, системы аварийной разгерметизации, детонационные замки и разводки для боеприпасов направленного действия),

а также для взрывных перфораторов нефтяных скважин и детонационных шнуров и создания распределенных импульсных нагрузок при ударных испытаниях объектов ракетно – космической техники .

Толщина безотказно детонирующих лент, изготовленных раскаткой из ПВВ на основе ТЭНа составляет 0,23 мм, а на основе БТФ – 0,15 мм при скорости детонации в пределах 7600–8100 м/с.

Критическая ширина детонации ПВВ соизмерима с критической толщиной, а инициирующая способность обеспечивает безотказную передачу детонации между соединенными внахлест на длине 1–2 мм мостиками шириной 0,4 мм.

Физико-механические свойства ПВВ позволяют получать из них прокаткой детонационноспособные листы толщиной 0,15 мм и менее с сохранением сплошности и пластичности.

Технологические свойства листов ПВВ, полученных прокаткой, позволяют изготавливать из них путем резки, вырубки, гибки, запрессовки детали любой конфигурации без ухудшения детонационных характеристик.

На разработанные составы в 2010 и в 2018 году получены патенты Российской Федерации «Взрывчатый состав» RU 2 383 518 C1 от 15.09.2008 и «Пластичный взрывчатый состав» RU 2 671 340 C1 от 18.09.2017.

Последний из них в 2018 году вошел в перечень «100 лучших изобретений России», а в 2021 году был отмечен серебряной медалью международного Салона изобретений и открытий «Архимед».

PETN- AND BTF-BASED PLASTIC EXPLOSIVE COMPOSITIONS DEVELOPED TO PRODUCE THIN-LAYER CHARGES CAPABLE OF MINIMUM CRITICAL THICKNESS DETONATION

S. I. Karachinsky, N. G. Bagavetdinov, M. A. Vorobyov,
A. K. Muzyrga, S. V. Mytarev,
E. A. Poteryaeva, I. R. Shakirov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

E-mail: vniitf@vniitf.ru

RFNC – VNIITF has developed and applied in production processes PETN- and BTF-based plastic explosive compositions. These compositions are intended to produce explosive automatics systems for rocket-and-space technology, adaptive munitions (logical explosive circuits, systems of staging and blasting the parachute off, emergency depressurization systems, detonation locks and layouts for directed munitions), as well as for down-hole blasting perforators and detonation cords and to impose distributed pulsed loads in shock tests of rocket-and-space machinery.

At detonating velocity over a range of 7600–8100 m/s, the sheets capable of reliable detonation obtained by rolling of the plastic explosive compositions based on PETN are 0.23 mm thick and of those ones based on BTF are 0.15 mm.

The critical width of detonation in a plastic explosive composition is comparable with the critical thickness and its capability of initiation allows for reliable detonation propagation between 0.4-mm thick bridges overlapped over the 1–2 mm distance.

Due to the physical and mechanical properties of plastic explosive compositions, sheets with the thickness of 0.15 mm or less can be produced by rolling of these compositions without sacrificing continuity and plasticity.

Technological properties of the sheets obtained by rolling are suitable for parts of any configurations to be made by cutting blanking, bending, and pressing without compromise to the detonation characteristics.

The developed compositions were protected by the Russian Federation patents “Explosive Composition” (RU 2 383 518 C1 dated September 15, 2008) and “Plastic Explosive Composition” (RU 2 671 340 C1 dated September 18, 2017) in 2010 and 2018, respectively.

In 2018, the latter was listed in “100 Best Inventions of Russia” and in 2021 it was awarded a silver medal of Moscow International Salon of Inventions and Innovative Technologies “Archimedes-2021”.

2-18

**РЕГИСТРАЦИЯ ПЕРЕХОДА
УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ДЕТОНАЦИЮ
ПО ДИНАМИКЕ РАЗГРУЗКИ ВЕЩЕСТВА
ЗА ФРОНТОМ ВОЛНЫ МЕТОДОМ
СИНХРОТРОННОЙ ДИАГНОСТИКИ
БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ**

А. О. Кашкаров¹, К. А. Тен¹, Э. Р. Прууэл¹,
И. А. Рубцов¹, А. А. Студенников^{1,3},
К. М. Просвирнин², А. Ю. Гармашев²,
Е. Б. Смирнов², А. К. Музыря², А. В. Сарафанников²

¹Институт гидродинамики имени М. А. Лаврентьева
СО РАН, Новосибирск, Россия

²Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

³Новосибирский государственный технический
университет, Новосибирск, Россия

E-mail: kashkarov@hydro.nsc.ru

В работе приводятся результаты исследования перехода ударной волны в детонационную в прессованных зарядах ВВ ТАТБ и ВВ на основе ТАТБ, чувствительность к удару которых существенно различается. Успешность возбуждения детонации в зарядах определялась исходя из динамики распространения фронта волны и последующей разгрузки вещества заряда, полученной с помощью синхротронной диагностики быстропротекающих процессов.

Возбуждение переходного процесса производилось взрывом активного заряда отделенного от исследуемого инертной преградой. Диаметр зарядов и инертной преграды выбран 20 мм, что позволило наблюдать влияние боковой разгрузки на переходной процесс.

Было получено, что в зарядах каждого типа переходной процесс развивается близким образом. Сначала очаг реакции возбуждается в приосевой части заряда на некотором удалении от контактной границы с оргстеклом, и только потом реакция распространяется на всё сечение образца. Момент возбуждения первичного экспериментально значимого очага реакции определяется по резкому искривлению формы фронта идущей по образцу волны и подтверждается скачкообразной интенсификацией разгрузки за фронтом. При достижении режима близкого к стационарной детонации форма фронта, наоборот, существенно уплощается.

**REGISTRATION OF THE SHOCK
TO DETONATION TRANSITION
BY THE DYNAMICS OF RAREFACTION FLOW
BEHIND THE WAVE FRONT BY THE METHOD
OF SYNCHROTRON DIAGNOSTICS
OF FAST PROCESSES**

A. O. Kashkarov¹, K. A. Ten¹, E. R. Prueel¹,
I. A. Rubtsov¹, A. A. Studennikov^{1,3}, K. M. Prosvirnin²,
A. Yu. Garmashev², E. B. Smirnov²,
A. K. Muzyrya², A. V. Sarafannikov²

¹Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia

²Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

³Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

E-mail: kashkarov@hydro.nsc.ru

We present the results of a study of the shock to detonation transition in pressed charges of TATB and explosive based on TATB with significantly different of the impact sensitivity. Registration of the detonation flow regime is based on the dynamics of the propagation of the wave front along the charge and the subsequent unloading of matter behind the front, measured by synchrotron diagnostics of fast processes.

The initiation of the SDT process was made by the explosion of an active charge separated from the studied charge by an inert layer. The diameter of the charges and the inert barrier was chosen to be 20 mm, which made it possible to observe the effect of side rarefaction wave at the transient process.

It was found that in charges of each type the transient process propagates in a similar way. First, the reaction appears near the charge axis at some distance from the contact boundary with an inert layer, and only then the reaction spreads to the entire cross section of the charge. The moment of the primary experimentally significant onset of the reaction is determined by the rapid change in the shape of the wave front traveling along the sample, and then it is confirmed by the abrupt intensification of the unloading behind the front. Then, the shape of the wave front, upon reaching a flow close to stationary detonation, on the contrary, becomes substantially flatter.

2-19

**ИССЛЕДОВАНИЕ СХОЖДЕНИЯ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПОД
ДЕЙСТВИЕМ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА
АЛЮМИНИЗИРОВАННОГО ВВ**

А. Е. Кискин, К. В. Гаан, С. М. Долгих, К. В. Левак

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: kiskin_alexandr@mail.ru

В работе проведены исследования особенностей схождения цилиндрических оболочек под действием продуктов взрыва алюминизированного ВВ на основе ТАТБ.

Алюминизированные ВВ характеризуются большой калорийностью, однако их метательная способность напрямую не определяется данной величиной. Метательная способность алюминизированных ВВ зависит не только от скорости окисления алюминия, но и от газодинамических условий: способа инициирования, масштабного фактора, наличия корпуса и т. д.

Эксперименты проводились на цилиндрических моделях. Иницирование ВВ осуществлялось по торцу. Определялась величина отбора энергии в зависимости от толщины оболочки и корпуса, толщины ВВ и материала оболочки. Определены такие характеристики алюминизированного ВВ, как скорость детонации, метательные свойства в сравнении с хорошо изученной тротил-гексогеновой смесью.

**STUDY OF THE CONVERGENCE
OF CYLINDRICAL SHELLS UNDER
THE ACTION OF EXPLOSION PRODUCTS
OF AN ALUMINIZED EXPLOSIVE**

A. Ye. Kiskin, K. V. Gaan, S. M. Dolgikh, K. V. Levak

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

E-mail: kiskin_alexandr@mail.ru

The paper presents the results of a study of the features of the convergence of cylindrical shells under the action of the explosion products of aluminized explosives based on TATB.

Aluminized explosives are characterized by a high caloric content but their throwing ability is not directly determined by this value. The throwing ability of aluminized explosive depends not only on the rate of its oxidation, but also on the gas-dynamic conditions such as initiation method, scale parameter, availability of shell etc.

The experiments were carried out on cylindrical models. The initiation of explosive was carried out of the end surface of it. The amount of energy extraction is determined depending on the thickness of the shell and the shell material. Such characteristics of the aluminized explosive as the detonation velocity, throwing properties in comparison with the well studied TNT-RDX mixture.

2-20

ДЕТОНАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОНИЕВЫХ СОЛЕЙ АЗОТЕТРАЗОЛА

В. И. Колесов, К. О. Капранов,
Д. А. Костеров, А. И. Левшенков

Российский химико-технологический университет
имени Д. И. Менделеева, Москва, Россия

E-mail: kolesov2116@mail.ru

Изучены взрывчатые характеристики аммониевой, гидразиниевой и триаминогуанидиниевой солей азотетразола.

Соли азотетразола представляют интерес как перспективные бескислородные высокоэнтальпийные компоненты энергонасыщенных композиций: взрывчатых газогенерирующих композиций для подушек безопасности, порохов и твердых ракетных топлив.

Соли азотетразола обладают высокой энтальпией образования, приемлемой термостойкостью и механической чувствительностью, низкой температурой и высокой скоростью горения. Максимальные экспериментальные температуры пламени при горении солей азотетразола ниже расчетных и находятся в диапазоне от 900 до 1300 К. Расчеты и анализ газовой фазы показали, что такое понижение температуры связано с образованием лабильных эндотермических соединений, содержащих нитрильную группу – цианистого водорода HCN и цианамида H_2NCN , на фоне образования лабильного экзотермического продукта – аммиака NH_3 .

Определены теплота взрыва и количество газообразных продуктов при опытах в калориметрической бомбе. Обнаружено заметное отличие полученных результатов от теоретических расчетов. При близком значении расчетной и экспериментальной теплоты взрыва, располагающихся в диапазоне 2,4–3,3 Мдж/кг, экспериментальное количество газообразных продуктов почти вдвое меньше теоретического (530–640 л/кг).

По методу цилиндров оценены критические диаметры детонации изученных солей. Прессованные заряды не способны к устойчивой детонации, насыпные заряды имеют критические диаметры в районе 7–8 мм.

При детонационных экспериментах на электромагнитной установке определены скорости детонации данных солей в зарядах диаметром 12–21 мм. Обнаружено, что данные соли не способны к детонации в спрессованных зарядах и детонируют в насыпных зарядах со скоростями, не соответствующими расчетному коду РХТУ (SD). Скорости детонации для изученных солей расположены в диапазоне 1,6–3,5 км/с. По характеру зависимости скорости детонации от диаметра и плотности заряда вещества подобны слабым ВВ типа динитротолуола и аммонита.

Данные результаты также объясняются неполной реакцией превращения азотетразола и триаминогуанидина даже при свойственных детонации высоких давлениях и температурах. Продуктами взрыва, как и при горении, являются соединения цианамидного

ряда (цианамид, дициандиамид, меламина и т. д.), синильной кислоты, ее солей и полимеров, которые из-за кинетических затруднений не успевают прореагировать до термодинамически устойчивых расчетных продуктов детонации.

Таким образом, изученные ониевые соли азотетразола могут быть способны при определенных условиях к низкоскоростной детонации, что необходимо учитывать при создании композиций на их основе.

DETONATION CHARACTERISTICS OF ONLY SALTS OF AZOTETRAZOLE

V. I. Kolesov, K. O. Kapranov,
D. A. Kosteroov, A. I. Levshenkov

Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,
Moscow, Russia

E-mail: kolesov2116@mail.ru

Explosive characteristics of ammonium, hydrazinium and triaminoguanidinium salts of azotetrazole were studied.

The salts of azotetrazole are interesting as promising oxygen-free high-enthalpy components of energy-saturated compositions: explosive gas-generating compositions for airbags, propellants, and solid rocket fuels.

The salts of azotetrazole have a high enthalpy of formation, acceptable thermal stability and mechanical sensitivity, low temperature, and a high combustion rate. The maximum experimental flame temperatures during the combustion of azotetrazole salts are lower than the calculated ones and are in the range from 900 to 1300 K. Calculations and analysis of the gas phase have shown that such a decrease in temperature is associated with the formation of labile endothermic compounds containing a nitrile group – hydrogen cyanide HCN and cyanamide H_2NCN , against the background of the formation of a labile exothermic product – ammonia NH_3 .

There were determined the heat of explosion and the amount of gaseous products during experiments in a calorimetric bomb. A noticeable difference between the obtained results and theoretical calculations was found. With a close value of the calculated and experimental heats of explosion, which are in the range of 2.4–3.3 MJ/kg, the experimental amount of gaseous products is almost half less than the theoretical amount (530–640 l/kg).

The critical detonation diameters of the studied salts were estimated by the cylinder method. Pressed charges are not capable of stable detonation, the bulk charges have critical diameters around of 7–8 mm.

In detonation experiments on an electromagnetic installation were determined the detonation velocities of these salts in charges with a diameter of 12–21 mm. It was discovered that these salts are incapable of detonation in compressed charges and it is detonate in bulk charges at velocities that do not correspond to the calculated code of the MUCTR (SD). Detonation velocities for the studied salts are in the range of 1.6–3.5 km/s. By the nature of the dependence of the detonation velocity on the diameter and charge density, the substances are similar to weak explosives such as dinitrotoluene and ammonite.

These results are also explained by the incomplete conversion reaction of azotetrazole and triaminoguanidine even at high pressures and temperatures inherent in detonation. Explosion products, as in combustion, are compounds of the cyanamide series (cyanamide, dicyandiamide, melamine, etc.), hydrocyanic acid, its salts and polymers, which, due to kinetic difficulties, do not have time to react to the thermodynamically stable calculated detonation products.

In this way, the studied onium salts of azotetrazole under certain conditions can be capable of low-velocity detonation, what needs to be considered while creating compositions based on them.

2-21

БЕССОПЛОВЫЙ И БЕСКОРПУСНЫЙ РАКЕТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

А. В. Конюкова¹, В. Г. Шевченко¹, Д. А. Еселевич¹,
А. И. Ананьев², Ю. П. Борщев²

¹Институт химии твердого тела УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

²АО «Научно-производственное объединение
им. С. А. Лавочкина», Химки, Россия

E-mail: shevchenko@ihim.uran.ru

В настоящей работе рассмотрены возможности применения 3D-печати для изготовления бессопловой и бескорпусной ракеты с «виртуальным соплом», форма которого зависит от конкретного полетного задания. С использованием 3D-печати корпус и заряд твердого топлива выполняются как единое целое. При этом корпус формируется из материала, сгорающего по мере горения топливного заряда, например, из сплава Al_2Mg_3 . Твердый заряд бессоплового РДТТ может быть выполнен из смешанного топлива, содержащего порошки металлического Zr, Al или модифицированных металлических горючих с высокой температурой горения.

Структура заряда формируется в радиальном направлении таким образом, чтобы при движении фронта горения к головной части с полезным грузом, сохранялись объем и форма выгоревшего топлива в виде сопла Лавала или другой оптимальной геометрической формы.

Рассмотрены преимущества бескорпусных двигателей с «виртуальным» соплом, обеспечивающих увеличение удельного импульса тяги, дальности и скорости полета.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием Института химии твердого тела УрО РАН № АААА-А19-119031890028-0 (Структурное подразделение № 2)

Литература

1. Шевченко В. Г., Конюкова А. В., Еселевич Д. А., Ананьев А. И., Борщев Ю. П. Бессопловый ракетный двигатель твердого топлива. Патент РФ 2707648 от 28.11.2019.

NOZZLELESS AND FRAMELESS SOLID PROPELLANT ROCKET ENGINE

A. V. Konyukova¹, V. G. Shevchenko¹, D. A. Eselevich¹,
A. I. Ananiev², Yu. P. Borshchev²

¹Institute of Solid State Chemistry UB RAS,
Ekaterinburg, Russia

²JSC «Scientific and Production Association
named after S.A. Lavochkin», Khimki, Russia

E-mail: shevchenko@ihim.uran.ru

In this paper, the possibilities of using 3D-printing for the manufacture of a nozzleless and frameless rocket with a “virtual nozzle”, the shape of which depends on a specific flight task, are considered. Using 3D-printing, the body and the solid fuel charge are made as a single unit. In this case, the body is formed from a material that burns out as the fuel charge burns, for example, from an Al_2Mg_3 alloy. The solid charge of a nozzleless SPRE can be made from a composite propellant containing powders of metallic Zr, Al or modified metallic fuels with a high combustion temperature.

The structure of the charge is formed in the radial direction in such a way that when the combustion front moves to the head with a payload, the volume and shape of the burnt fuel in the form of a Laval nozzle or other optimal geometric shape are preserved.

The advantages of open-frame engines with a “virtual” nozzle, which provide an increase in specific thrust impulse, range and flight speed, are considered.

The present work was performed in accordance with a state order to the Institute of Solid State Chemistry, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, № АААА-А19-119031890028-0 (structural unit no. 2).

References

1. Shevchenko V. G., Konyukova A. V., Eselevich D. A., Ananiev A. I., Borshchev Yu. P. Nozzleless solid propellant rocket engine. Patent of the RF № 2707648 from 28.11.2019.

2-22

ОСОБЕННОСТИ РАЗЛОЖЕНИЯ ТЕТРИЛА В РАСТВОРЕ И В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРЕВА

Д. А. Костеров, П. Н. Столяров, Д. Г. Перменов

ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики им. Д. И. Менделеева»,
Москва, Россия

E-mail: stolyarov1946@mail.ru

В данной статье проведен анализ экспериментальных данных, приведенных в литературе, по разложению тетрила в растворе и в условиях линейного нагрева. Анализ данных, полученных в [1] по разложению тетрила в растворе показывает, что, возможно, при выбранных соотношениях тетрил-растворитель происходит неполное растворение тетрила в раство-

рителях во всем температурном диапазоне исследования кинетики разложения тетрила, что не позволяет их корректно обработать. Для данных, полученных для раствора тетрила в тринитроксилале, величина энергии активации на уровне 80 ккал/моль.

При описании экспериментальных кривых уравнением автокатализа первого порядка получено, что скорости разложения в расплаве и в растворе различаются не более чем в 10%. Для кривых разложения раствора тетрила (16,6%) наблюдается наибольшее расхождение между экспериментальными и расчетными кривыми, полученными с использованием уравнения автокатализа первого порядка. Удовлетворительное совпадение кривых наблюдается только при использовании двухстадийной модели



Полученные данные свидетельствуют, что начальные скорости разложения тетрила в расплаве в условиях статического и динамического нагрева близки, максимальная скорость разложения больше начальной примерно в 2,5 раза.

В диапазоне скоростей нагрева 5–15°C/мин значительные изменения в кинетических параметрах уравнения слабо отражаются на изменении формы и положения кривых. Определение величины энергии активации не лучше, чем ± 5 ккал/моль. При этом удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных кривых достигается при использовании двухстадийной модели (два последовательных каталитических цикла).

FEATURES OF TETRYL DECOMPOSITION IN SOLUTION AND UNDER CONDITIONS OF DYNAMIC HEATING

D. A. Kosterov, P. N. Stolyarov, D. G. Permenov

SSC RF Federal State Unitary Enterprise «Central Research Institute of Chemistry and Mechanics named after D. I. Mendeleev», Moscow, Russia

E-mail: stolyarov1946@mail.ru

This article analyzes the experimental data presented in the literature on the decomposition of tetryl in solution and under linear heating conditions. Analysis of the data obtained in [1] on the decomposition of tetryl in solution shows that, possibly, at the selected tetryl-solvent ratios, incomplete dissolution of tetryl in solvents occurs in the entire temperature range of investigating the kinetics of tetryl decomposition, which does not allow their correct processing. For the data obtained for a tetryl solution in trinitroxylene, the activation energy is at the level of 80 kcal/mol.

When describing the experimental curves by the first-order autocatalysis equation, it was found that the decomposition rates in the melt and in the solution differ by no more than 10%. For the curves of the decomposition of a tetryl solution (16.6%), the largest discrepancy is observed between the experimental and calculated curves obtained using the first-order autocatalysis equation. Satisfactory coincidence of the curves is observed only when using the two-stage model



The data obtained indicate that the initial rates of tetryl decomposition in the melt under conditions of static and dynamic heating are close, the maximum decomposition rate is approximately 2.5 times higher than the initial one.

In the range of heating rates 5–15°C/min, significant changes in the kinetic parameters of the equation have little effect on the change in the shape and position of the curves. The determination of the activation energy is no better than ± 5 kcal/mol. In this case, a satisfactory agreement between the experimental and calculated curves is achieved using a two-stage model (two successive catalytic cycles).

2-23

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГОРЕНИЯ ПОРОХА В МАНОМЕТРИЧЕСКОЙ БОМБЕ ПОСТОЯННОГО ОБЪЕМА

А. Ю. Крайнов, В. А. Порязов

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

E-mail: akrainov@ftf.tsu.ru

В манометрической бомбе постоянного объема измеряется скорость горения в условиях меняющегося во времени давления, а также сила пороха. Известно, что скорость нарастания давления в бомбе постоянного объема переменная во времени. Она зависит от плотности заряжания, суммарной площади горения пороховых зерен, меняющейся по мере их выгорания, формы пороховых зерен (пороховые зерна с увеличением горящей поверхности в процессе выгорания (прогрессивной формы), с постоянной площадью и с уменьшающейся площадью горящей поверхности (дегрессивной формы)). Все химические реакции в газовой фазе над поверхностью горения пороха проходят в узкой зоне вблизи поверхности пороха. С повышением давления эта зона приближается к поверхности пороха, увеличивая градиент температуры и тепловой поток к поверхности горения. Мгновенная скорость горения пороха зависит от скорости нарастания давления, так как с повышением давления и скорости горения толщина прогретого слоя в конденсированной фазе уменьшается, поэтому при повышении давления горение пороха происходит как бы в условиях «предварительно прогретого слоя пороха», что приводит к эффекту «ускоренного горения».

Для моделирования горения пороха в условиях постоянного объема разработана физико-математическая модель горения пороха [1], в которой учитываются химические реакции в конденсированной и в газовой фазах. На поверхности горения ставятся граничные условия четвертого рода (условия сопряжения). Результаты расчетов стационарной скорости горения пороха H при постоянном давлении хорошо согласуются с известными экспериментальными данными зависимости скорости горения от давления.

Представлены результаты численного моделирования нестационарного горения пороха при быстром росте давления. Получены количественные данные об отклонении скорости горения при быстром росте давления от стационарных значений скорости горения при соответствующем постоянном давлении.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания № 0721-2020-0036.

Литература

1. Крайнов, А. Ю. Численное моделирование погасания пороха N при резком сбросе давления на основе сопряженной модели горения [Текст] / А. Ю. Крайнов, В. А. Порязов // Физика горения и взрыва. – 2015. – Т. 51, № 6. – С. 47–52.

MATHEMATICAL MODELLING ON UNSTATIONARY COMBUSTION OF GUNPOWDER IN CLOSED EXPLOSIVE BOMB WITH CONSTANT VOLUME

A. Yu. Krainov, V. A. Poryazov

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

E-mail: akrainov@ftf.tsu.ru

We have investigated the rate of the gunpowder combustion in the closed explosive bomb of constant volume. The rate has been measured under the conditions of the time-varying pressure, as well as the strength of the gunpowder.

The rate of the pressure growth in the bomb of the constant volume is variable over time. It depends on the loading density, the total area of the burning powder grains, which changes during the combustion process, the shape of the powder grains (powder grains with the increased burning surface (progressive form), with a constant area and with a decreasing area of the burning surface (degressive form)). All the chemical reactions in the gas phase over the propellant combustion surface take place in a narrow zone near the surface. With increasing pressure, this zone approaches the surface of the propellant, increasing the temperature gradient and heat flux to the combustion surface. The instantaneous combustion rate of the powder depends on the rate of the pressure growth. Since the pressure and burning rate increase, the thickness of the heated layer in the condensed phase decreases, therefore, as the pressure increases, the burning occurs under the conditions of a “pre-heated layer of the powder”, which leads to the effect of the “accelerated combustion”.

To simulate the combustion of the gunpowder in a constant volume, we have developed the physical and mathematical model of the gunpowder combustion [1], which takes into account chemical reactions in the condensed and in the gas phases. There is the conjugation conditions on the combustion surface. The results of the calculations of the steady-state combustion rate of N gunpowder at the constant pressure are in good agreement with the known experimental data on the dependence of the combustion rate on pressure. The paper provides the results of the numerical simulation of the unsteady propellant combustion under the rapid increase in pressure.

We have obtained the quantitative data on the deviation of the combustion rate under the rapid increase in pressure from the stationary values of the combustion rate at the same constant pressure.

The research was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the state assignment No. 0721-2020-0036.

References

1. Krainov, A. Yu. Numerical simulation of the extinction of N powder by a pressure drop based on a coupled combustion model [Text] / A. Yu. Krainov, V.A. Poryazov // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2015. – Vol. 51, No. 6. – P. 47–52.

2-24

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ПЕРВИЧНЫХ ВВ И ИНИЦИИРУЮЩИХ СМЕСЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕПРЕРЫВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Е. С. Манахова¹, В. И. Колесов¹, А. Н. Коновалов²,
В. А. Ульянов², Н. В. Юдин¹

¹Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, Москва, Россия

²Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия

E-mail: manakhovae@muctr.ru

Проведены экспериментальные исследования процесса инициирования ряда первичных взрывчатых веществ: тринитрорезорцината свинца (ТНРС) и азид свинца (АС). А также исследованы инициирующие смеси: перхлорат калия и красная кровяная соль (ПХК/ККС) и нанотермит на основе оксида висмута. Применялись образцы, изготовленные как из чистых веществ, так и из сенсibilизированных добавкой 0,5% наноалюминия (кроме термита).

Иницирование производилось под действием непрерывного ИК лазера мощностью до 10 Вт и длиной волны 0,915 мкм. Варьировалась мощность лазера в диапазоне 1–10 Вт и размер лазерного пятна от 0,15 до 0,5 мм. Проведены экспериментальные исследования временной задержки инициирования.

Смеси инициирующих ВВ с 0,5% наноалюминия имеют время инициирования в десятки раз меньше, чем для чистых материалов. При мощности лазерного излучения 1 Вт и диаметре светового пятна 0,5 мм (интенсивность 0,5 кВт/см²) временная задержка инициирования для составов с наноалюминием составляла 2–10 мс. Самые малые времена задержки при интенсивности более 10 кВт/см² составляют для АС 15–20 мкс, для ТНРС ~100 мкс.

Для инициирующей смеси ПХК/ККС показано, что добавление наноалюминия не приводит к пропорциональному уменьшению времени воспламенения. Эксперименты показали, что для ПХК/ККС и нанотермита существует некоторый предел по минималь-

ной задержке инициирования, он лежит в интервале 0,1–0,15 мс.

Выдвинуто предположение, что данный факт обусловлен микроочаговой природой инициирования. Для воспламенения всего образца требуется, чтобы зона локального разогрева была больше критической зоны воспламенения материала, что особенно актуально для смесевых композиций.

IGNITION OF PRIMARY EXPLOSIVES AND INITIATING MIXTURES EXPOSED TO CONTINUOUS LASER RADIATION

E. S. Manakhova¹, V. I. Kolesov¹, A. N. Kononov²,
V. A. Ulyanov², N. V. Yudin¹

¹Mendeleev University of Chemical Technology,
Moscow, Russia

²Federal Research Center “Crystallography and Photonics”
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: manakhovae@muctr.ru

Experimental studies of the initiation process of a number of primary explosives have been carried out: lead styphnate (LS) and lead azide (LA). The initiating mixtures were also studied: potassium perchlorate, potassium hexacyanoferrate (III) (PP/PH) and nanotermite based on bismuth oxide. We used samples made from both pure substances and sensitized with the addition of 0.5% nanoaluminum (except for termite).

Initiation was carried out under the action of a CW IR laser with a power of up to 10 W and a wavelength of 0.915 μm . The laser power was varied in the range of 1–10 W and the laser spot size was from 0.15 to 0.5 mm. Have been carried out the experimental studies of the initiation time delay.

Mixtures of initiating explosives with 0.5% nanoaluminum have an initiation time ten times less than for pure materials. At a laser power of 1 W and a light spot diameter of 0.5 mm (intensity 0.5 kW/cm²), the initiation time delay for compositions with nanoaluminum was 2–10 ms. The most small delay times at an intensity of more than 10 kW/cm² are 15–20 μs for LA 15–20 μs , for LS ~100 μs .

It was shown for the initiating mixture (PP/PH) that the addition of nanoaluminum does not lead to a proportional decrease in the ignition time. Experiments have shown that for (PP/PH) and nanothermite there is a certain limit on the minimum initiation delay, it lies in the range of 0.1–0.15 ms.

It has been suggested that this fact is due to the micro-hotspot nature of initiation. To ignite the entire sample, it is required that the local heating zone be larger than the critical ignition zone of the material, which is especially important for mixed compositions.

2-25

МОДЕЛЬ ВЗРЫВЧАТОГО РАЗЛОЖЕНИЯ СЛАБОПОГЛОЩАЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЕ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ МЕТАЛЛОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАНОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Д. Р. Нурмухаметов, Б. П. Адуев

ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии» СО РАН, Кемерово, Россия

E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

В работе предложена экспериментально обоснованная модель взрывчатого разложения композитов на основе слабопоглощающих излучение БВВ (PETN, RDX) с включениями ультрадисперсных металлических частиц (Al, Ni, Fe) при лазерном инициировании (1064 нм, 532 нм, 14 нс). Модель включает следующие этапы: а) поглощение лазерного излучения включениями вызывает их нагрев и прилегающих слоев БВ – включение и ее нагретое окружение БВ представляют собой «горячую точку»; б) для каждого типа включений существуют массовая доля и размер, при которых порог лазерного инициирования взрывчатого разложения минимален; в) в этом случае происходит диссоциация молекулы БВ на возбужденный радикал и остаточный радикал; г) в остаточном радикале протекает экзотермическая химическая реакция, приводящая к превращению его в газообразные продукты; д) при оптимальной массовой доле и оптимальных размерах включений поглощение лазерной энергии происходит в поверхностном слое (~50 мкм) образца, в «горячих точках» происходит повышение температуры и давления в облученном слое, что приводит к возникновению ударной волны и распространению ее в необлученную часть образца – развитие взрывчатого разложения в необлученном слое образца происходит по ударно-волновому механизму; е) необходимым условием является блокирование газодинамической разгрузки образца – это позволяет изменять порог взрывчатого разложения в широких пределах.

Предложенная модель позволяет сформулировать критерий получения материалов на основе слабопоглощающих излучение БВВ с включениями ультрадисперсных металлических частиц с минимальными плотностями энергии инициирования. Критерий включает следующие этапы: а) расчет коэффициента эффективности поглощения в зависимости от типа включений и их размера в матрице определенного БВВ выбранной плотности на необходимой длине волны лазерного излучения; б) определение размера включений в максимуме полученной зависимости; в) проведение оптико-акустических измерений зависимости амплитуды акустического сигнала от массовой доли включений; г) определение оптимальной массовой доли включений, соответствующей максимуму зависимости; д) использование образцов с включениями металла с оптимальными размерами и оптимальной массовой долей во взрывчатых экспериментах,

которые дадут минимальный порог лазерного инициирования взрыва при выбранной плотности ВВ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-03-00421 А, в рамках гос. задания ИУХМ ФИЦ УУХ СО РАН (проект 121031500513-4)

**MODEL OF THE EXPLOSIVE DECOMPOSITION
OF THE LOW-ABSORBING RADIATION
EXPLOSIVES
WITH THE INCLUSIONS
OF ULTRADISPERSED PARTICLES
OF METALS UNDER THE IMPACT
OF NANOSECOND LASER PULSES**

D. R. Nurmukhametov, B. P. Aduiev

Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry SB RAS,
Kemerovo, Russia

E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

The paper proposes an experimentally substantiated model of explosive decomposition of composites based on low-radiation-absorbing HE (PETN, RDX) with inclusions of ultradispersed metal particles (Al, Ni, Fe) during laser initiation (1064 nm, 532 nm, 14 ns). The model includes the following stages: a) the absorption of laser radiation by the inclusions causes their heating and the adjacent explosive layers – the inclusion and its heated environment of the explosive represent a “hot spot”; b) for each type of inclusions, there is a mass fraction and a size at which the threshold for laser initiation of explosive decomposition is minimal; c) in this case, the dissociation of the explosive molecule into an excited radical and a residual radical occurs; d) an exothermic chemical reaction occurs in the residual radical, leading to its transformation into gaseous products; e) at the optimal mass fraction and optimal sizes of inclusions, the absorption of laser energy occurs in the surface layer (~50 μm) of the sample, in the “hot spot” there is an increase in temperature and pressure in the irradiated layer, which leads to the appearance of a shock wave and its propagation into the unirradiated part sample – the development of explosive decomposition in the unirradiated layer of the sample occurs according to the shock-wave mechanism; f) a prerequisite is blocking the gas-dynamic unloading of the sample – this allows the explosive decomposition threshold to be changed over a wide range. The proposed model makes it possible to formulate a criterion for obtaining materials based on low-radiation-absorbing HE with inclusions of ultradispersed metal particles with minimal initiation energy densities. The criterion includes the following stages: a) calculation of the absorption efficiency factor depending on the type of inclusions and their size in the matrix of a certain HE of the selected density at the required wavelength of laser radiation; b) determination of the size of inclusions in the maximum obtained dependence; c) carrying out optical-acoustic measurements of the dependence of the amplitude of the acoustic signal on the mass fraction of inclusions; d) determination of the optimal mass fraction of inclusions corresponding to the maximum dependence; e) the use of samples with metal inclusions with optimal

dimensions and optimal mass fraction in explosive experiments, which will give the minimum threshold for laser initiation of an explosion at the selected explosive density.

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 18-03-00421 А, within the framework of the state assignment of the FRC CCC SB RAS (project 121031500513-4).

2-26

**ДВУХСТАДИЙНАЯ МОДЕЛЬ
КОНДЕНСАЦИИ УГЛЕРОДА**

И. А. Рубцов

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

E-mail: rubtsov@hydro.nsc.ru

Проблема роли конденсации углерода при детонации взрывчатых веществ – один из обсуждаемых элементов кинетики детонационного процесса [1–4]. В настоящее время для ее изучения интенсивно развивается методика малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) синхротронного излучения (СИ) [3–4].

В настоящей работе исследовался процесс конденсации углерода при детонации смеси тротила с гексогеном для зарядов разного диаметра. Эксперименты проводились на новой экспериментальной станции, где в качестве источника СИ использовался ускорительный комплекс ВЭПП-4М (ИЯФ СО РАН). Регистрация сигналов МУРР проводилась новой модификацией детектора DIMEX-3.

При детонации зарядов тротил-гексогеновой смеси наблюдается две стадии конденсации углерода. В первой, быстрой, за время менее 1 мкс формируются частицы размером 4–6 нм. Различить ее длительность на сегодняшний момент не удастся. Во второй, более медленной стадии за несколько микросекунд из частиц углерода формируются разреженные кластеры, с характерным средним размером десятки нанометров.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-90028.

Литература

1. **Tarver, Craig M.** Detonation waves in triaminotrinitrobenzene [Text] / Craig M. Tarver, John W. Kury, R. Don Breithaupt // J. Appl. Phys. – 1997. – Vol. 82, No 8. – P 3771–3782.
2. **Grebenkin, K. F.** Computer modeling of scale effects at heterogeneous HE detonation [Text] / K. F. Grebenkin, M. V. Taranik, A. L. Zherebtsov // Proc. 13th Symposium (International) on Detonation, Norfolk, USA – 2006. – P. 496–505
3. **Rubtsov, I. A.** Carbon Condensation During Detonation of High Explosives of Various Diameters [Text] / I. A. Rubtsov, K. A. Ten, V. M. Titov, E. R. Prueel, A. Kashkarov, S. I. Kremenko, B. P. Tolochko // 16th International Detonation Symposium, July 15-20, 2018, Cambridge, Maryland, USA : Proceedings – Office of Naval Research. – 2019. – P. 735–739.

4. **Watkins, E. B.** Evolution of Carbon Clusters in the Detonation Products of the Triamino-Trinitro-Benzene (TATB)-Based Explosive PBX 9502 [Text] / E. B. Watkins, K. A. Velizhanin, D. M. Dattelbaum, R. L. Gustavsen, T. D. Aslam, D. W. Podlesak, R. C. Huber, M. A. Firestone, B. S. Ringstrand, T. M. Willey, M. Bagge-Hansen, R. L. Hodgins, L. Lauderbach, A. van Buuren, N. Sinclair, P. A. Rigg, S. Seifert, T. Gog. // *J. Phys. Chem. C*, Just Accepted Manuscript DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b05637.

TWO-STAGE CARBON CONDENSATION MODEL

I. A. Rubtsov

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: rubtsov@hydro.nsc.ru

The problem of carbon condensation role during the detonation of explosives is one of the discussed elements of the kinetics of the detonation process [1-4]. Currently, the method of small-angle X-ray scattering (SAXS) of synchrotron radiation (SR) is being intensively developed for its study [3-4].

In this paper, we studied the process of carbon condensation during the detonation of a mixture of TNT and RDX for charges of different diameters. The experiments were carried out at new experimental endstation, where the VEPP-4M accelerator complex (BINP SB RAS) was used as a SR source. The registration of the time resolved SAXS signals was carried out by a new modification of the DIMEX-3 detector.

When detonating charges of a TNT/RDX mixture, two stages of carbon condensation are observed. In the first, fast one, particles of 4–6 nm in size are formed in a time of less than 1 microsecond. It is not possible to distinguish its duration at the moment. In the second, slower stage, rarefied clusters are formed from carbon particles in a few microseconds.

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 20-33-90028.

References

1. **Tarver, Craig M.** Detonation waves in triaminotrinitrobenzene [Text] / Craig M. Tarver, John W. Kury, R. Don Breithaupt // *J. Appl. Phys.* – 1997. – Vol. 82, No 8. – P 3771–3782.
2. **Grebenkin, K. F.** Computer modeling of scale effects at heterogeneous HE detonation [Text] / K. F. Grebenkin, M. V. Taranik, A. L. Zherebtsov // Proc. 13th Symposium (International) on Detonation, Norfolk, USA – 2006. – P. 496–505
3. **Rubtsov, I. A.** Carbon Condensation During Detonation of High Explosives of Various Diameters [Text] / I. A. Rubtsov, K. A. Ten, V. M. Titov, E. R. Prueel, A. Kashkarov, S. I. Kremenko, B. P. Tolochko // 16th International Detonation Symposium, July 15-20, 2018, Cambridge, Maryland, USA : Proceedings – Office of Naval Research. – 2019. – P. 735–739.
4. **Watkins, E. B.** Evolution of Carbon Clusters in the Detonation Products of the Triamino-Trinitro-Benzene (TATB)-Based Explosive PBX 9502 [Text] / E. B. Watkins, K. A. Velizhanin, D. M. Dattelbaum, R. L. Gustavsen, T. D. Aslam, D. W. Podlesak, R. C. Huber, M. A. Firestone, B. S. Ringstrand, T. M. Willey, M. Bagge-Hansen, R. L. Hodgins, L. Lauderbach, A. van Buuren, N. Sinclair, P. A. Rigg, S. Seifert, T. Gog. // *J. Phys. Chem. C*, Just Accepted Manuscript DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b05637.

2-27

АНАЛИЗ СОСТАВА ПРОДУКТОВ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ РАЗЛОЖЕНИЯ И ВЗРЫВЧАТОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ СВЕРХЧИСТЫХ ОБРАЗЦОВ ГЕКСОГЕНА, ОКТОГЕНА И 2,4-ДИНИТРОАНИЗОЛА

А. Х. Рудина, А. В. Станкевич, Н. П. Тайбинов,
О. В. Костицын, А. Ю. Гармашев

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Исследования продуктов химических реакций разложения и взрывчатого превращения энергетических материалов позволяют оценить их работоспособность в технических устройствах и сроки хранения в определенных условиях. Важно разделить вклад газообразных и конденсированных продуктов реакций. Для технического использования в различных смешанных композициях широкое распространение получили гексоген и октоген, интерес проявляется также к 2,4-динитроанизолу, как компоненту легкоплавких систем.

В настоящей работе проведены исследования продуктов реакций разложения и взрывчатого превращения трех индивидуальных химических соединений. Вещества предварительно подвергались глубокой очистке. Показаны реакции взаимодействия продуктов распада, уточнен механизм их распада. Результаты исследований представлены в виде схем физико-химических процессов.

ANALYZING THE COMPOSITION OF ULTRA-PURE RDX, HMX, AND 2,4-DINITROANISOLE SAMPLES AS PRODUCTS OF CHEMICAL REACTIONS OF DECOMPOSITION AND EXPLOSIVE TRANSFORMATION

A. Kh. Rudina, A. V. Stankevich, N. P. Taibinov,
O. V. Kostitsyn, A. Yu. Garmashev

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

The study of the chemical reactions of decomposition and explosive transformation of energetic materials allows evaluating their operability in technical devices and storage terms under certain conditions. It is important to differentiate the contributions of gas and condensed reaction products. RDX and HMX are commonly used for technical purpose in various compounds. 2,4-dinitroanisole is also attractive as a component of low-melting systems.

The work presents the study of three separate chemical compounds as products of the reactions of disintegration and explosive transformation. The matters were preliminary subject to deep purification. The reactions of interaction of disintegration products are shown, and the

mechanism of their disintegration is clarified. The findings are presented as schemes depicting physicochemical processes.

2-28

**АНАЛИЗ СОСТАВА ПРОДУКТОВ
И КИНЕТИКА ХИМИЧЕСКИХ
РЕАКЦИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА
С БОРОМ И КРЕМНИЕМ**

А. Х. Рудина, А. В. Станкевич, Б. Г. Лобойко,
Н. П. Тайбинов, О. В. Костицын, А. Ю. Гармашев

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Широкое распространение в технических устройствах получили фторсодержащие полимерные материалы, в том числе и при создании смесевых энергетических веществ. Стоит отметить, что политетрафторэтилен несмотря на высокие показатели термической стойкости представляет собой окислительный компонент, который, при определенных условиях, вступает в реакции взаимодействия с сильными восстановителями.

В данной работе проведены исследования механизмов и направлений протекания окислительно-восстановительных химических реакций взаимодействия политетрафторэтилена с бором и кремнием. Образование фторидов и оксифторидов бора с промежуточным формированием фторидов углерода проводились с помощью оригинальных методик, основанных на измерениях методами высокотемпературной динамической масс-спектрометрии. В результате составлены схемы физико-химических процессов протекающих при взаимодействии политетрафторэтилена с бором или кремнием при различных скоростях реакций.

**ANALYSIS OF THE COMPOSITION
OF PRODUCTS AND KINETICS
OF CHEMICAL REACTIONS OF INTERACTION
OF POLYTETRAFLUORETHYLENE
WITH BORON AND SILICON**

A. Kh. Rudina, A. V. Stankevich, B. G. Loboiko,
N. P. Taibinov, O. V. Kostitsyn, A. Yu. Garmashev

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

Fluorinated polymer materials became widespread in technical devices. They are also used extensively in producing blends of energetic materials. It should be noted that polytetrafluorethylene (PTFE) notwithstanding its high thermal stability is an oxidizer which interreacts with strong deoxidizing agents under certain conditions.

In this work, we studied the oxidation-reduction chemical reactions in terms of mechanisms and pathways of the PTFE interaction with boron and silicon. Fluorides and boron oxyfluorides, as well as the intermediately formed fluorides were produced by novel techniques based on high-temperature dynamic mass-spectrometry. Our effort resulted in the schemes of physicochemical processes running in the course of the PTFE-boron/silicon interaction at various rates of the reactions.

2-29

**ХРОМАТО-МАСС
И МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ
2,4-ДИНИТРОАНИЗОЛА**

А. Х. Рудина¹, А. В. Станкевич¹, В. И. Филякова²,
Г. Л. Русинов², Н. П. Тайбинов¹, О. В. Костицын¹

¹Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²Институт органического синтеза им. И. Я. Постовского
УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Разработаны эффективные методики анализа физико-химических свойств и химической чистоты 2,4-динитроанизола методами хромато-масс- и масс-спектрометрии. Исходное химическое соединение 2,4-динитроанизол, используемое как легкоплавкий компонент смесевых энергетических материалов, было синтезировано методом алкоголиза 2,4-динитрохлорбензола. Проведены исследования химической чистоты синтезированного продукта и многостадийная очистка. Исследованы термодинамические свойства и алгоритмы разложения молекул 2,4-динитроанизола при различных видах воздействия на сверхчистые образцы.

Установлено, что максимальная концентрация молекулярного иона проявляется при энергиях эквивалентного электронно-теплого воздействия, соответствующего значениям от 15 до 30 эВ. При больших энергиях ионизации идентификация молекул усложняется вторичными актами распада.

**CHROMATO-MASS-SPECTROMETRY
AND MASS-SPECTROMETRY
OF 2,4-DINITROANISOLE**

A. Kh. Rudina¹, A. V. Stankevich¹, V. I. Philyakova²,
G. L. Rusinov², N. P. Taibinov¹, O. V. Kostitsyn¹

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

²Institute of Organic Synthesis named after I. Ya. Postovskiy,
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ekaterinburg, Russia

The effective techniques have been designed for analysis of physicochemical properties and chemical purity of 2,4-dinitroanisole using chromato-mass-spectrometry and mass-spectrometry. The starter chemical compound

2,4-dinitroanisole used as a low-melting component of mixed energetic materials was synthesized by 2,4-dinitrochlorobenzene alcoholysis. The analysis of synthesized product chemical purity and multistage purification were carried out. Thermodynamic properties and algorithms of 2,4-dinitroanisole molecule decomposition were studied under different effects on ultra-pure specimens.

It is found that the peak concentration of a molecular ion becomes apparent at energies of equivalent electron-heat impact corresponding to values from 15 to 30 eV. In the case of high ionization energies, the molecule identification is complicated by secondary disintegration events.

2-30

ДЕТАЛИЗАЦИЯ КИНЕТИКИ ТВЕРДЫХ ВВ

Н. П. Сатонкина¹, В. Ю. Долматов², А. О. Кашкаров¹,
Г. К. Образцов³, Н. А. Хлебановский³

¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, Россия

²Специальное конструкторско-технологическое бюро
«Технолог», Санкт-Петербург, Россия

³Новосибирский государственный университет,
Новосибирск, Россия

E-mail: snp@hydro.nsc.ru

Кинетика химических реакций при детонации конденсированных взрывчатых веществ вызывает постоянный интерес с момента появления понятия «зона реакции» [1]. В настоящее время получило широкое распространение моделирование перехода ударно-волнового воздействия в детонацию по тепловому механизму. При этом, детали моделей разных авторов могут сильно отличаться [2]. В работе [3] проведены расчеты эволюции горячих точек, для увеличения скорости роста горячих очагов предложен турбулентный механизм переноса энергии. Турбулентность должна приводить к относительно равномерному распределению элементов по продуктам. В работе [4] проведено исследование смеси из ВВ с резко отличающимися характеристика, получено влияние размера зерна исходных веществ, что указывает на перемешивание в продуктах на границе раздела двух веществ, причем глубина перемешивания составляет величину около мкм.

В настоящей работе предложена интерпретация экспериментальных данных, полученных методом электропроводности, исследованием сохраненных продуктов детонации смеси бензотрифуроксан/гексоген 50/50, перемешанных на микронном уровне, и данных по допированному бором и фосфором детонационных наноалмазов.

Работа выполняется при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Минобрнауки России, соглашение в системе «Электронный бюджет» № 075-15-2020-781.

Литература

1. Зельдович, Я. Б. К теории распространения детонации в газообразных системах [Текст] // Журнал эксперимен-

тальной и теоретической физики. – 1940. – Т. 10, № 5. – С. 542–568.

2. Rai, N. K. Evaluation of reaction kinetics models for meso-scale simulations of hotspot initiation and growth in HMX [Text] / N. K. Rai, S. P. Koundinyan, O. Sen, I. V. Schweigert, B. F. Henson, H. S. Udaykumar // *Combustion and Flame*. – 2020. – Vol. 219. – P. 225–241.

3. Карпенко, И. И. Расчет скорости роста горячих очагов в процессе детонации с учетом турбулентного механизма передачи энергии [Текст] / И. И. Карпенко, В. Г. Морозов, О. Н. Чернушова, Ю. В. Янилкин // *Химическая физика*, 2008. – Т. 27, № 3. – С. 16–20.

4. Ершов, А. П. Исследование взаимодействия компонентов гетерогенных взрывчатых веществ методом электропроводности [Текст] / А. П. Ершов, Н. П. Сатонкина, О. А. Дибиров, С. В. Цыкин, Ю. В. Янилкин // *Физика горения и взрыва*. – 2000. – Т. 36, № 5. – С. 97–108.

DETAILED KINETICS OF SOLID HIGH EXPLOSIVES

N. P. Satonkina¹, V. Yu. Dolmatov², A. O. Kashkarov¹,
G. K. Obraztsov³, N. A. Khlebanovsky³

¹Lavrentev Institute of Hydrodynamics SB RAS,
Novosibirsk, Russia

²Special Design and Technology Bureau “Tekhnolog”,
St. Petersburg, Russia

³Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia
E-mail: snp@hydro.nsc.ru

The kinetics of chemical reactions during the detonation of condensed explosives is of constant interest since the appearance of the concept of “reaction zone” [1]. At present, the simulation of the transition of shock-wave action to detonation by the thermal mechanism has become widespread. At the same time, the details of models of different authors may differ greatly [2]. In [3], the calculations of the evolution of hot spots were carried out; to increase the growth rate of hot spots, a turbulent energy transfer mechanism. Turbulence should result in a relatively even distribution of elements throughout the products. In [4], a study of a mixture of explosives with sharply differing characteristics was carried out, the effect of the grain size of the initial substances was obtained, which indicates mixing in the products at the interface between the two substances, the mixing depth being about μm .

In this work, we propose an interpretation of the experimental data obtained by the electrical conductivity method, the study of the stored detonation products of a benzotrifuroxane / RDX 50/50 mixture, mixed at the micron level, and data on detonation nanodiamonds doped with boron and phosphorus.

The work is carried out with the financial support of the Russian Federation represented by the Ministry of Education and Science of Russia, agreement in the “Electronic Budget” system No. 075-15-2020-781.

References

1. Zel'dovich, Ya. B. On the Theory of Detonation Propagation in Gaseous Systems [Text] // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. – 1940. – Vol. 10, № 5. – Pp. 542–568.

2. **Rai, N. K.** Evaluation of reaction kinetics models for meso-scale simulations of hotspot initiation and growth in HMX [Text] / N. K. Rai, S. P. Koundinyan, O. Sen, I. V. Schweigert, B. F. Henson, H. S. Udaykumar // *Combustion and Flame*. – 2020. – Vol. 219. – P. 225–241.

3. **Karpenko, I. I.** Calculation of the growth rate of hot foci during detonation with taking into account the turbulent mechanism of energy transfer [Text] / I. I. Karpenko, V. G. Morozov, O. N. Chernushova, Yu. V. Yanilkin // *Chemical Physics*. – 2008. – Vol. 27, No. 3. – P. 16–20.

4. **Ershov, A. P.** A study of the interaction between the components of heterogeneous explosives by the electrical-conductivity method [Text] / A. P. Ershov, N. P. Satonkina, O. A. Dibirov, S. V. Tsykin, Yu. V. Yanilkin // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2000. – Vol. 36. – P. 639–649.

Была проведена серия экспериментов с клиньями из ВВ пористостью $\approx 1,5\%$, граничащих с пластинами из ПММА (оргстекло), магния, алюминия, бериллия и меди.

THE INFLUENCE OF DYNAMIC RIGIDITY OF SHELL ON LOW-SENSITIVE HE DETONATION

M. A. Sokolov, S. M. Dolgikh, E. B. Smirnov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: sokolovm1982@mail.ru

Critical thickness of detonation is one of the determinant features characterizing HE detonability. Critical thickness of detonation is not a constant value; it depends on different factors attributed to both technologies of HE manufacturing, and conditions of its application.

In addition to the pragmatic concern, studying the critical conditions of detonation propagation including the critical thickness of detonation is of great importance from a fundamental point of view. Under the near-critical detonation propagation conditions that are being created when the detonation value approaches its critical thickness, the primary factors for the chemical reaction kinetics in the detonation wave show up vividly. The influence and contribution of these factors are most readily found for the explosives characterized by large critical thickness of detonation. Triamino trinitrobenzene (TATB)-based high explosives are fine examples of such explosives. In this work, the experiments were used to obtain the value of the critical detonation thickness using TATB-based high explosive in contact with materials of various dynamic rigidity (ρc).

The “longitudinal-wedge” and “cross-wedge” methods have commonly been used to determine the critical thickness of HE detonation. The present paper describes the studies based on the “cross-wedge” method combined with recording of the detonation attenuation point by the glow interruption in the plexiglass cutoff. The HE wedges with a porosity of $\approx 1.5\%$ adjoining the PMMA, magnesium, aluminum, beryllium, and copper plates were used to perform a series of experiments.

2-31

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ ОБОЛОЧКИ НА КРИТИЧЕСКУЮ ТОЛЩИНУ ДЕТОНАЦИИ НИЗКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ВВ

М. А. Соколов, С. М. Долгих, Е. Б. Смирнов

Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия

E-mail: sokolovm1982@mail.ru

Критическая толщина детонации – одна из важных характеристик взрывчатых веществ, определяющая его детонационную способность. Критическая толщина детонации – величина не постоянная и зависит от различных факторов, связанных как с технологией изготовления, так и с условиями применения ВВ.

Исследование критических условий распространения детонации, в том числе критической толщины детонации, кроме прагматического интереса имеет важное фундаментальное значение. В области околокритических условий распространения детонации, реализующихся при приближении к критической толщине детонации, в значительной степени проявляются факторы, определяющие кинетику протекания химической реакции в детонационной волне. Влияние этих факторов и их роль легче всего обнаруживается для взрывчатых веществ, обладающих большой критической толщиной детонации. Яркими представителями таких взрывчатых веществ являются ВВ на основе триаминотринитробензола (ТАТБ). В данной работе экспериментально определялась величина критической толщины детонации ВВ на основе ТАТБ находящегося в контакте с материалами, различающимися динамической жесткостью (ρc).

Для определения критической толщины детонации ВВ традиционно используются методики «продольного» и «поперечного» клина. В данной работе исследования проводились по методике «поперечного» клина с регистрацией места затухания детонации по прерыванию свечения в оргстеклянной отсечке.

2-32

ТЕНЗОРЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ СВЕРХЧИСТЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КРИСТАЛЛОВ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

А. В. Станкевич, Е. Б. Смирнов, Н. П. Тайбинов,

О. В. Костицын, А. Ю. Гармашев

Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия

Закономерной ответной реакцией вещества на термическое воздействие является расширение или сжатие. Не рассматривая элементарных актов моле-

кулярного распада и медленных химических взаимодействий, описание процессов термической деформации можно рассматривать в рамках классических теорий физики твердого тела, а описание процессов представлять в тензорном виде или в виде уравнений состояния. Очевидно, что некоторый вклад в термическую деформацию молекулярных кристаллов вносят примеси. Получение и исследование сверхчистых веществ позволяет приблизиться как к первопринципным расчетам индивидуальных веществ с целью их верификации, так и исследовать вклад примесей в свойства вещества.

В данной работе выполнена глубокая очистка некоторых молекулярных кристаллов энергоёмких соединений. Проведен рентгеноструктурный эксперимент для определения кристаллического состояния веществ при конечных температурах. Измерения термической деформации проводилось методом терморентнографии внутреннего стандарта на порошкообразных образцах в диапазоне от 150 до 550 К, с шагом 10 К. Проведено совмещение некоторых экспериментальных точек с результатами монокристалльных измерений, и последующая калибровка кривой квазиизобарического расширения частиц порошка. В результате получены более точные оценки коэффициентов анизотропного термического расширения молекулярных кристаллов исследуемых энергетических веществ, а также проведен предварительный анализ вклада дефектов кристаллической структуры и их смещение.

THERMAL STRAIN TENSORS OF ULTRA-PURE MOLECULAR CRYSTALS OF HIGH-ENERGY COMPOUNDS

A. V. Stankevich, E. B. Smirnov, N. P. Taibinoy,
[O. V. Kostitsyn], A. Yu. Garmashev

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

The regular response of a matter to thermal action includes expansion or compression. If elementary events of molecular disintegration and slow chemical interactions are not considered, thermal strain processes can be described in terms of classical solid-state physics theories and represented in terms of tensors or equations of state. It is evident that impurities somehow contribute to thermal strain of molecular crystals. Preparation and study of ultra-pure matters allow both addressing ab initio calculations of individual matters to validate them and investigating the contribution of impurities into properties of a matter.

In the course of the work, a deep purification of certain molecular crystals of high-energy compounds was performed. An X-ray diffraction experiment was carried out to determine matters' crystalline states at finite temperatures. The thermal strain was measured through thermal radiography according to internal standard using powdered samples within 150 to 550 K with 10 K increment. Certain experimental points were correlated with the results of single-crystal measurements, and the curve of quasi isobaric expansion of powder particles was sub-

sequently calibrated. As a result, more accurate estimates of anisotropic thermal expansion of molecular crystals of the energetic materials under study were derived, and the preliminary analysis of crystalline structure defects' contribution and of their shift was performed.

2-33

АНАЛИЗ ЦЕПНЫХ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ РАЗЛОЖЕНИЯ И ВЗРЫВЧАТОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ СВЕРХЧИСТЫХ ОБРАЗЦОВ ТЭНА, БЕНЗОТРИФУРОКСАНА, ТРИАМИНОТРИНитРОБЕНЗОЛА, ДИАМИНОДИНИТРОЭТИЛЕНА И 2,4,6-ТРИНИТРОТОЛУОЛА

A. V. Stankevich, A. X. Rudina, N. P. Taibinoy,
[O. V. Kostitsyn], A. Yu. Garmashev

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Самоподдерживающиеся реакции взрывчатого превращения и некоторые реакции разложения относятся к цепным химическим реакциям. Детальный анализ механизмов и направления протекания подобных процессов позволяет оценивать термодинамические и молекулярно-кинетические свойства рабочего тела-газа, его разогрев и инерционные свойства. Разделение вкладов конденсированных и газообразных продуктов реакций также играет важную роль при оценке газодинамических свойств веществ.

В данной работе проведены исследования цепных химических реакций для пяти сверхчистых энергоёмких соединений, которые получили широкое распространение в технических устройствах. Результаты исследований представлены в виде схем физико-химических процессов. Исследования проводились методами масс-спектрометрии, хроматографии и спектроскопии комбинационного рассеяния света.

ANALYZING THE CHEMICAL CHAIN REACTIONS OF DECOMPOSITION AND EXPLOSIVE TRANSFORMATION FOR ULTRA-PURE SAMPLES OF PETN, BENZOTRIFUROZANE, TRIAMINOTRINITROBENZENE, DIAMINODINITRIETHYLENE, AND 2,4,6-TRINITROTOLUENE

A. V. Stankevich, A. Kh. Rudina, N. P. Taibinoy,
[O. V. Kostitsyn], A. Yu. Garmashev

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

Self-sustaining reactions of explosive transformation and certain reactions of decomposition refer to the chemical chain reactions. An in-depth study of mechanisms and

directions of such processes allow evaluating thermodynamic and molecular-kinetic properties of working substance, gas, its heating, and inertial properties. Differentiating contributions of condensed and gaseous reaction products is critical when evaluating gas-dynamic material properties.

In the work, chemical chain reactions are investigated for five ultra-pure energy-rich compounds, widely used in technical devices. The findings are presented as schemes of physicochemical processes. Mass-spectrometry, chromatography, and Raman scattering spectroscopy methods were applied in the study.

2-34

**ДЕТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ
СОСТАВА ПРОДУКТОВ И КИНЕТИКА
ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ФТОРИДА КОБАЛЬТА (III)
С БОРОМ И КРЕМНИЕМ**

А. В. Станкевич, А. Х. Рудина, Б. Г. Лобойко,
Н. П. Тайбинов, А. Ю. Гармашев

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Химические взаимодействия окислителя и горючего компонента смеси представляют определенный интерес в различных областях материаловедения и технической физике, как в случаях образования конденсированных продуктов реакций – горение металлов, образование интерметаллидов и других более сложных по составу химических соединений в процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, так и в случае формирования газообразных продуктов, позволяющих создавать, например, импульсные химические лазеры.

В данной работе проведены исследования механизмов образования фторидов и оксифторидов бора и фторидов кремния в реакциях взаимодействия фторида кобальта (III) с бором и кремнием. Исследования проводились оригинальными методиками, основанными на измерениях методами масс-спектрометрии и спектроскопии комбинационного рассеяния света. Установлены концентрационные пределы взаимодействия компонентов для максимального образования целевых продуктов. Механизмы реакций записаны в виде схем физико-химических процессов.

**IN-DEPTH ANALYSIS OF REACTION PRODUCT
COMPOSITION AND CHEMICAL REACTION
KINETICS FOR COBALT (III) WITH BORON
AND SILICON**

A. V. Stankevich, A. Kh. Rudina, B. G. Loboiko,
N. P. Taibinov, A. Yu. Garmashev

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

Chemical interactions of oxidizer and combustible component of a mixture are of particular interest for various fields of material science and engineering physics both in the cases of condensed reaction products formation (combustion of metals, formation of intermetallides and other chemical compounds, more complicated in terms of composition, in the processes of self-propagating high-temperature synthesis) and of gaseous products formation which allow to create, for instance, pulsed chemical lasers.

In the work, the mechanisms of formation of boron fluorides and oxyfluorides and silicon fluorides in the reactions of cobalt (III) fluoride interaction with boron and silicon were studied. In the study, original techniques were used based on the measurements through mass-spectrometry and Raman scattering spectroscopy methods. Concentrations limits are established for the interaction between the components for the purpose of formation of maximum target products. The reaction mechanisms are presented as schemes of physicochemical processes.

2-35

**РЕНТГЕНОФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ
МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ
АМОРФНО-НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ
КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ МОЛЕКУЛЯРНЫХ
КРИСТАЛЛОВ**

А. В. Станкевич, А. Р. Бакиров, Н. П. Тайбинов,
О. В. Костицын, А. Ю. Гармашев

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Развитие методов рентгеновской дифрактометрии привело к формированию множества алгоритмов обработки экспериментальных данных, полученных в различных схемах их регистрации. Так, например, в полнопрофильной обработке проводятся оценки степени кристалличности композиционных материалов, исследуются нанодисперсные и наноструктурированные вещества. Наиболее сложной математической задачей является оценка свойств каждого из компонентов, входящих в состав рентгеноаморфных наноструктурированных композитов с малой рассеивающей способностью.

В данной работе представлен алгоритм решения структурной и фазовой задач оценки компонентно-

го состава в сложных для рентгеновской дифрактометрии случаях. Применение различных условий регистрации дифракционных данных в сочетании с оригинальными методами сопряжения полнопрофильного анализа и квантово-топологических моделей позволило расширить информативность методов рентгеновской дифрактометрии для исследования аморфно-нанокристаллических композитов на основе многоатомных молекулярных кристаллов.

**X-RAY PHASE ANALYSIS
OF MULTICOMPONENT
AMORPHOUS-NANOCRYSTALLINE
COMPOSITES BASED
ON MOLECULAR CRYSTALS**

A. V. Stankevich, A. R. Bakirov, N. P. Taibinov,
[O. V. Kostitsyn], A. Yu. Garmashev

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

Improvement of X-ray diffractometry methods has resulted in plenty of algorithms elaborated to process experimental data obtained through various recording techniques. For instance, on full-profile processing, crystallinity of composite materials is evaluated, nanodispersive and nanostructured materials are investigated. The most complicated mathematical problem is evaluating the properties of each component making part of X-ray amorphous nanostructured composite materials with low dispersive capacity.

The work presents the algorithm to resolve structure and phase problems to evaluate component composition in the cases, challenging for X-ray diffractometry. The use of various conditions when recording diffraction data in combination with original methods of conjugating full-profile analysis and quantum topological models allowed improving information value and completeness of X-ray diffractometry to study amorphous-nanocrystalline composites based on polyatomic molecular crystals.

2-36

**ДЕТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ
СОСТАВА ПРОДУКТОВ
И МЕХАНИЗМ ЦЕПНЫХ РЕАКЦИЙ РАСПАДА
ДИАМИНОТЕТРАЗИНТРИАЗОЛА ПРИ
ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ
СО СКОРОСТЯМИ ДО 2000 К/с**

А. В. Станкевич¹, Г. Л. Русинов², С. Г. Толщина²,
И. В. Чемагина¹, Н. П. Тайбинов¹

¹Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забахина,
Снежинск, Россия

²Институт органического синтеза им. И. Я. Постовского
УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Исследование механизмов протекания химических реакций при разложении энергоемких соедине-

ний привлекает внимание исследователей в области физической химии. Очевидно, что направления протекания реакций влияют на многие термодинамические свойства процессов и зависят от природы веществ (типы, классы) и их элементного состава. В последнее время увеличилась потребность в исследованиях полиазотистых соединений, например тетразинтриазолового ряда.

В настоящей работе проведены исследования направлений протекания процессов распада диамино-тетразинтриазола при различных скоростях термического воздействия от 10 мин^{-1} до 2000 с^{-1} . В результате установлен характер цепных химических реакций при различных процессах: медленного термического разложения, сублимации, газофазного распада, горения и взрывчатого превращения. Продемонстрированы методики исследования и показан механизм взаимодействия продуктов реакций.

**IN-DEPTH ANALYSIS
OF REACTION PRODUCT AND MECHANISM
OF CHAIN DECOMPOSITION REACTIONS FOR
DIAMINOTETRAZINETRIAZOLE SUBJECTED
TO THERMAL ACTION
UP TO 2000 K/s**

A. V. Stankevich¹, G. L. Rusinov², S. G. Tolshchina²,
I. V. Chemagina¹, N. P. Taibinov¹

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

²I. Ya. Postovsky Institute of Organic Synthesis Ural Branch of
the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Study of chemical reaction mechanisms on decomposition of high-energy compounds is attractive for those who are involved in physical chemistry research. It is evident that the reaction directions influence multiple thermodynamic properties of the processes and depend on materials nature (types, classes) and their elementary composition. Recently, investigation of polynitrogen compounds, especially tatrazinetriaizole-type, has become highly demanded.

The present work is devoted to the study of the directions of diaminotetraizetriaizole disintegration processes at various thermal action rates ranging from 10 мин^{-1} to 2000 с^{-1} . As a result, the behavior of chemical chain reactions was established under various processes such as slow thermal decomposition, sublimation, gas-phase disintegration, combustion, and explosive transformation. Investigation techniques are demonstrated, and the mechanism of reaction products interaction is presented.

2-37

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНТАЛЬПИИ СУБЛИМАЦИИ СВЕРХЧИСТЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КРИСТАЛЛОВ ЭНЕРГОЕМКИХ СОЕДИНЕНИЙ

А. В. Станкевич

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Энтальпия сублимации вещества является важной характеристикой, позволяющей оценивать физическую стабильность и химическую активность соединений. С точки зрения классической термодинамики энтальпия сублимации представляет собой разность энергии образования твердого тела и молекул вещества в газовой фазе. Известно множество методов, позволяющих оценить энтальпию сублимации как из первопринципных квантово-химических представлений, так и экспериментально на основе физико-химических методов анализа.

В данной работе экспериментальными методами определена энтальпия сублимации сверхчистых молекулярных кристаллов энергетических соединений. Оценка термодинамических свойств проводилась в эффузионных ячейках Кнудсена. Скорость образования и состав газовой фазы измерялись методами масс-спектрометрии и с помощью кварцевого осциллятора. В результате получены температурные функции изменения скорости сублимации вещества и проведена оценка энтальпии сублимации.

EXPERIMENTAL STUDY OF SUBLIMATION ENTHALPY FOR ULTRA-PURE MOLECULAR CRYSTALS OF ENERGY-RICH COMPOUNDS

A. V. Stankevich

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk,
Russia

Sublimation enthalpy of a matter is an important characteristic in evaluating physical stability and chemical reactivity of compounds. Sublimation enthalpy in terms of classical thermodynamics represents a difference in formation energies between solids and matter molecules in gas-phase. Plenty of methods is known to estimate sublimation enthalpy both from ab initio quantum-chemical representations, and experimentally, based on physico-chemical analysis methods.

In the present work, experimental methods were used to determine sublimation enthalpy of ultra-pure molecular crystals of energetic compounds. Thermodynamic properties were estimated in Knudsen effusion cells. Formation rate and gas-phase composition were measured through mass-spectrometry methods and using quartz oscillator. As a result, temperature functions of sublimation rate change are obtained, and sublimation enthalpy is estimated.

2-38

МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВЕРХЧИСТЫХ ЭНЕРГОЕМКИХ СОЕДИНЕНИЙ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУБЛИМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

А. В. Станкевич

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Молекулярно-кинетические и термодинамические свойства веществ выступают фундаментом исследований основных физико-химических процессов: сублимация, плавление, кристаллизация, разложение и других. В то же время, их количественная оценка для некоторых типов соединений представляет сложность как с инструментальной, так и с аналитической точки зрения. Причем, большинство ограничений носит фундаментальный характер.

Целью настоящей работы было определение основных свойств молекул некоторых энергоемких соединений: длина свободного пробега, средняя скорость перемещения, нормальный вектор силовых полей и квантовая топология при различных давлениях от Е-6 до Е5 Па и температурах от 290 до 570 К. При оценке свойств применялись оригинальные методики, основанные на измерениях методами высокотемпературной динамической масс-спектрометрии и осцилляции кварцевого кристалла. Образцы представлены в сверхчистом состоянии. В результате получены графические представления среднемассовых скоростей перемещения молекул энергоемких соединений в различных процессах.

MOLECULAR-KINETIC PROPERTIES OF ULTRA-PURE ENERGY-RICH COMPOUNDS AND THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF SUBLIMATION PROCESSES

A. V. Stankevich

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

Molecular-kinetic and thermodynamic properties of materials underpin the study of the main physicochemical processes: sublimation, melting, crystallization, decomposition, etc. At the same time, the quantitative estimates of the properties of certain types of compounds are challenging both from instrumental and analytical prospective, most of limitations being of fundamental nature.

The objective of the present work was to determine the main properties of molecules of certain energy-rich compounds: free run distance, mean displacement rate, normal vector of force fields, and quantum topology at various pressures ranging from E-6 to E5 Pa and temperatures from 290 to 570 K. On estimating properties, original techniques were applied based on measurements through high-temperature dynamic mass-spectrometry and quartz crystal oscillation methods. The samples are

represented in ultra-pure state. As a result, mean-mass displacement rates for energy-rich compounds molecules in various processes are represented graphically.

2-39

**СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ
ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ АЛЮМИНИЯ
ПРИ ИХ МЕХАНОАКТИВАЦИИ
В ШАРОВЫХ ВИБРОМЕЛЬНИЦАХ**

A. V. Stankevich¹, M. A. Uymin², A. E. Ermakov²,
S. I. Novikov², D. I. Davydov², V. S. Gaviko²

¹Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

Полная или даже частичная аморфизация веществ может в значительной степени влиять на их конечные свойства, в частности, на кинетику окисления при нагревании. Известно, что не все вещества склонны к образованию аморфных или нанокристаллических состояний в результате механической активации. В отдельных случаях механическая активация сопровождается медленными и/или быстрыми физико-химическими процессами диффузии, окисления и твердофазного горения с образованием новых соединений.

В данной работе исследованы изменения структурного состояния интерметаллидов алюминия, содержащих Ba, La, Pr, Y, Sm, Ce при их механоактивации при различных режимах и средах в вибрационной шаровой мельнице. Изучено влияние условий нагружения (среды, температуры) на изменение размера частиц и фазового состава интерметаллидов. Структурное состояние конечных механоактивированных продуктов оценивалось с учетом равновесной фазовой диаграммы интерметаллидов и соотношения атомных радиусов компонентов.

**STRUCTURAL TRANSFORMATIONS
OF ALUMINUM INTERMETALLIDES
UNDER THEIR MECHANICAL ACTIVATION IN
BALL VIBRATION MILLS**

A. V. Stankevich¹, M. A. Uymin², A. E. Ermakov²,
S. I. Novikov², D. I. Davydov², V. S. Gaviko²

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

²M. N. Makheev Institute of Metal Physics UB RAS,
Ekaterinburg, Russia

Complete and even incomplete amorphization of matters can significantly influence their ultimate properties, in particular, oxidation kinetics under heating. It is known that not all the matters are predisposed to form amorphous or nanocrystalline states under their mechanical activation. In individual cases, mechanical activation is

attended by slow and/or fast physicochemical processes of diffusion, oxidation and solid-phase combustion with the formation of new compounds.

The present works is devoted to the study of the changes in structural state of aluminum intermetallides containing Ba, La, Pr, Y, Sm, and Ce under their mechanical activation in various modes and environments in a ball vibration mill. The influence of loading conditions (environments, temperatures) on the change in particle size and intermetallides phase composition is investigated. Structural states of ultimate mechanically activated products were evaluated considering equilibrium phase diagram for intermetallides and ratio of atomic radii of the components.

2-40

**РАЗЛОЖЕНИЕ ТЕТРИЛА
В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ**

П. Н. Столяров, Д. Г. Перменов, Д. А. Костеров

ГНЦ РФ ФГУП «Центральный научно-исследовательский
институт химии и механики», Москва, Россия

E-mail: stolyarov1946@mail.ru

Исследование термического разложения промышленных образцов тетрила [1] (навеска 5 г, сушка в течение 4 часов потоком газа) манометрическим методом показало, что величина выделившегося количества газов за 40 часов для разных образцов отличается почти в три раза.

Ускорение разложения автор связывает с автокатализом, но в большей степени с прогрессивным образованием эвтектики.

В работе [2] рассматривается процесс разложения тетрила в твердом состоянии и дается объяснение процессу ускорения разложения. Автор указывает, что ускорение объясняется появлением жидкой фазы и пропорционально ее количеству, (в работе [1] ускорение разложения тетрила связывалось со снижением температуры плавления).

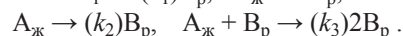
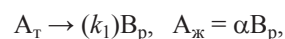
В результате впервые показано, что ускорение разложения связано с физическим процессом появления жидкой фазы, а процесс описывается уравнением, аналогичным уравнению автокатализа первого порядка.

В данной работе экспериментальные данные по разложению тетрила в твердом состоянии были обработаны с использованием 4 моделей.

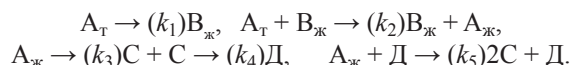
Первая модель – модель автокатализа первого порядка.

Вторая модель – количество растворенного исходного вещества пропорционально количеству продуктов распада.

Третья модель – появление жидкой фазы из вторичных продуктов происходит после достижения определенного уровня распада исходного вещества.



Четвертая модель – после появления жидкой фазы растворение исходного вещества происходит по заданному кинетическому закону.



Рассмотрение полученных результатов описания экспериментальных данных разложения тетрила в твердом состоянии с использованием 4 моделей показывает, что только модель автокатализа первого порядка неудовлетворительно описывает экспериментальные данные. Использование модели, учитывающей растворение исходного вещества продуктами распада и выгорание позволяет удовлетворительно описать экспериментальные данные разложения тетрила в твердом состоянии. Усложнение моделей практически не сказывается на точности описания экспериментальных данных. Однако при этом величина энергий активации может варьироваться как для разложения в твердой фазе, так и в растворе.

Литература

1. **Farmer, R. C.** The velocity of decomposition of high explosives in a vacuum. Part II, Trinitrophenylmethylnitroamin (tetryl) [Text] // J. Chem. Soc. – 1920. – P. 1603–1614.
2. **Hinshelwood, C. N.** Some physico-chemical problems connected with the stability of explosives [Text] // J. Chem. Soc. – 1921. – P. 119–120, 721–734.

SOLID STATE TETRILE DECOMPOSITION

P. N. Stolyarov, D. G. Permenov, D. A. Kosterov

State Scientific Center of the Russian Federation Federal State Unitary Enterprise “Central Research Institute of Chemistry and Mechanics”, Moscow, Russia

E-mail: stolyarov1946@mail.ru

Investigation of the thermal decomposition of industrial samples of tetryl [1] (weighed portion of 5 g, drying for 4 hours with a gas flow) by the manometric method showed that the amount of gases released in 40 hours for different samples differs by almost three times. The author associates the acceleration of decomposition with autocatalysis, but to a greater extent with the progressive formation of the eutectic.

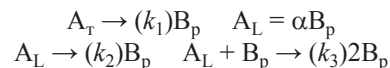
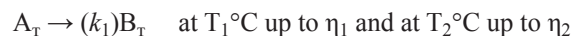
In [2], the process of decomposition of tetryl in the solid state is considered and an explanation of the process of acceleration of decomposition is given. The author points out that the acceleration is explained by the appearance of a liquid phase and is proportional to its amount (in [1], the acceleration of the decomposition of tetryl was associated with a decrease in the melting point).

As a result, it was shown for the first time that the acceleration of decomposition is associated with the physical process of the appearance of a liquid phase, and the process is described by an equation similar to the first-order autocatalysis equation. In this work, the experimental data on the decomposition of tetryl in the solid state were processed using 4 models.

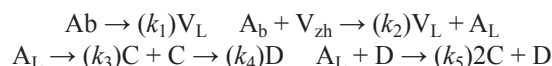
The first model is the first order autocatalysis model.

The second model is the amount of the dissolved initial substance is proportional to the amount of decay products

The third model is that the appearance of a liquid phase from secondary products occurs after a certain level of decomposition of the initial substance is reached.



The fourth model – after the appearance of the liquid phase, the dissolution of the initial substance occurs according to a given kinetic law.



Consideration of the obtained results of the description of experimental data on the decomposition of tetryl in the solid state using four models shows that only the first-order autocatalysis model describes the experimental data unsatisfactorily. The use of a model that takes into account the dissolution of the initial substance by the decomposition products and burnup makes it possible to satisfactorily describe the experimental data on the decomposition of tetryl in the solid state. The complication of the models has practically no effect on the accuracy of the description of the experimental data. However, in this case, the value of activation energies can vary both for decomposition in the solid phase and in solution.

References

1. **Farmer, R. C.** The velocity of decomposition of high explosives in a vacuum. Part II, Trinitrophenylmethylnitroamin (tetryl) [Text] // J. Chem. Soc. – 1920. – P. 1603–1614.
2. **Hinshelwood, C. N.** Some physico-chemical problems connected with the stability of explosives [Text] // J. Chem. Soc. – 1921. – P. 119–120, 721–734.

2-41

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ВВ НА ОСНОВЕ ТЭНА С ДОБАВКАМИ НАНОДИСПЕРСНОГО АЛЮМИНИЯ И УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ДОПИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗОМ

М. С. Стрельцова, А. В. Соболевская, А. Р. Бакиров,
А. В. Станкевич, Н. П. Тайбинов, А. Ю. Гармашев

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. акад. Е. И. Забахина,
Снежинск, Россия

При оценке компонентного состава веществ в аналитической химии широкое распространение получили методы, основанные на поглощении электромагнитного излучения (ЭМИ). Определение компонентного состава светочувствительных ВВ и оценка их спектральных свойств от ИК до УФ области явля-

лось целью настоящей работы. Исследования поглощения в ИК диапазоне проводились методами нарушенного полного внутреннего отражения в тонких слоях энергоемких соединений в диапазоне 520–4000 см⁻¹ (2,5–20 мкм) и методами диффузного отражения в ближнем ИК, видимом и УФ диапазонах от 3600 до 34 000 см⁻¹ (290–2800 нм). Использование компонентов строго заданной дисперсности позволило нивелировать вклад гранулометрического состава в изменение спектральных свойств светочувствительных ВВ на основе ТЭНа.

В результате были построены калибровочные кривые для определения компонентного состава светочувствительных ВВ на основе ТЭНа, содержащих алюминий и углеродные нанотрубки допированные железом. Установлено, что колебательные спектры функциональных фрагментов молекул при увеличении добавок адсорбентов ЭМИ изменяются слабо. Максимальное поглощение ЭМИ в светочувствительных ВВ, содержащих добавки нанодисперсного алюминия наблюдается в диапазоне 830–870 нм, содержащих добавки углеродных нанотрубок, допированных железом, в диапазоне 1010–1140 нм.

TECHNIQUE FOR COMPONENT ANALYSIS OF PETN-BASED PHOTOSENSITIVE HES WITH ADDITIVES OF NANODISPERSIVE ALUMINUM AND IRON-DOPED CARBON NANOTUBES

M. S. Streltsova, A. V. Sobolevskaya, A. R. Bakirov, A. V. Stankevich, N. P. Taibinov, A. Yu. Garmashev

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

Methods based on the absorption of electromagnetic radiation (EMR) pertain to techniques in analytical chemistry for the component analysis of materials. The present work is aimed at the component analysis of photosensitive HES and the assessment of their spectral properties within the IR to the UV range. In the IR range, the EMR absorption was studied by the attenuation total reflection method in thin layers of energetic compounds within the range of 520–4000 cm⁻¹ (2.5–20 μm), and by the diffuse reflection technique in the near IR, visible and UV ranges from 3600 to 34000 cm⁻¹ (290–2800 nm). The use of strictly set dispersion made it possible to neutralize the contribution of granulometric composition into the changing spectral properties of photosensitive PETN-based HES.

As a result of our studies, calibration curves for the component analysis of photosensitive PETN-based HES containing aluminum and iron-doped carbon nanotubes were built. It was found that the increase of dopants of the EMR absorbers has a weak effect on the oscillating spectra of the functional molecule fragments. The maximum EMR absorption in photosensitive HES with additives of nanodispersed aluminum is observed within the range of 830–870 nm, while that in photosensitive HES containing iron-doped carbon nanotubes is observed within the range of 1010–1140 nm.

2-42

ПРОЕКТ СТАНЦИИ 1-3 «БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ» НА ИСТОЧНИКЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЦКП «СКИФ»

А. А. Студенников^{1,2}, И. А. Рубцов^{1,2}, Э. Р. Прууэл², К. А. Тен², А. О. Кашкаров², В. П. Халеменчук², А. С. Аракчеев³, К. В. Золотарев^{1,3}, К. Э. Купер^{1,3}, Н. А. Мезенцев^{1,3}, А. Д. Николенко³, Я. В. Ракшун³, Б. П. Толочко⁴, Л. И. Шехтман³, В. А. Шкаруба^{1,3}, Я. В. Зубавичус¹, А. Ю. Коновалова¹, С. В. Ращенко¹, Ю. В. Хомяков³

¹Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

³Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

⁴Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: a.a.studennikov@srf-skif.ru

В 2024 году ожидается сдача шести экспериментальных станций первой очереди центра коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» (ЦКП «СКИФ»), в числе которых находится станция 1-3 «Быстропротекающие процессы».

Станция «Быстропротекающие процессы» состоит из двух секций («Динамические процессы» и «Плазма»). Функционал станции позволяет исследовать свойства энергетических материалов, структуру ударного и детонационного фронта, фазовые переходы при ударном сжатии, быстрые химические реакции, динамическое формирование наноструктур, скоростное деформирование и разрушение материалов, воздействие высокой температуры и плазмы на материалы в условиях термоядерного реактора и другие явления время протекания которых составляет десятки нано- и микросекунд.

Для реализации поставленных научных задач будут использоваться следующие экспериментальные методики: скоростная радиография, малоугловое рентгеновское рассеяние и дифракция с высоким временным разрешением. Все методики являются методиками *in situ* и *operando*.

Ключевыми особенностями станции является использование взрывной камеры на 2 кг в т. э., 30-метровой пушки, сверхпроводящего вигглера мощностью 53 кВт и специального детектора DIMEX.

**THE PROJECT OF 1-3 “FAST PROCESSES”
BEAMLINE AT THE SYNCHROTRON
RADIATION FACILITY “SKIF”**

A. A. Studennikov^{1,2}, I. A. Rubtsov^{1,2}, E. R. Prueel²,
K. A. Ten², A. O. Kashkarov², V. P. Khalemenchuk²,
A. S. Arakcheev³, K. V. Zolotarev^{1,3}, K. E. Kuper^{1,3},
N. A. Mezentsev^{1,3}, A. D. Nikolenko³, Ya. V. Rakshun³,
B. P. Tolochko⁴, L. I. Shekhtman³, V. A. Shkaruba^{1,3},
Ya. V. Zubavichus¹, A. Yu. Konovalova¹,
S. V. Rashenko¹, Yu. V. Khomiakov³

¹Boreskov Institute of Catalysis SB RAS, Novosibirsk, Russia

²Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS,
Novosibirsk, Russia

³Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS,
Novosibirsk, Russia

⁴Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SB
RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: a.a.studennikov@srf-skif.ru

The accelerator complex and six 1st phase beamlines of the Synchrotron Radiation Facility “SKIF” are scheduled to be commissioned in December, 2024. The list of the 1st phase beamlines, in particular, includes the 1-3 “Fast processes” beamline.

The “Fast processes” beamline encompasses two complementary branches “Dynamic processes” and “Plasma”. The beamline is dedicated to studies of high energy materials and related processes including shock-wave and detonation front propagation, phase transitions induced by impact compression, rapid chemical reactions, nonequilibrium emergence of nanostructures, rapid deformation and disintegration of mechanical parts, impact of extremely high temperature and plasma on the surface of engineering materials mimicking realistic conditions inside a thermonuclear reactor, and similar phenomena at a temporal resolution ranged from tens nanoseconds to microseconds.

To address the scientific problems listed above the following set of experimental techniques will be implemented: time-resolved X-ray imaging, small-angle X-ray scattering, and X-ray diffraction all in the in situ and operando modes.

The beamline will use radiation from a superconducting wiggler emitting a total radiation power of 53 kW. The unique end-station instrumentation will include an explosion chamber for explosive loads as much as 2 kg in the TNT equivalent, a 30 m-long gas gun, and a record-holding fast counting DIMEX detector.

2-43

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ТЕРМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ
2,4-ДИНИТРОАНИЗОЛА
СВЕЖЕИЗГОТОВЛЕННОГО
И ПОСЛЕ ДВУХ ЛЕТ ХРАНЕНИЯ**

А. Ю. Тарасов, А. В. Сарафанников, Н. П. Тайбинов,
К. А. Гайсина, И. В. Чемагина

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

В работе представлены результаты исследования термической стабильности 2,4-динитроанизола (далее ДНА) свежизготовленного и после двух лет хранения. ДНА получен реакцией метоксилирования 2,4-динитрохлорбензола в присутствии едкого натра. Исследования термической стабильности ДНА проводились методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Чистота образцов ДНА контролировалась методами хроматомасс-спектрометрии и высокоэффективной жидкостной хроматографии.

Результаты показали, что исследованные образцы ДНА могут находиться в двух полиморфных модификациях с температурами плавления $\approx 86^\circ\text{C}$ и $\approx 94^\circ\text{C}$. Установлено, что свежизготовленный ДНА получен в полиморфной модификации с температурой плавления $\approx 86^\circ\text{C}$. Данная полиморфная модификация не стабильна и в процессе хранения переходит в более термостойкую модификацию с температурой плавления $\approx 94^\circ\text{C}$. Также полиморфный переход может быть спровоцирован термическим воздействием на образец. Процесс перехода из менее термостойкой модификации в более термостойкую сопровождается выделением тепла, следовательно, полиморфный переход является экзотермическим.

Данные, опубликованные в работах [1, 2], свидетельствуют, что данный фазовый переход будет сопровождаться изменением объема элементарной ячейки кристалла. Изменение объема элементарной ячейки в конечном итоге может отразиться на габаритных размерах литых деталей при их хранении, что находит подтверждение в работе [3], где описана проблема необратимого роста литых деталей из ДНА при термостарении.

Рассматривая наличие полиморфного перехода ДНА в области температур плавления и кристаллизации для дальнейшего использования ДНА в смесевых взрывчатых веществах (СВВ), становится очевидной необходимость проведения дополнительных исследований условий кристаллизации СВВ, содержащих ДНА, с целью гарантированного получения термостойкой (стабильной) модификации при отверждении.

Литература

1. **Nuburg, S. C.** Structures of 2,4-dinitroanisole and 2,6-dinitroanisole [Text] / S. C. Nuburg, C. H. Faerman, L. Prasad, D. Palleros and N. Nudelman // Acta Cryst. Sec. C. – 1987. – С43. – P. 686–689.

2. **Xue, G.** Crystal structure of 2,4-dinitroanisole, $C_7H_6N_2O_5$ [Text] / Gang Xue, Cai-Rong Gong and Hong-Yu Chen // Z. Kristallogr. – NCS 222 – 2007. – P. 321–322.
3. **Samuels, Ph.** Irreversible Growth of DNAN [Text] // Based Formulations. Technology driven. Warfighter focused. – 2012.

INVESTIGATING THE THERMAL STABILITY OF 2,4-DINITROANISOLE AS PREPARED AND AFTER TWO-YEAR STORAGE

A. Yu. Tarasov, A. V. Sarafannikov, N. P. Taibinov,
K. A. Gaisina, I. V. Chemagina

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

The paper presents the results of investigation into the thermal stability of 2,4-dinitroanisole (DNAN), both as prepared and after two years of storage. DNAN was synthesized by methoxylation of 2,4-dinitrochlorobenzene in the presence of sodium hydroxide. The DNAN thermal stability was studied using differential scanning calorimetry. Gas chromatography-mass spectrometry and high-performance liquid chromatography were used to control the DNAN sample purity.

The results obtained show that test DNAN samples can be in two polymorphic modifications with melting points of $\approx 86^\circ\text{C}$ and $\approx 94^\circ\text{C}$, respectively. The as-prepared DNAN was established to be in polymorphic modification with melting point of $\approx 86^\circ\text{C}$. This polymorphic modification is unstable and in the process of storage, it turns into more thermally stable modification with melting point of $\approx 94^\circ\text{C}$. Such polymorphic transition can also result from the thermal influence. The heat is released during the transition to more thermally stable modification. Hence, this polymorphic transition is exothermal.

The data published in [1, 2] proves that this phase transition is followed by changes in the unit cell volume, which can eventually affect overall dimensions of castings upon their storage, as is shown in [3], where the problem of irreversible DNAN castings enlargement due to the thermal aging is discussed.

Considering the polymorphic transition of DNAN in the melting and crystallization region with the view to its further use in the mixed explosives reveals the need for continued investigation into crystallization conditions of the DNAN-containing explosives in order to ensure the thermally stable modification under solidification.

References

1. **Nuburg, S. C.** Structures of 2,4-dinitroanisole and 2,6-dinitroanisole [Text] / S. C. Nuburg, C. H. Faerman, L. Prasad, D. Palleros and N. Nudelman // Acta Cryst. Sec. C. – 1987. – C43. – P. 686–689.
2. **Xue, G.** Crystal structure of 2,4-dinitroanisole, $C_7H_6N_2O_5$ [Text] / Gang Xue, Cai-Rong Gong and Hong-Yu Chen // Z. Kristallogr. – NCS 222 – 2007. – P. 321–322.
3. **Samuels, Ph.** Irreversible Growth of DNAN [Text] // Based Formulations. Technology driven. Warfighter focused. – 2012.

2-44

ВЫРОЖДЕНИЕ ХИМПИКА ПРИ ПЕРЕСЖАТИИ ДЕТОНАЦИИ В ТАТБ И СОСТАВАХ НА ЕГО ОСНОВЕ

В. И. Таржанов

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: v.i.tarzhanov@vniitf.ru

В данном докладе под единым углом зрения суммируются результаты трех работ [1–3], посвященных пересжатию детонации в ТАТБ и в составах на его основе. Сопоставляются результаты лазерно-интерферометрической диагностики пересжатой детонации при трех различных способах ее получения.

Ударом высокоскоростной металлической пластины осуществлялось пересжатие детонации во взрывчатом веществе (ВВ) триаминотринитробензоле (ТАТБ) с плотностью $1,815 \text{ г/см}^3$. Применялись алюминиевые ударники со скоростью 4,02; 4,47; 4,98 км/с. В экспериментах достигнуты три степени пересжатия – 1,40; 1,51 и 1,76. Вычислены для ТАТБ параметры состояний Неймана в химпике и состояний на кривой торможения продуктов взрыва (ПВ). Зафиксировано относительное снижение амплитуды химпика при увеличении степени пересжатия и его полное вырождение при пересжатию, равном 1,76.

При торможении нормальной детонации на тонких металлических преградах исследовалось встречное пересжатие химпика в пластифицированном ТАТБ (ПСТ). Достигнутые степени пересжатия – 1,45–2,8. По результатам сделан вывод о нахождении исследуемого ПСТ в нереагирующем состоянии за ударным фронтом встречного повторного сжатия при давлениях до 65 ГПа. При сжатии выше 65 ГПа и пересжатия 2,1 начинается его разложение непосредственно на фронте отраженной волны с полным вырождением химпика.

Исследовалось пересжатие детонации при ее сжатии в полусферическом заряде ПСТ с наружным и внутренним радиусами 75 и 20 мм после задействования его по внешней поверхности системой иницирования. Проведено численное моделирование эксперимента с учетом кинетики превращения ВВ-ПВ. Экспериментально-расчетно получены параметры пересжатой детонации в ПСТ на диагностируемом радиусе 20 мм в максимуме профиля: давление – 70 ГПа, скорость фронта 9,45 км/с, массовая скорость ПВ 3,88 км/с. Достигнутое в рассматриваемом эксперименте пересжатие – 2,5. Найдена точка пересечения адиабат «нерагирующего» ПСТ и его ПВ, которая реализуется на радиусе 31 мм при давлении 51,5 ГПа и пересжатии 1,67. Это – пороговая точка вырождения химпика.

В итоге, установлено, что при всех трех рассмотренных способах пересжатия детонации в ТАТБ и составах на его основе существуют пороговые давления и степени пересжатия, выше которых реализуется

вырождение химпика, а реакция разложения ВВ, ускоряясь, подавляюще проходит на ширине детонационного фронта. Связано это с пересечением адиабат «нереагирующего» ВВ и его ПВ в диапазоне давлений 46–65 ГПа. Для уточнения положения точки пересечения для каждого ВВ требуются дальнейшие исследования.

Литература

1. **Козлов, Е. А.** Структура зоны реакции ТАТБ при нормальной и пересжатой детонации [Текст] : сборник докладов / Е. А. Козлов, В. И. Таржанов, И. В. Теличко, А. В. Воробьев, К. В. Левак, В. А. Маткин и др. // Международная конференция XV Харитоновские тематические научные чтения, 18 марта – 22 марта 2013 г. – Саров : ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ», 2013. – С. 43–54.
2. **Таржанов, В. И.** Кривая торможения химпика детонирующего пластифицированного ТАТБ [Текст] / В. И. Таржанов, А. В. Воробьев, Д. П. Кучко, М. А. Ральников, Р. В. Комаров, Г. Г. Бондарчук // Горение и взрыв. – 2020. – Т. 13, № 3. – С. 63–73.
3. **Таржанов, В. И.** Пересжатие сферически сходящейся детонации в пластифицированном ТАТБ [Текст] / В. И. Таржанов, Д. В. Петров, А. Ю. Гармашев, Д. П. Кучко, А. В. Воробьев, М. А. Ральников и др. // Физика горения и взрыва / Combustion, explosion, and Shock Waves. – 2021 (в печати).

CHEMICAL SPIKE DEGENERATION AT DETONATION SUPRACOMPRESSION IN TATB AND TATB-BASED EXPLOSIVES

V. I. Tarzhanov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: v.i.tarzhanov@vniitf.ru

The paper presents a universal analysis of the results of three works [1–3] devoted to supracompressed detonation in TATB and TATB based explosive. Laser interferometry diagnostics results of the supracompressed detonation are compared considering three different ways of supracompression.

The detonation supracompression in high explosive (HE) triaminotribromobenzene (TATB) with density 1.815 g/cm^3 was carried out through the impact of a high-speed metal plate. The aluminum impactors were accelerated to a speed of 4.02, 4.47, 4.98 km/s. The degree of supracompression during the experiments reached the following values: 1.40, 1.51, and 1.7. Von Neumann states parameters of TATB in chemical spike and on explosion products (EP) Hugoniot were calculated. Chemical spike amplitude is decreasing with the increase in the degree of supracompression and vanishes when the supracompression reaches 1.76.

Counter supracompression of the spike in plastic bonded TATB (PBT) was investigated when normal deto-

nation brakes against thin metal barriers. The supracompression degree reached 1.45–2.8. The tests showed that the investigated PBT stays inert behind the shock front of the counter repeated compression under pressure below 65 GPa. As the compression exceeds 65 GPa and supracompression reaches 2.1, PBT decomposition starts directly at the reflected wave front with full degeneration of chemical spike.

Detonation supracompression was investigated at its convergence in PBT hemispherical charge with external and internal radii 75 and 20 mm after the charge was initiated by means of the initiation system on the outer side of the charge. Numerical simulation of the experiment taking HE-EP conversion kinetics into consideration was performed. Parameters of the supracompressed detonation in PBT at the 20 mm radius in a profile maximum were assessed experimentally and theoretically. These are: pressure – 70 GPa, front velocity – 9.45 km/s, EP particle velocity – 3.88 km/s. The supracompression in the considered experiment reached 2.5. The crossing point of adiabatic curves of “nonreacting” PBT and its EP was found. It was reached on the radius of 31 mm at pressure 51.5 GPa and supracompression 1.67. It is a threshold point for the chemical spike degeneration.

As a result, it is established, that the threshold pressures and supracompression levels, above which chemical spike degenerates, exist for all three considered ways of detonation supracompression in TATB and TATB based HE. At the same time, HE decomposition, being accelerated, takes place basically within the detonation front. All this is due to the crossing of the adiabatic curves of “nonreacting” HE and its EP within the pressure range of 46–65 GPa. Further researches are required to specify the position of the crossing point for every single HE.

References

1. **Kozlov, E. A.** Structure of a reaction zone in TATB at the normal and supracompressed detonation [Text] : the collection of reports / E. A. Kozlov, V. I. Tarzhanov, I. V. Telichko, A. V. Vorobyov, K. V. Levak, V. A. Matkin and al. / International conference XV Haritonovsky thematic scientific readings, on March, 18th – on March, 22nd, 2013. – Sarov : RFNC – VNIIEF, 2013. – P. 43–54.
2. **Tarzhanov, V. I.** Chemical peak brake curve of detonating plastic bonded TATB [Text] / V. I. Tarzhanov, A. V. Vorobyov, D. P. Kuchko, M. A. Ralnikov, R. V. Komarov, G. G. Bondarчук // Gorenje i vzryv (Moskva) – Combustion and explosion. – 2020. – Vol. 13, No. 3. – P. 63–73.
3. **Tarzhanov, V. I.** Supracompression spherically converging detonation in plastic bonded TATB [Text] / V. I. Tarzhanov, D. V. Petrov, A. J. Garmashev, D. P. Kuchko, A. V. Vorobyov, M. A. Ralnikov and al. // Phisika gorenja i vzryva / Combustion, explosion, and Shock Waves. – 2021 (in the press).

2-45

**ИЗМЕНЕНИЕ КОНСТАНТЫ СКОРОСТИ
ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ТАТБ
ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИМИ
ЭЛЕКТРОНАМИ**

Б. П. Толочко^{1,2}, М. А. Михайленко¹, К. Б. Герасимов¹,
А. А. Брызгин², А. Ю. Гармашев³, Е. Б. Смирнов³,
А. В. Станкевич³, И. В. Чемагина³

¹Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,
Новосибирск, Россия

²Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, Россия

³Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: bptolochko@solid.nsc.ru

Проведено исследование влияния радиации на физико-химические свойства ТАТБ после облучения релятивистскими электронами дозами до 450 кГр на установке ИЛУ-6 (ИЯФ СО РАН).

При облучении электронами с энергией 2,4 МэВ в ТАТБ образуются треки длиной порядка 10 мкм и диаметром, определяемым энергией образующихся вторичных электронов (~100 эВ). Облучение приводит к разогреву ТАТБ внутри треков до тысяч градусов, при ничтожно малом росте температуры образца, с образованием парамагнитных центров (ПМЦ) и образованием дефектов кристаллической решетки.

Исследование количества ПМЦ методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) показало линейную зависимость от дозы, насыщения не наблюдалось. ПМЦ в облученных кристаллах ТАТБ обладают высокой стабильностью, выдерживают при 200°C в течение 24–30 часов не приводила к изменениям интенсивности и форм спектров ЭПР.

Накопление значительного числа ПМЦ приводит к искажению кристаллической структуры ТАТБ проявляющееся в увеличении межслоевого расстояния и относительному изменению интенсивности рефлекса 002.

Изменения кристаллической структуры и накопления дефектности приводят к наблюдаемому увеличению летучести ТАТБ обработанного ускоренными электронами и снижению температуры начала интенсивного разложения на 20°C. Исследование термического разложения проводилось как в режиме нагрева, так и путем выдержки при заданной температуре. Разложение исходного ТАТБ при выдержке при температурах ниже 280°C носит затухающий характер, а выше – ускоряющийся. После воздействия ионизирующего излучения на ТАТБ ускоряющийся характер термического разложения начинается при более низких температурах, что свидетельствует об изменении константы скорости реакции.

**CHANGE OF THE RATE CONSTANT
OF THERMAL DECOMPOSITION OF TATB
AFTER IRRADIATION WITH RELATIVISTIC
ELECTRONS**

B. P. Tolochko^{1,2}, M. A. Mikhailenko¹, K. B. Gerasimov¹,
A. A. Bryazgin², A. Yu. Garmashev³, E. B. Smirnov³,
A. V. Stankevich³, I. V. Chemagina³

¹Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry
SB RAS, Novosibirsk, Russia

²I. Ya. Postovsky Institute of Nuclear Physics, G. I. Budker
SB RAS, Novosibirsk, Russia

³Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

E-mail: bptolochko@solid.nsc.ru

The study of the effect of radiation on the physico-chemical properties of TATB after irradiation by relativistic electrons with doses up to 450 kGy at the ILU-6 facility (INP SB RAS) has been carried out.

Under irradiation by 2.4 MeV electrons, tracks with a length of about 10 μm and a diameter determined by the energy of the formed secondary electrons (~100 eV) are formed in TATB. Irradiation leads to the heating of TATB inside the tracks up to thousands of degrees, with a negligible increase of the temperature of the sample, with the formation of paramagnetic centers (PMCs) and the formation of crystal lattice defects.

The study of the amount of PMC by the method of electron paramagnetic resonance (EPR) showed a linear dependence on the dose, saturation was not observed. PMCs in irradiated TATB crystals are highly stable; exposure at 200°C for 24–30 hours did not lead to changes in the intensity and shape of the EPR spectra.

The accumulation of a significant number of PMCs leads to a distortion of the TATB crystal structure, which manifests itself in an increase in the interlayer distance and a relative change in the intensity of the 002 reflection.

Changes in the crystal structure and the accumulation of defectiveness lead to an observed increase in the evaporation ability of TATB treated with accelerated electrons and a decrease in the temperature of the onset of intense decomposition by 20°C. The study of thermal decomposition was carried out both in heating mode and by holding at a given temperature. The decomposition of the initial TATB when held at temperatures below 280°C is decaying, and above it is accelerating. After the action of ionizing radiation on TATB, the accelerating character of thermal decomposition begins at lower temperatures, which indicates a change in the reaction rate constant.

2-46

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ЗАРЯДА ТРОТИЛА НА ДИНАМИКУ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ ПРИ ДЕТОНАЦИИ

А. С. Хорунженко¹, Н. П. Сатонкина²

¹Новосибирский государственный университет,
Новосибирск, Россия

²Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, Россия

E-mail: snp@hydro.nsc.ru

Хорошо известно, что чувствительность взрывчатого вещества зависит не только от вида ВВ, но и существенным образом определяется структурой заряда [1, 2]. Очевидно, что, в рамках теории горячих точек, это влияние связано с концентрацией и характером неоднородностей. Один из способов увеличения чувствительности заключается в увеличении количества неоднородностей в зерне ВВ. Например, для заряда слабо чувствительного ТАТБ после термовакуумной перекристаллизации происходит уменьшение критического диаметра до рекордных долей миллиметра [3, 4].

Наиболее ярко влияние структуры проявляется для тротила: критический диаметр для прессованного заряда составляет 3–5 мм, в то время как для литого это 15–30 мм [1, 2]. В докладе приведены результаты томографического исследования образцов прессованного и литого тротила, для прессованного однородность заряда существенно выше. Динамика химических реакций при детонации литого и прессованного тротила диагностируется через электропроводность. Так как имеющиеся модели, способные предсказать развитие детонации в зарядах с разной структурой, базируются на кинетике Аррениуса [5], с ее использованием проведено моделирование развития реакции в зарядах с разной структурой.

Работа выполняется при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Минобрнауки России, соглашение в системе «Электронный бюджет» № 075-15-2020-781.

Литература

1. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко. – М.: Физматлит, 2004. – Т. 1. – 832 с.
2. Дремин, А. Н. Детонационные волны в конденсированных средах [Текст] / А. Н. Дремин, С. Д. Савров, В. С. Трофимов // под ред. Н. Н. Семенова, Я. Б. Зельдович. – М.: Наука, – 1970. – 172 с.
3. Мильченко, Д. В. Наноструктурированные ВВ, получаемые методом осаждения из газовой фазы. Особенности структуры и взрывчатые свойства [Текст] / Д. В. Мильченко, В. А. Губачев, Л. А. Андреевский, С. А. Вахмистров, А. Л. Михайлов, В. А. Бурнашов, Е. В. Халдеев, А. И. Пятойкина, С. С. Журавлев, В. Н. Герман // Физика горения и взрыва. – 2015. – Т. 51, № 1. – С. 96.
4. Бельский, В. М. Зависимость детонационной способности взрывчатых веществ от дефектности кристаллов взрывчатого наполнителя [Текст] / В. М. Бельский, Д. В. Миль-

ченко, А. Л. Михайлов // Химическая физика. – 2021. – Т. 40, № 4. – С. 34.

5. Rai, N. K. Evaluation of reaction kinetics models for meso-scale simulations of hotspot initiation and growth in HMX [Text] / N. K. Rai, S. P. Koundinyan, O. Sen, I. V. Schweigert, B. F. Henson, H. S. Udaykumar // Combustion and Flame. – 2020. – Vol. 219. – P. 225–241.

INFLUENCE OF THE TNT CHARGE STRUCTURE ON THE DYNAMICS OF CHEMICAL REACTIONS DURING DETONATION

A. S. Khorunzhenko¹, N. P. Satonkina²

¹Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

²Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, SB RAS,
Novosibirsk, Russia

E-mail: snp@hydro.nsc.ru

It is well known that the sensitivity of an explosive depends not only on the type of explosive, but is also essentially determined by the structure of the charge [1, 2]. Obviously, within the framework of the theory of hotspots, this influence is associated with the concentration and nature of the inhomogeneities. One of the ways to increase the sensitivity is to increase the number of inhomogeneities in the explosive grain. For example, for a charge of a weakly sensitive TATB after thermal vacuum recrystallization, the critical diameter decreases to record fractions of a millimeter [3, 4].

The effect of the structure is most pronounced for TNT: the critical diameter for a pressed charge is 3–5 mm, while for a cast charge it is 15–30 mm [1, 2]. The report presents the results of a tomographic study of samples of pressed and cast TNT; for pressed TNT, the uniformity of the charge is significantly higher. The dynamics of chemical reactions during detonation of cast and extruded TNT is diagnosed through electrical conductivity. Since the available models capable of predicting the development of detonation in charges with different structures are based on the Arrhenius kinetics [5], it was used to simulate the development of the reaction in charges with different structures.

This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project № 075-15-2020-781.

References

1. **Explosion** physics / Ed. L. P. Orlenko. – M.: Fizmatlit. – 2004. – Vol. 1. – 832 p.
2. **Dremin, A. N.** Detonation waves in condensed media [Text] / A. N. Dremin, S. D. Savrov, V. S. Trofimov // Ed. N. N. Semenov, Ya. B. Zeldovich. – M.: Nauka, 1970. – 172 p.
3. **Mil'chenko, D. V.** Nanostructured explosives produced by vapor deposition: Structure and explosive properties [Text] / D. V. Mil'chenko, V. A. Gubachev, L. A. Andreevskikh, S. A. Vakhmistrov, A. L. Mikhailov, V. A. Burnashov, E. K. Khaldeev, A. I. Pyatoikina, S. S. Zhuravlev, V. N. German // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2015. – Vol. 51. – P. 80.
4. **Bel'skiy, V. M.** Dependence of the Detonability of High Explosives on the Defectiveness of the Explosive Filler Crystals

[Text] / V. M. Bel'skiy, D. V. Milchenko, A. L. Mikhaylov // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2021. – Vol. 15. – P. 285.

5. **Rai, N. K.** Evaluation of reaction kinetics models for meso-scale simulations of hotspot initiation and growth in HMX [Text] / N. K. Rai, S. P. Koundinyan, O. Sen, I. V. Schweigert, B. F. Henson, H. S. Udaykumar // Combustion and Flame. – 2020. – Vol. 219. – P. 225–241.

2-47

**РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ
В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦАХ ВВ
НА ОСНОВЕ ТАТБ**

М. О. Ширшова¹, В. Б. Титова¹, Н. А. Володина¹,
И. А. Спири¹, Э. Р. Прууэл²,
К. А. Тен², А. О. Кашкаров²

¹Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

²Институт гидродинамики им М. А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, Россия

E-mail: moshirshova@vniief.ru

В данной работе представлены результаты исследования процесса распространения детонации в цилиндрических образцах ВВ на основе ТАТБ. В экспериментах получены данные о влиянии кривизны фронта и диаметра заряда на скорость детонации. Определен критический диаметр для состава ВВ на основе ТАТБ. Проведено численное моделирование опытов по методике ЛЭГАК с учетом кинетики детонации МК для взрывчатого состава на основе ТАТБ. Сравнение экспериментальных и расчетных данных демонстрируют работоспособность кинетики детонации МК с использованием рекомендованных параметров для ВВ на основе ТАТБ.

Расчетно-теоретический анализ распространения детонации в образцах ВВ на основе ТАТБ позволяет более детально оценить переходные процессы в детонационной волне и дополнить информацию, полученную в экспериментах.

**THE THEORETICAL AND COMPUTATIONAL
ANALYSIS OF THE PROPAGATION
OF DETONATION IN CYLINDRICAL SAMPLES
OF EXPLOSIVE BASED ON TATB**

M. O. Shirshova¹, V. B. Titova¹, N. A. Volodina¹,
I. A. Spirin¹, E. R. Prueel²,
K. A. Tan², A. O. Kashkarov²

¹Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific
Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

²Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Siberian Branch of
the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

In this paper described the results of the research detonation wave's propagation in cylindrical samples of explosive based on TATB. The experimental data were obtained on the influence of the front curvature and the charge diameter on the detonation velocity in the VNIIEF and the Lavrent'ev Institute of Hydrodynamic. The critical diameter for an explosive based on TATB has been determined. The numerical simulation was carried out using the kinetic detonation model MK for an explosive based on TATB in the LEGAK method. Comparison of experimental and calculated data demonstrates the efficiency of the kinetic detonation model MK using the recommended parameters for explosive based on TATB.

The theoretical and computational analysis of the propagation of detonation in cylindrical samples of explosive based on TATB makes it possible to evaluate in more detail the processes in the detonation wave and to supplement the information obtained in the experiments.

Секция 3
ЯВЛЕНИЯ В ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ

Section 3
DENSE PLASMA PHENOMENA

3-1

УВЕЛИЧЕНИЕ ЭНЕРГОВКЛАДА ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ МИШЕНЕЙ БЫСТРОГО ЗАЖИГАНИЯ С НЕПРЯМЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Фэн Чжан

Лаборатория физики плазмы Центра лазерных
термоядерных исследований Китайской академии
инженерной физики, Мянъян, 621900,
Китайская народная республика
E-mail: zhangfeng8813@foxmail.com

Одним из наиболее перспективных подходов к достижению высокого коэффициента усиления при осуществлении инерциального термоядерного синтеза является схема быстрого зажигания. В этой схеме генерируется релятивистский пучок электронов, который проходит через плазму находящуюся в процессе имплозии, и часть своей энергии выделяет в центральной области мишени. Однако большой угловой разброс релятивистского пучка электронов и плохо контролируемая компрессия мишени влияют на реализацию метода быстрого зажигания. В настоящем докладе мы показываем, что осуществление имплозии при непрямом воздействии (под действием рентгеновского излучения, генерируемого в золотом кольце) лазерных импульсов на высоком пьедестале с короткой базой менее 200 пс позволяют получить сильное сжатие оболочки. Кроме того, мы показываем, что можно оптимизировать симметрию имплозии оболочки путем изменения длины кольцевого, успешно регулируя оболочку в виде трубки для компенсации большого углового разброса релятивистского электронного пучка и увеличения эффективности взаимодействия электронов с центральной областью мишени при помощи резистивных магнитных полей. Благодаря этим экспериментальным методикам было достигнуто существенное улучшение выхода нейтронов в наших экспериментах по быстрому зажиганию с непрямым воздействием. Эти результаты открывают путь к экспериментам по быстрому зажиганию с высоким энерговыделением в мишени с непрямым воздействием, подобным тем, которые проводятся на Национальной установке по получению зажигания (NIF, США).

Литература

1. **Cai, H. B.** et al. Enhancing the number of high-energy electrons deposited to a compressed pellet via double cones in fast ignition [Text] // Phys. Rev. Lett. – 2009. – 102, 245001.
2. **Shan, L. Q.** et al. Experimental evidence of kinetic effects in indirect-drive inertial confinement fusion hohlraum [Text] // Phys. Rev. Lett. – 2018. – 120, 195001.
3. **Zhang, F.** et al. Measurement of the injecting time of picosecond laser in indirect-drive integrated fast ignition experiments using an X-ray streak camera [Text] // Rev. Sci. Instrum. – 2019. – 90, 033504.
4. **Zhang, F.** Enhanced energy coupling for indirect-drive fast-ignition fusion targets [Text] / F. Zhang, H. B. Cai, W. M. Zhou et al. // Nat. Phys. – 2020. <https://doi.org/10.1038/s41567-020-0878-9>.

ENHANCED ENERGY COUPLING FOR INDIRECT DRIVE FAST IGNITION FUSION TARGETS

Feng Zhang

Science and Technology on Plasma Physics Laboratory,
Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang, China

E-mail: zhangfeng8813@foxmail.com

One of the most promising approaches to reach a high gain in inertial confinement fusion is the fast ignition scheme. In this scheme, a relativistic electron beam is generated; this passes through the imploded plasma and deposits parts of its energy in the core. However, the large angular spread of the relativistic electron beam and the poorly controlled compression of the target affect realization of the fast ignition technique. Here, we demonstrate that indirectly driven (that is, driven by X-rays generated inside a gold hohlraum) implosions with a ‘high-foot’ and a short-coast time of less than 200 ps allow us to tightly compress the shell. Furthermore, we show the ability to optimize the symmetry of the imploding shell by changing the hohlraum length, successfully tuning a suitable tube-shaped shell to compensate for the large angular spread of the relativistic electron beam and to enhance the electron-to-core coupling efficiency via resistive magnetic fields. Benefiting from those experimental techniques, a significant enhancement in neutron yield was achieved in our indirectly driven fast ignition experiments. These results pave the way towards high-coupling fast ignition experiments with indirectly driven targets similar to those at the National Ignition Facility.

Reference

1. **Cai, H. B.** et al. Enhancing the number of high-energy electrons deposited to a compressed pellet via double cones in fast ignition [Text] // Phys. Rev. Lett. – 2009. – 102, 245001.
2. **Shan, L. Q.** et al. Experimental evidence of kinetic effects in indirect-drive inertial confinement fusion hohlraum [Text] // Phys. Rev. Lett. – 2018. – 120, 195001.
3. **Zhang, F.** et al. Measurement of the injecting time of picosecond laser in indirect-drive integrated fast ignition experiments using an X-ray streak camera [Text] // Rev. Sci. Instrum. – 2019. – 90, 033504.
4. **Zhang, F.** Enhanced energy coupling for indirect-drive fast-ignition fusion targets [Text] / F. Zhang, H. B. Cai, W. M. Zhou et al. // Nat. Phys. – 2020. <https://doi.org/10.1038/s41567-020-0878-9>.

3-2

МОЩНЫЕ УНИПОЛЯРНЫЕ ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ИМПУЛЬСЫ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ МИШЕНИ ЛАЗЕРОМ

А. В. Брантов^{1,2}, А. С. Куратов^{1,2}, В. Ю. Быченков^{1,2}¹Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН,
Москва, Россия²Всероссийский научно-исследовательский институт
автоматики им. Н. Л. Духова, Москва, Россия

Изучение вторичного излучения, возникающего при взаимодействии мощного лазера с плазмой, привлекает повышенное внимание, так как возможность создавать управляемое сильное электромагнитное поле в небольшом объеме открывает путь для целого ряда приложений в медицине, биологии, материаловедении, а также в ускорительной и терагерцовой физике. К настоящему времени установлено, что основной механизм генерации электромагнитных импульсов в терагерцовом (ТГц) диапазоне спектра связан с выбросом из мишени лазерно-нагретых электронов вместе с последующей зарядкой самой мишени. В этом докладе мы представляем теоретическую модель [1], которая описывает генерацию нестационарной бегущей волны в ближней зоне в том же подходе, который использовался в теории переходного излучения. Получено аналитическое решение задачи Коши уравнений Максвелла для полуграниченной среды с высокой (идеальной) проводимостью, демонстрирующее появление импульсов терагерцового диапазона при пересечении границы мишень-вакуум пучком быстрых релятивистских электронов. Показано, что нормальная компонента электрического поля вблизи поверхности, имеющая форму импульса, бегущего со скоростью света, отвечает импульсу поверхностного заряда противоположного знака, отвечающего за зарядку мишени. Полученные решения объясняют целый ряд экспериментальных фактов, связанных с регистрацией сильных приповерхностных полей вдали от области воздействия лазерного импульса, а также регистрации импульсов тока.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ-Росатом (грант № 20-21-00023).

Литература

1. Brantov, A. V. et al [Text] // Phys. Rev. E. – 2020. – 102, 021202(R).

POWERFUL UNIPOLAR TERAHERTZ PULSES DUE TO TARGET IRRADIATION BY LASER

A. V. Brantov^{1,2}, A. S. Kuratov^{1,2}, V. Yu. Bychenkov^{1,2}¹Lebedev Physics Institute of the Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia²Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA),
Moscow, Russia

Secondary radiation arising from the interaction of a powerful laser with a plasma is now a topical issue. The

ability to create controlled high electromagnetic field in a small volume opens way for many applications in terahertz physics, medicine and biology, material science, acceleration physics. It has been identified that electron bunch ejection together with following target charging are the main sources of electromagnetic pulse generation in terahertz (THz) spectral range. In this talk we present a theoretical model [1], which describes the appearance of a nonstationary traveling wave in the near field in the same approach that was used in the theory of transition radiation. An analytical solution to the Cauchy problem of Maxwell's equations for a semi-bounded medium with high (ideal) conductivity is obtained, which demonstrates the appearance of pulses in the terahertz range when a beam of fast relativistic electrons crosses the target-vacuum interface. It is shown that the normal component of the electric field near the surface, which has the shape of a pulse traveling at the speed of light, corresponds to a pulse of the surface charge of the opposite sign, which is responsible for target charging. The solutions obtained explain a number of experimental facts related to the registration of strong near-surface fields far from the region of action of the laser pulse, as well as the registration of current pulses.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant 20-21-00023).

References

1. Brantov, A. V. et al. [Text] // Phys. Rev. E. – 2020. – 102, 021202(R).

3-3

ЯРКОЕ СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В РЕЖИМЕ РЕЛЯТИВИСТСКОГО САМОЗАХВАТА КОРОТКОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА

О. Е. Вайс, М. Г. Лобок, В. Ю. Быченков

Всероссийский научно-исследовательский институт
автоматики им. Н. Л. Духова, Москва, Россия

E-mail: ovais@lebedev.ru

Высокоэнергетичные пучки электронов, ускоряемые лазерно-плазменными ускорителями и испытывающие бетатронные осцилляции в плазменной полости, могут генерировать яркое синхротронное рентгеновское излучение. Небольшой размер (до 1 мкм), сверхкороткая длительность и относительно низкая расходимость излучения делают такие бетатронные источники привлекательными для приложений в биологии, химии, медицине и материаловедении. В то же время в плотной газовой плазме короткий лазерный импульс может распространяться в релятивистском режиме самозахвата, который обеспечивает эффективное преобразование лазерной энергии в ускоренные электроны с наибольшим общим зарядом. 3D-PIC моделирование показало, что рассматриваемый режим приводит к генерации рентгеновского

излучения с энергией фотонов 0,1–1 МэВ, низкой расходимостью и высокой яркостью. Было показано, что лазерный импульс мощностью 135 ТВт может генерировать до 3×10^{10} фотонов с энергией >10 кэВ, а пучок мощностью 1,2 ПВт позволяет генерировать около 10^{12} фотонов в том же диапазоне энергий. На основе моделирования методом пробных частиц для различных конфигураций полей лазерного импульса и плазменной полости мы проанализировали роль лазерного поля в бетатронном излучении. Было показано, что лазерный импульс, заполняющий плазменную полость, обеспечивает эффективную загрузку большого количества электронов и запускает солитоноподобную плазменную структуру с сильными ускоряющими полями, которая распространяется на довольно большое расстояние. Мы прогнозируем сверхяркие рентгеновские пучки, которые могут быть получены лазерной системой в несколько Дж, длительностью в десятки фс, работающей на частоте 10 Гц. Такая схема может иметь эффективность преобразования лазерного импульса в фотоны на порядок превышающую уже достигнутую в подобных экспериментах.

BRIGHT SYNCHROTRON RADIATION FROM RELATIVISTIC SELF-TRAPPING OF A SHORT LASER PULSE

O. E. Vais, M. G. Lobok, V. Yu. Bychenkov

Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA),
Moscow, Russia

E-mail: ovais@lebedev.ru

On a short distance, laser-plasma accelerator can produce high-energy and high-current electron bunches emitting bright synchrotron X-ray radiation. A small size (down to 1 μm), ultrashort duration and relative low divergence make such betatron sources attractive for applications in biology, chemistry, medicine, and material science. At the same time in dense gas plasma a short laser pulse can propagate in relativistic self-trapping mode that provides effective conversion of laser energy to the accelerated electrons maximizing the total charge of the accelerating electrons, which emits a large amount of betatron radiation. The 3D particle-in-cell simulations have revealed how such regime triggers X-ray generation with 0.1–1 MeV photon energies, low divergence, and high brightness. It has been shown that a 135 TW laser can produce up to 3×10^{10} photons of >10 keV energy and a 1.2 PW laser makes it possible generating about 10^{12} photons in the same energy range. Based on the test particle simulation for different configurations of laser and plasma-cavity fields, we have analyzed the role of the laser field in the betatron radiation. It has been shown that a laser pulse filling the plasma cavity enables effective loading high number of electrons and triggers soliton-like acceleration structure with strong accelerating plasma field and rather long propagation distance. We predict extrabright X-ray beams, which can be produced with few J, tens of fs laser system working at 10 Hz and might have order of magnitude larger (than already achieved) laser-

to-photons conversion efficiency. We suppose that experiments encouraged by such scheme are very attractive and timely.

3-4

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ПЛАЗМЫ

И. Ю. Вичев¹, Д. А. Ким^{1,2},
А. Д. Соломянная¹, А. С. Грушин¹

¹Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН,
Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», Москва, Россия

E-mail: kimda@iam.ru, vichevilya@keldysh.ru

При решении задач радиационной газовой динамики требуется знать населенности основных и возбужденных состояний ионов и спектральные характеристики вещества, а именно коэффициент поглощения и излучательную способность. В случае столкновительно-излучательного равновесия можно использовать заранее рассчитанные таблицы населенностей и спектральных характеристик. Это существенно упрощает моделирование излучающей плазмы, так как отпадает необходимость громоздких вычислений данных величин в каждый момент времени в каждой ячейке пространства.

Существует класс задач, для которых нестационарность носит принципиальный характер, например: воздействие фемтосекундных лазеров на вещество, заморозка ионизации при разлете плазмы и другие случаи, где скорость изменения термодинамических величин больше скоростей радиационных и столкновительных процессов. Для моделирования таких задач был разработан специальный программный модуль, с помощью которого из решения системы нестационарных уравнений поуровневой кинетики вычисляются населенности и спектральные коэффициенты поглощения и излучательная способность. Модуль является частью комплекса программ THERMOS [1], разрабатываемого в ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. В данной работе представлены некоторые результаты вычислений населенностей и радиационных свойств нестационарной плазмы при различных условиях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-01-00485. Вычисления проведены с помощью гибридного суперкомпьютера К-100, установленного в Центре коллективного пользования ИПМ им. М. В. Келдыша РАН и МВС-10П (МСЦ РАН).

Литература

1. Vichev, I. Yu. et al. On certain aspects of the THERMOS toolkit for modeling experiments [Text] // High Energy Density Phys. Elsevier. – 2019. – P. 100713.

SIMULATION OF NON-STATIONARY PLASMA

I. Yu. Vichev¹, D. A. Kim^{1,2},
A. D. Solomyannaya¹, A. S. Grushin¹

¹Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russia

²National Research Nuclear University “MEPhI”,
Moscow, Russia

E-mail: kimda@kiam.ru, vichevilya@keldysh.ru

Simulations of high energy density problems with radiation hydrodynamic codes implies availability of certain matter properties, i.e. equation of state, opacity, emissivity, etc. In many cases, this data can be preliminary calculated in a certain approximation, tabulated and used in RHD calculations by means of an interpolation procedure. This approach is very effective from reduction of calculation cost point of view and produces reasonable results as long as the atomic models applicability preconditions are met for the problem at hand.

However, there are problems where this tabular approach is not applicable. For example, irradiation of matter with ultrashort laser pulses is essentially a non-stationary problem since the characteristic hydrodynamic times are comparable with rates of elementary atomic processes. Such plasmas cannot be simulated within the stationary approximation, which is usually used for matter properties table calculations. A consistent approach is required in this case, with atomic properties being calculated in non-stationary approximation concurrently with RHD simulation. Step one – development of non-stationary module – has been implemented as part of the THERMOS code [1] and results for a few sample problems are presented in our report.

The reported study was funded by RFBR, project number 20-01-00485. The calculations were performed on the hybrid supercomputer K-100 installed in the Supercomputer Centre of Collective Usage of KIAM RAS and MVS-10P (JSCC RAS).

References

1. **Vichev, I. Yu.** et al. On certain aspects of the THERMOS toolkit for modeling experiments [Text] // High Energy Density Phys. Elsevier. – 2019. – P. 100713.

3-5

**МОДЕЛЬ КУЛОНОВСКОГО ВЗРЫВА
ПЛОСКОЙ ОДНОРОДНОЙ МИШЕНИ
С ДВУМЯ СОРТАМИ ИОНОВ**

И. М. Габдрахманов, Е. А. Говрас

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Ускорение ионов под действием мощных лазерных импульсов продолжает оставаться одной из актуальных тематик современной физики высоких плотностей энергии. При этом перспективным вариантом мишеней выступают тонкие (субмикронные) фольги

с двумя сортами ионов. «Подталкивая» более легкие частицы своим кулоновским полем, тяжелые ионы остова играют роль «кулоновского поршня», что положительно сказывается на спектрально-энергетических характеристиках ускоренных частиц.

Развитие лазерных систем позволяет уже сейчас достигать интенсивностей лазерного излучения порядка 10^{22} Вт/см². При столь высоких световых потоках и небольших толщинах мишени становится возможной реализация механизма кулоновского взрыва – практически мгновенной ионизации атомов мишени и удаления практически всех электронов из ее объема.

Несмотря на относительную простоту кулоновского взрыва, связанную с отсутствием необходимости самосогласованно учитывать поведение электронной компоненты плазмы, имеющиеся теоретические работы по этой теме способны описывать ионное ускорение лишь в ограниченном диапазоне внешних параметров. В настоящей работе нами была построена аналитическая модель, свободная от этих ограничений. На основе сравнения с численным моделированием продемонстрирована высокая точность модели. Для исследования оптимизации пучков были найдены условия, соответствующие максимальной доле частиц вблизи спектрального максимума.

**COULOMB EXPLOSION MODEL
OF FLAT HOMOGENEOUS TARGET
WITH TWO ION SPECIES**

I. M. Gabdrakhmanov, E. A. Govras

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

Ion acceleration by intense laser pulses still remains one of the actual topics of modern high energy density physics. One of the perspective types of targets is thin (submicron) foils with two ion species. By “pushing” lighter particles with their coulomb field, heavy core ions play the role of “coulomb piston”, which positively affects spectral-energy characteristics of accelerating particles.

Development of laser systems allows to achieve laser pulse intensities about 10^{22} W/cm². With such high light flux and small target thicknesses it is possible to implement coulomb explosion mechanism – almost instantaneous ionization of target atoms and removal of almost all electrons from its volume.

Possibility to ignore self-consistent movement of electron component makes description of coulomb explosion rather simple. However, theoretical works to date can describe ion acceleration only in limited range of external parameters. In this work we developed analytical model free from this restriction. We demonstrate high accuracy of our model based on comparison with numerical simulation. In order to study beam optimization, we found conditions maximizing particle concentration near spectral maximum.

3-6

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ МИШЕНЕЙ ПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ

С. И. Глазырин, П. П. Захаров,
К. Е. Городничев, С. Е. Куратов

Всероссийский научно-исследовательский институт
автоматики им. Н. Л. Духова, Москва, Россия

E-mail: glazyrin@vniia.ru

В работе обсуждается гидродинамическая устойчивость мишеней прямого облучения, предложенных для российской установки мегаджоульного уровня. Эти мишени разработаны для реализации схемы искрового зажигания, когда внешнее лазерное облучение запускает серию ударных волн, которые в конечном итоге формируют область зажигания в центре сжатой мишени. Большое радиальное сжатие мишени требует высокой степени начальной симметрии. Показано, что большую опасность представляет шероховатость границы топливо–аблятор. Эта граница является неустойчивой по отношению к неустойчивости Рэлея–Тейлора даже на стадии ускорения мишени. Высокая скорость роста возмущений устанавливает жесткие ограничения на амплитуду начальной шероховатости. Также в работе обсуждается эффект переноса возмущений за фронтом головной ударной волны. Этот эффект приводит к возмущению внутренней границы (лед–газ), которые вызываются внешними возмущениями. Внутренняя граница неустойчива на стадии торможения, что сказывается на параметрах плазмы в горячей области в момент максимального сжатия.

HYDRODYNAMICAL STABILITY OF DIRECT DRIVE ICF TARGETS

S. I. Glazyrin, P. P. Zakharov,
K. E. Gorodnichev, S. E. Kuratov

Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA),
Moscow, Russia

E-mail: glazyrin@vniia.ru

We discuss the hydrodynamical stability of a direct drive target proposed for Russian Megajoule Facility. The target is designed for the hot-spot ignition scheme, when external laser irradiation launch a series of shock waves that finally form an ignition region in the center of a compressed target. High compression rates and implosion velocities require precise initial symmetry. Even for uniform irradiation, the internal fabric imperfections could violate ignition of the hot spot. The most dangerous source of perturbations is roughness of the fuel-ablator interface. This interface is unstable with respect to the Rayleigh–Taylor instability even at the acceleration phase of the target evolution. Fast growth of the instability sets strict limits for an initial roughness amplitude. Also, the effect of perturbations transmission behind the front of a leading shock wave is discussed. This effect leads to the perturbation internal (gas–ice) interface induced by outer (ice-ablator) interface roughness. The former is unstable

at deceleration phase, what gives additional contribution to plasma parameters in the hot-spot.

3-7

ЭЛЕКТРОННОЕ КИНЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДИАМАГНИТНОГО ОБЛАКА И КВАЗИПОПЕРЕЧНАЯ ОБЫКНОВЕННАЯ МОДА

В. М. Губченко

Институт прикладной физики РАН,
Нижний Новгород, Россия

E-mail: ua3thw@appl.sci-nnov.ru

Динамичную электромагнитную токнесущую систему/каверну (ТС), расширяющуюся вдоль и поперек вытесняемого внешнего магнитного (ВМ) поля в разреженной плотной фоновой плазме, называют диамагнитным облаком/областью (ДО). [1]. Каверна образуется в результате разлета со сверхзвуковой скоростью сторонней горячей бесстолкновительной (ГБ) плазмы от источника инжекции. Разлет характеризуется альвеновскими числами Маха, инжекция вносит асимметрию и анизотропию, которые определяются параметрами, вычисленными по форме функции распределения электронов и ионов (ФРЧ).

Инжекция вносит обобщенный импульс, формируя ТС. Внутри ТС/каверны наблюдаются структуры плазмы и полей, обусловленные плазменными масштабами дисперсии ГБ плазмы. Каверна анизотропная: выделяется свободный разлет вдоль ВМ поля, но выделяется узкая сложная ТС прорыва/разрыва поперек ВМ поля. При инжекции изотропной формируется конический «диск», при инжекции в полупространство, анизотропной, формируется коническая «лопата» по долготе и узкая по азимуту [2].

Предполагаются достаточно высокие «закритические» значения электронного плазменного «гипербета» внутри ДО и достаточно низкие «докритические» на границе проникновения ДО в фоновую плазму [2]. Критические значения электронных бета в ДО значительно выше единицы, вычисленные по масштабами пространственной дисперсии индукционной («энтропийной») моды, определяемыми параметрами формы ФРЧ электронной компоненты плазмы. Такие ДО становятся источниками ускоренных индукционным полем потоков резонансных с полем электронов, обуславливающих кинетический эффект бесстолкновительной диссипации («резистивность») в ДО. Эффект необходим для разрыва силовых линий и разделения каверной магнитного потока от ВМ поля. Возбуждаются коллективные азимутальные («магнитодипольные») и продольные («тороидальные») к ВМ полю ТС, самосогласованно влияющие на всю структуру облака и поля в каверне.

При высоких, но еще «докритических», значениях бета на границе каверны ГБ электроны рассматриваются замагниченными. В их описании бесстолкновительной «электронной МГД» эффект ускорения

электронов, т. е. резистивность отсутствует. Поэтому мы обращаем внимание на «обыкновенную» («О») моду в плазме, возбуждаемую продольной к ВМ полую компонентой импульса инжекции. «О» мода при квазиперпендикулярном возмущении к ВМ полю подобна «кинетической» моде индукционного поля незамагниченной ГБ плазмы, хорошо описывающей внутренние резистивные и диамагнитные ТС структуры каверны в «закритическом» режиме. У квазиперпендикулярной «О» моды электрическое поле направлено вдоль ВМ поля, это дает возможность свободного индукционного ускорения резонансных электронов, т. е. введения эффективной электронной проводимости и возможности возбуждения уже «тороидальной» компоненты ТС каверны.

В МГД описании гибридных частот плазмы эта «О» мода представлена как особенность показателя преломления на нулевой гибридной частоте, что соответствует циклотронному черенковскому электронному резонансу в плазме в ее зоне непрозрачности. Эта МГД особенность устраняется в квази МГД описаниях [3], а в кинетическом описании ГБ электронов в узком квазиперпендикулярном широтном угловом интервале формируется линия поглощения, обуславливая формирование диссипативного прорыва.

Квазиперпендикулярные возмущения с поляризацией «необыкновенной» («НО») моды возбуждаются азимутальной компонентой импульса инжекции и описывают «магнитодипольную» компоненту ТС каверны с магнитозвуковым движением границы ионного скин-слоя масштаба, описывается в МГД на основе («магнито ламинарного механизма – МЛМ») [4].

Работа выполнена в рамках Государственных заданий № 0030-2021-0002 и № 0030-2021-0015, и частично поддержана грантами РФФИ (№ 19-02-00704, № 20-02-00108).

Литература

1. **Winske, D.**, et al. // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. – 2019. – Vol. 5, a. 51. – P. 1–14. DOI: 10.3389/fspas.2018.00051.
2. **Gubchenko, V. M.** // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2015. – Vol. 55, No. 7. – P. 831–845, DOI: 10.1134/S0016793215070099. – 2015. – No. 8. – P. 1009–1025, DOI: 10.1134/S0016793215080101.
3. **Гершман, Б. Н.**, Ковнер, М. С. // *Изв. ВУЗ «Радиофизика»*. – 1958. – Т. 1, № 3. – С. 19–24.
4. **Bashurin, V.**, Golubev, A., Terekhin, V. // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* – 1983. – Vol. 24. – P. 614–622. DOI: 10.1007/BF00905870.

ELECTRON KINETIC DESCRIPTION OF DIAMAGNETIC CLOUD AND QUASIPERPENDICULAR ORDINARY MODE

V. M. Gubchenko

Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

E-mail: ua3thw@appl.sci-nnov.ru

Dynamic electromagnetic current carrying system (CS) cavern/cavity expanding along and transverse to the

forced out external magnetic (EM) field in the hot collisionless (HC) background plasma is called diamagnetic cloud/region (DC/DR) [1]. The cavern is formed due to expansion with supersonic velocity of the external HC plasma provided by the injection. Plasma expansion is characterized by Alfvén Mach number.

This injection provides asymmetry and anisotropy which are calculated via shape of the particle distribution function (PDF) of electrons and ions. Injection provides electromechanical momentum forming CS in the system. Inside of the CS/cavern spatial structures of plasma and fields are observed and defined by plasma dispersion scales of the HC plasma. The cavern is with angle anisotropic: there is a free expansion along the EM field and a very narrow CS with tearing/breakthrough perpendicular to the EM field. For quasi perpendicular to the EM field isotropic injection the “conic CS disk” is formed and for the halfspace injection the “conic spade” is formed [2].

It is proposed high “overcritical” or “hyperbeta” over unit values of the electron plasma expansion inside of DC and low “subcritical” at the border of the DC [2]. Critical values of electron beta inside DC are defined by the scales of spatial dispersion of the inductive (“entropy”) mode defined by shape parameters of the PDF of electron plasma component. Such DC become sources of resonant electrons flux accelerated by inductive field responsible for kinetic effect of collisionless dissipation (“resistivity”). The dissipation provides tearing of EM field lines and separation by the cavern of the magnetic flux. There are collective quasiazimuthal (“magnetodipole”) and quasilongitudinal (“toroidal”) CS in the relation to the direction of the EM field.

Under high but “undercritical” values of plasma beta on the border of DC the HC electrons are considered magnetized. In the electron MHD description the effect of particle acceleration, i.e. conductivity is absent. We pay attention to the “ordinary” (“O”) mode in the plasma, which is excited by longitudinal to the EM field component of the injected momentum under quasiperpendicular to EM field, perturbation. The “O” mode is similar to the inductive mode in the unmagnetized HC plasma, which well describes internal regions of the DC in the “overcritical beta” expansion regime. Quasiperpendicular “O” mode excites electric field directed along EM field, which provides free inductive acceleration of electrons, i. e., provides effective electron conductivity and excitation of the “toroidal” component of the CS in the cavern.

In the MHD description of three hybrid plasma frequencies the “O” mode case is presented as a cavern/cavity is singularity of the refraction index at the zero frequency. It is related to the cyclotron Cherenkov electron resonance in plasma in the nontransparency regime. This singularity removed in quasi MHD description [3] and in kinetic HC description of electrons at quasiperpendicular longitudinal narrow angles forming absorption line providing plasma breakthrough.

Quasiperpendicular perturbations with the “nonordinary” (“NO”) mode polarization are excited by the momentum azimuthal component injection. It describes magnetodipole component of the DC CS by magneto-

sonic motion forming border with the ion skin scale described by MHD magneto laminar mechanism MLM [4].

The work is in the frame of the Russian State Orders № 0035-2019-0002, № 0035-2019-0015 and supported by the grants RFBR (№. 19_02_00704, № 20-02-00108).

Reference

1. **Winske, D.**, et al. // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. – 2019. – Vol. 5, a. 51. – P. 1–14. DOI: 10.3389/fspas.2018.00051.
2. **Gubchenko, V. M.** // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2015. – Vol. 55, No. 7. – P. 831–845, DOI: 10.1134/S0016793215070099. – 2015. – No. 8. – P. 1009–1025, DOI: 10.1134/S0016793215080101.
3. **Gershman, B. N.**, Kovner M. S. // *Izv. VUZ «Radiophysics»*. – 1958. – Vol. 1, № 3. – P. 19–24.
4. **Bashurin, V.**, Golubev, A., Terekhin, V. // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* – 1983. – Vol. 24. – P. 614–622. DOI: 10.1007/BF00905870.

3-8

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОПЛОТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

А. Г. Казаков, Н. А. Пхайко, К. В. Сафронов,
В. Н. Горнов, Л. Е. Пешкичева, С. Н. Пахомов

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия
E-mail: dep5@vniitf.ru

Для экспериментов по взаимодействию лазерного излучения с веществом отработан способ изготовления низкоплотного материала из алюминия и меди методом резистивного распыления в среде инертного газа – аргона. Распыление производилось при двух давлениях газа: 40 и 440 Па. Плотности полученных образцов определялись весовым методом: масса напыленного слоя измерялась при взвешивании подложки до и после напыления, объем рассчитывался исходя из измерений толщины материала посредством оптического профилометра. Толщина напыленного слоя составляет $74,8 \pm 0,9$ мкм. Минимальная плотность была достигнута на образце пористого алюминиевого слоя, полученного при давлении 440 Па. Ее значение составило (72 ± 4) мг/см³. По изображениям, полученным посредством сканирующего электронного микроскопа, установлено, что размеры пор в материале не превышают 3 мкм. Измерения химического состава рентгенофлуоресцентным спектрометром показали присутствие на образцах кислорода, что свидетельствует об окислении поверхностного слоя изготовленных образцов. Из полученных в работе образцов пористого алюминия были изготовлены мишени (2 шт.) для экспериментов по взаимодействию лазерного излучения с веществом.

PRODUCTION AND RESEARCH OF LOW-DENSITY METAL MATERIALS

A. G. Kazakov, N. A. Pkhaiko, K. V. Safronov,
V. N. Gornov, L. E. Peshkicheva, S. N. Pakhomov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia
E-mail: dep5@vniitf.ru

For experiments on laser interaction with matter, a method has been developed for manufacturing a low-density material from aluminum and copper by the method of resistive sputtering in an inert gas – argon. Deposition was carried out at two gas pressures: 40 and 440 Pa. The densities of the obtained samples were determined by the gravimetric method: the mass of the sprayed layer was measured by weighing the substrate before and after deposition, the volume was calculated based on measurements of the material thickness using an optical profilometer. The thickness of the deposition layer is 74.8 ± 0.9 μm. The minimum density was achieved on a sample of a porous aluminum layer obtained at a pressure of 440 Pa. Its value was (72 ± 4) mg/cm³. According to the images obtained with a scanning electron microscope, it was found that the pore size in the material does not exceed 3 microns. Measurements of the chemical composition with an X-ray fluorescence spectrometer showed the presence of oxygen on the samples, which indicates the oxidation of the surface layer of the prepared samples. Targets (2 pcs.) for experiments on laser interaction with matter were made from the samples of porous aluminum obtained in this work.

3-9

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ КОМПЛЕКС «ЭЛЬФ» КИЛОДЖОУЛЬНОГО УРОВНЯ ЭНЕРГИИ: КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ДИЗАЙН И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОГРАММА В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ

А. П. Кузнецов¹, В. Н. Деркач², С. Г. Гаранин^{2,1},
К. Л. Губский¹, С. Ю. Гуськов^{4,1}, Ю. В. Кочетков¹,
В. В. Кравченко¹, А. В. Михайлюк¹, А. П. Мелехов¹,
И. Б. Мухин⁵, А. А. Соловьёв⁵,
С. А. Пикуз^{6,1}, С. В. Попруженко^{3,1}

¹Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», Москва, Россия

²Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

³Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН,
Москва, Россия

⁴Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН,
Москва, Россия

⁵Институт прикладной физики РАН,
Нижний Новгород, Россия

⁶Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

E-mail: apkuznetsov@mephi.ru

В настоящее время в мире постоянно расширяется фронт работ по созданию импульсных мощных лазерных установок, при фокусировке излучения которых достигаются плотности мощности, позволяющие создавать в веществе термодинамические состояния доступные в природе только в центрах массивных звезд. Эти установки позволяют проводить обширные экспериментальные исследования в области фундаментальных и прикладных задач в физике экстремального состояния вещества, лабораторной астрофизики, экспериментальных исследований в рамках работ по лазерному термоядерному синтезу (ЛТС).

Сложившаяся концепция организации усилительных систем для проведения исследований в области ЛТС и экстремального состояния вещества ориентирована на четырехпроходный режим усиления. Предельные энергетические характеристики систем ограничены возможностями транспортировки интенсивного излучения оптическими элементами, накоплением В-интеграла и др. Повторение оптического пути при несовершенном качестве транспортной и усилительной систем приводит к интенсивному накоплению aberrаций. При этом, подавляющая часть энергии пучок аккумулирует лишь при последнем проходе усилителей.

Предложено организовать усиление лазерного излучения в режиме многократного насыщения. Реализация новой усилительной схемы в рамках проекта многофункционального лазерного комплекса ELF (Experimental Laser Facility) обеспечит: уменьшение количества деталей, участвующих в усилении и транспортировке излучения, снижение расходимости; увеличение КПД извлечения запасенной энергии, повышение функциональных возможностей установки, увеличение частоты проведения экспериментов, улучшение эргономики размещения, снижение цены канала и эксплуатационных расходов.

В рамках работ по созданию многофункционального лазерного комплекса предполагается разработка установки с регулируемыми временными, спектральными и энергетическими параметрами, состоящей из двух лазерных каналов с возможностью генерации в одном эксперименте двух управляемых по временной задержке импульсов излучения: наносекундного импульса с энергией до 7 кДж (длительность $(1-10) \cdot 10^{-9}$ с) (плотность мощности на мишени до 10^{16} Вт/см²) и субпикосекундного импульса энергией до 300 Дж (длительность $\sim 1,0 \cdot 10^{-12}$ с) (плотность мощности на мишени до 10^{20} Вт/см²). Технические возможности комплекса позволят проводить экспериментальные исследования, недоступные для подавляющего большинства лазерных установок.

MULTI-KJ GLASS LASER SYSTEM "ELF": CONCEPTUAL DESIGN AND HIGH DENSITY ENERGY RESEARCH PROGRAM

A. P. Kuznetsov¹, V. N. Derkach², S. G. Garanin^{2,1},
K. L. Gubskiy¹, S. Yu. Gus'kov⁴, Yu. V. Kochetkov¹,
V. V. Kravchenko¹, A. V. Mikhaluk¹, A. P. Melekhov¹,
I. B. Mukhin⁵, A. A. Solovyov⁵,
S. A. Pikuz^{6,1}, S. V. Popruzhenko^{3,1}

¹National Research Nuclear University MEPhI,
Moscow, Russia

²Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific
Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

³General Physics Institute RAS, Moscow, Russia

⁴Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia

⁵Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

⁶Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

E-mail: apkuznetsov@mephi.ru

Nowadays there is a constant expansion of the front of work on the development of powerful pulsed laser facilities, capable of focusing radiation to such power densities that make it possible to create thermodynamic states of matter, existing in nature only at the centers of massive stars. These facilities allow conducting extensive experimental research in the field of fundamental and applied problems in the physics of the extreme state of matter, laboratory astrophysics, and experimental research within the framework of inertial confinement fusion (ICF).

The current concept of amplification systems layout for research in the field of ICF and the extreme states of matter is oriented to the four-pass amplification scheme. The maximum energy characteristics of such systems are limited by the possibilities of transporting the intense radiation by optical elements, the accumulation of the B-integral, etc. Repeating the optical path with an imperfect quality of the transport and amplification systems leads to an intensive accumulation of aberrations. In this case the beam accumulates the major part of the energy only during the last pass of amplifiers.

It was proposed to engineer the multiple saturation regime of laser radiation amplification. The implementation of the new amplification scheme within the framework of the multifunctional laser complex ELF project (Experimental Laser Facility) will provide: a reduction in the number of parts involved in amplification and transportation of radiation; a decrease of the divergence; an increase in the stored energy extraction efficiency; an increased installation functionality; an increase in the experiments frequency; an improvement in the ergonomics of the setup; a reduction of the channel price and operating costs.

As a part of multifunctional laser complex development, the elaboration of an installation with adjustable temporal, spectral and energy characteristics is intended. The installation consists of two laser channels for the possibility to generate two radiation pulses with adjustable time delay in one experiment: a nanosecond (duration of $(1-10) \cdot 10^{-9}$ s) pulse with energy up to 7 kJ (power density on the target up to 10^{16} W/cm²) and a subpicosecond (duration of $\sim 1,0 \cdot 10^{-12}$ s) pulse with an energy up to 300 J (power density on the target up to 10^{20} W/cm²). The

technical capabilities of the laser complex will allow to conduct an experimental studies, inaccessible to the vast majority of laser systems.

3-10

ГЕНЕРАЦИЯ УДАРНЫХ ВОЛН ГИГАБАРНОГО УРОВНЯ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ИССЛЕДОВАНИЯ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

П. А. Кучугов^{1,2}, С. Ю. Гуськов¹, Р. А. Яхин¹

¹Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН,
Москва, Россия

²Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша
РАН, Москва, Россия

E-mail: pkuchugov@gmail.com

Традиционным методом исследования свойств вещества в экстремальных условиях являются эксперименты с ударными волнами (УВ), инициированными в конечном счете воздействием мощного лазерного импульса. Данный способ обеспечивает достижение достаточно высоких давлений, масштаб которых зависит от способа инициирования УВ в веществе. Так, при непосредственном облучении мишени лазерным или лазерно-индуцированным рентгеновским импульсом УВ создается за счет абляции вещества на облучаемой поверхности, а давление может достигать нескольких десятков Мбар [1, 2]. Другим методом, применение которого позволяет в значительной степени увеличить давление в УВ, является метод удара макрочастицей, которая ускоряется также за счет лазерной абляции. В настоящий момент с помощью такого метода достигнуты рекордные давления квазистационарной ударной волны в твердом веществе – порядка 750 Мбар [3]. Преодолеть гигабарный уровень давления УВ, как показывают расчетно-теоретические исследования [4], можно при использовании пучка релятивистских быстрых электронов, ускоренных в поле излучения лазеров петаваттной мощности. В отличие от лазерного излучения заряженные частицы способны эффективно нагревать плотное вещество в кулоновских столкновениях. Рост энергии современных лазерных установок с тераваттным и петаваттным уровнем мощности позволяет рассматривать пучки лазерно-ускоренных частиц как эффективный инструмент генерации сверхмощных УВ.

В данной работе на основе численных результатов, полученных с использованием одномерной лагранжевой программы ДИАНА, исследуется влияние параметров пучка быстрых электронов, таких как интенсивность падающего потока, энергетический спектр и температура, на характеристики УВ. Установлен эффект сильного сжатия вещества в периферийной области УВ до плотностей в несколько раз превышающих значения на фронте за счет радиационного охлаждения [5].

Обоснована возможность исследования в лабораторном эксперименте свойства веществ, в частности,

металлов сжатых до плотностей в несколько десятков г/см³ под действием давления гигабарного уровня с использованием УВ, инициируемых пучком лазерно-ускоренных электронов. Установлены параметры соответствующего лазерного импульса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 21-11-00102.

Литература

1. Гаранин, С. Г. // УФН. – 2011. – 181, 434.
2. Craxton, R. S., Anderson K. S., Boehly T. R. et al. // Phys. Plasmas. – 2015. – 22 1105–1.
3. Cauble, R., Phillion D. W., Hoover T. J. et al. // Phys. Rev. Lett. – 1993. – 70, 2102.
4. Gus'kov, S. Yu., Ribeyre X., Toutati M., et al. // PRL. – 2012. – 109, 255004.
5. Gus'kov, S. Yu., Kuchugov P. A., Vergunova G. A. // MRE. – 2021. – 6, 020301.

GIGABAR SHOCK WAVES GENERATION FOR THE PURPOSE OF STUDYING THE EQUATION OF STATE OF MATTER

P. A. Kuchugov^{1,2}, S. Yu. Gus'kov¹, R. A. Yakhin¹

¹Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, Russia

²Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS,
Moscow, Russia

E-mail: pkuchugov@gmail.com

The traditional method for studying the properties of matter under extreme conditions is experiments with shock waves (SW), ultimately initiated by the impact of a powerful laser pulse. This method ensures the attainment of sufficiently high pressures, the scale of which depends on the method of SW initiation in the substance. For example, when a target is directly irradiated with a laser or laser-induced X-ray pulse, a shock wave is created due to the ablation of matter on the irradiated surface, and the pressure can reach several tens of Mbar [1, 2]. Another method, the use of which makes it possible to significantly increase the pressure in the shock wave, is the method of impact with a macroparticle, which is also accelerated due to laser ablation. At the moment, using this method, record pressures of a quasi-stationary shock wave in a solid have been achieved – of the order of 750 Mbar [3]. It is possible to overcome the gigabar SW pressure level, as shown by theoretical and numerical calculations [4], using a beam of relativistic fast electrons accelerated in the radiation field of lasers of petawatt power. Unlike laser radiation, charged particles are capable of efficiently heating dense matter in Coulomb collisions. The increase in the energy of modern laser facilities with terawatt and petawatt power levels makes it possible to consider beams of laser-accelerated particles as an effective tool for the generation of superpowerful shock waves.

In this work, on the basis of numerical results obtained using the one-dimensional Lagrangian program DIANA, it is studied the influence of the parameters of a fast electron beam, such as the intensity of the incident flux, energy spectrum, and temperature, on the characteristics of the shock wave. The effect of strong compression

of matter in the peripheral region of the shock wave to densities several times higher than the values at the front due to radiation cooling has been established [5].

The possibility of studying in a laboratory experiment the properties of a substance, in particular, metals compressed to densities of several tens of g/cc under the action of a gigabar pressure using SW initiated by a beam of laser-accelerated electrons, is substantiated. The parameters of the corresponding laser pulse are determined.

This work was financially supported by the Russian Science Foundation, project No. 21-11-00102.

References

1. Гаранин, С. Г. // УФН. – 2011. – 181, 434.
2. Craxton, R. S., Anderson K. S., Boehly T. R. et al. // Phys. Plasmas. – 2015. – 22 1105–1.
3. Cauble, R., Phillion D. W., Hoover T. J. et al. // Phys. Rev. Lett. – 1993. – 70, 2102.
4. Gus'kov, S. Yu., Ribeyre X., Toutati M., et al. // PRL. – 2012. – 109, 255004.
5. Gus'kov, S. Yu., Kuchugov P. A., Vergunova G. A. // MRE. – 2021. – 6, 020301.

3-11

УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО И ОГРАНИЧИВАЮЩЕГО ТИПА ДЛЯ СИЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 0,4 кВ

Н. М. Лепёхин¹, Н. Н. Швец¹, В. П. Мирошниченко¹,
А. И. Орлов¹, Н. И. Пуресев¹, В. С. Сысоев¹,
М. Ю. Охрименко², Е. В. Басов³, Н. Г. Булгакова³,
В. П. Иванов³, Э. Н. Фоминич⁴

¹Высоковольтный научно-исследовательский центр
(ВНИЦ) 900, Истра, Россия

²Главное управление специальных программ Президента
Российской Федерации (ГУСП), Москва, Россия

³Всероссийский электротехнический институт – филиал
РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина,
Москва, Россия

⁴ВИ (ИТ) ВА МТО им. генерала армии А. В. Хрулёва,
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: Nikolay.Shvets@vniitf.ru

В [1] показана необходимость практического определения эффективности использования существующих (и перспективных) защитных устройств и систем для обеспечения стойкости электротехнического оборудования к воздействию электромагнитного импульса высотного ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ), преднамеренным деструктивным воздействиям мощных электромагнитных излучателей и грозových перенапряжений. Существует необходимость определения эффективности устройств защиты от импульсных перенапряжений (далее УЗИП) по таким

критериям, как их массогабаритные и стоимостные характеристики.

В докладе представлены результаты испытаний разработанных УЗИП [2, 3] с высокой энергоемкостью, предназначенных для защиты электротехнического оборудования электрических сетей специальных фортификационных сооружений (СФС) с уровнем номинального напряжения 0,4 кВ. Предназначены для защиты от импульсных перенапряжений, возникающих при коммутационных, грозových и техногенных (ядерный взрыв) электромагнитных переходных процессах.

Разработанные УЗИП предназначены для ограничения:

- импульсных токов молнии формой 10/350 мкс с амплитудой до 150 кА;
- номинальных разрядных токов электромагнитных импульсов (ЭМИ) формой тока 8/20 мкс и амплитудой до 75 кА;
- коммутационных перенапряжений до уровня не более 2,5 кВ, появляющихся на выводах УЗИП вследствие прохождения разрядных токов.

Согласно [4], для защиты оборудования (потребителей электроэнергии) от грозových и коммутационных импульсных перенапряжений могут применяться УЗИП трех типов, Во-первых, УЗИП *коммутирующего типа*, которые в отсутствие перенапряжений сохраняют высокое полное сопротивление, но могут быстро изменить его на низкое в ответ на скачок напряжения. Примером элементов, служащих коммутирующими устройствами, являются разрядники, динисторы, управляемые тиристоры. Во-вторых, УЗИП *ограничивающего типа*, которые в отсутствие перенапряжений сохраняют высокое полное сопротивление, но постепенно снижают его с возрастанием волны тока и напряжения. Примером элементов, служащих нелинейными устройствами, являются варисторы и диодные разрядники. В-третьих, УЗИП *комбинированного типа*, в которых защита выполняется при действии (срабатывании) элементов, как коммутирующего типа, так и элементов ограничивающего типа, которые могут коммутировать и ограничивать напряжение, а также выполнять обе функции. При этом действие элементов защиты зависит от характеристик воздействующего напряжения.

По результатам экспериментальных исследований трех конструктивных исполнений разработанных УЗИП (одного комбинированного типа и двух ограничивающего типа) проведена краткая оценка их эффективности по массогабаритным и стоимостным характеристикам.

В докладе приведено описание нового поколения низковольтных оксидно-цинковых резисторов (варисторов) и управляемых вакуумных разрядников, которые были использованы при разработке УЗИП.

Разработанные УЗИП для силовых распределительных электрических сетей СФС с уровнем номинального напряжения 0,4 кВ испытывались на установке ГИТ-50/5М, входящей в состав Уникальной научной установки «Комплексный высоковольтный стенд» (УНУ КВС) (<http://www.ckp-rf.ru/usu/73578/>).

Выполненный сравнительный анализ технических характеристик УЗИП показывает, что разработанные

УЗИП-0,4 существенно превосходят известные аналоги, а по некоторым из характеристик, например по скорости нарастания воздействующего напряжения превосходят их на порядок, а по длительности фронта импульса тока – более чем на порядок.

Заключение

На установке УНУ КВС, предназначенной для проведения электрофизических исследований, испытаны разработанные УЗИП-0,4 нового поколения.

Разработанные устройства по своим техническим характеристикам существенно превосходят известные аналоги.

Разработанные УЗИП-0,4 имеют улучшенные весовые и приемлемые стоимостные характеристики. Простота схемных решений позволяет использовать их в современных сетях электропитания 0,4 кВ различных потребителей.

Литература

1. Швец, Н. Н. Об энергетической безопасности России в условиях воздействия электромагнитного импульса высотного ядерного взрыва [Текст] / Н. Н. Швец, А. И. Орлов, В. С. Сысоев, Н. М. Лепёхин, Е. В. Басов // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2020. – Т. 16, № 11. – С. 2036–2059. <https://doi.org/10.24891/ni.16.11.2036>
2. **Устройства** защиты от импульсных помех УЗИП класса защиты 1-тип 1 (тип 2). Технические условия РДАВ.674361.161 ТУ.
3. **Устройства** защиты от импульсных помех УЗИП класса защиты 2, УЗИП класса защиты 3. Технические условия РДАВ.674361.162 ТУ.
4. **ГОСТ Р 51992-2011** (МЭК 61643-1:2005). Устройства защиты от импульсных перенапряжений низковольтные. Часть 1. Устройства защиты от импульсных перенапряжений в низковольтных силовых распределительных системах. Технические требования и методы испытаний.

COMBINED ELECTRICAL EQUIPMENT PROTECTION DEVICES AND LIMITING TYPE FOR POWER DISTRIBUTION ELECTRICAL NETWORKS OF 0.4 kV

N. M. Lepyokhin¹, N. N. Shvets¹, V. P. Miroshnichenko¹,
A. I. Orlov¹, N. I. Puresev¹, V. S. Sysoev¹,
M. Yu. Okhrimenko², E. V. Basov³, N. G. Bulgakova³,
V. P. Ivanov³, E. N. Fominich⁴

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, VNITs (department 900), Istra, Russia

²Main Directorate of Special Programs of the Russian Federation President (GUSP), Moscow, Russia

³Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, VEI branch, Moscow, Russia

⁴VI (IT) VA MTO named after General A.V. Khrulyov, Saint Petersburg, Russia

E-mail: Nikolay.Shvets@vniitf.ru

In [1] the necessity of practical determination of the effectiveness of the use of existing (and prospective) pro-

TECTIVE devices and systems to ensure the resistance of electrical equipment to the effects of an electromagnetic pulse of a high-altitude nuclear explosion (EMP NP), deliberate destructive effects of powerful electromagnetic emitters and lightning overvoltages is shown in [1]. There is a need to determine the effectiveness of surge protection devices (hereinafter SPD) according to criteria such as their weight and size and cost characteristics.

The report presents the test results of the developed SPD [2, 3] with high energy intensity, designed to protect the electrical equipment of electrical networks of special fortifications (SPS) with a nominal voltage level of 0.4 kV. Designed to protect against impulse overvoltages arising from switching, thunderstorm and man-made (nuclear explosion) electromagnetic transient processes.

SPDs are designed to limit:

- lightning impulse currents in the form of 10/350 μ s with an amplitude of up to 150 kA;
- rated discharge currents of electromagnetic pulses (EMP) with a current shape of 8/20 μ s and an amplitude of up to 75 kA;
- switching overvoltages up to a level of not more than 2.5 kV, appearing at the terminals of the SPD due to the passage of discharge currents.

According to [4], SPDs of three types can be used to protect equipment (electricity consumers) from lightning and switching impulse overvoltages. on a power surge. An example of elements that serve as switching devices are arresters, diodes, controlled thyristors. Secondly, SPDs of the limiting type, which, in the absence of overvoltages, maintain a high impedance, but gradually decrease it with increasing current and voltage waves. Varistors and diode arresters are examples of non-linear devices. Thirdly, SPDs of a combined type, in which protection is carried out under the action (actuation) of elements, both of the switching type and of the elements of the limiting type, which can switch and limit the voltage, and also perform both functions. In this case, the action of the protection elements depends on the characteristics of the acting voltage.

Based on the results of experimental studies of three design versions of the developed SPDs (one combined type and two limiting types), a brief assessment of their effectiveness in terms of weight, size and cost characteristics was carried out.

The report contains a description of a new generation of low-voltage zinc oxide resistors (varistors) and controlled vacuum arresters, which were used in the development of SPDs.

The developed SPDs for power distribution electrical networks SPS with a rated voltage level of 0.4 kV were tested on the GIT-50/5M installation, which is part of the Unique Scientific Installation “Complex High-Voltage Stand” (UNU KVS) (<http://www.ckp-rf.ru/usu/73578/>).

The performed comparative analysis of the SPD technical characteristics shows that the developed SPD-0.4 is significantly superior to the known analogs, and in some of the characteristics, for example, in the rate of rise of the acting voltage, they exceed them by an order of magnitude, and in the duration of the current pulse front – by more than an order of magnitude.

Conclusion

The developed SPD-0.4 of the new generation was tested at the UNU KVS installation, intended for conducting electro physical studies.

The developed devices significantly surpass the known analogues in their technical characteristics.

The developed SPD-0.4 has improved weight and acceptable cost characteristics. The simplicity of the circuit solutions allows them to be used in modern power supply networks of 0.4 kV for various consumers.

References

1. **Shvets, N. N.** On the energy security of Russia under the influence of an electromagnetic pulse from a high-altitude nuclear explosion [Text] / N. N. Shvets, A. I. Orlov, V. S. Sysoev, N. M. Lepikhin, E. V. Basov // National interests: priorities and security. – 2020. – Т. 16, No. 11. – P. 2036–2059. <https://doi.org/10.24891/ni.16.11.2036>
2. **Protection** devices against impulse noise SPD protection class 1-type 1 (type 2). Technical conditions RDAV.674361.161 TU.
3. **Protection** devices against impulse noise SPD of protection class 2, SPD of protection class 3. Specifications RDAV.674361.162 TU.
4. **GOST R 51992-2011** (IEC 61643-1: 2005) Low-voltage surge protection devices. Part 1. Surge protection devices in low-voltage power distribution systems. Technical requirements and test methods.

3-12

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕРАПИЯ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОГО УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

М. Г. Лобок, В. Ю. Быченков

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова, Москва, Россия

E-mail: mglobok@vniia.ru

Взаимодействие короткого лазерного импульса с довольно плотной газовой плазменной мишенью может привести к режиму распространения импульсов, который максимизирует заряд высокоэнергетических электронных сгустков. Этот режим соответствует распространению лазерного импульса в режиме самозахвата, где дифракционная расходимость уравновешивается релятивистской нелинейностью, так что радиус лазерного луча остается неизменным во время распространения импульса на многих длинах Рэлея. В работе демонстрируются глубокое проникновение ускоренных до энергии 30–250 МэВ электронов (Very high energy electron (VHEE)) в различные ткани человека, анализ поглощенных очаговых и полных доз позволяет сделать вывод о перспективности использования лазерноускоренных электронов при терапии глубоко расположенных опухолей.

LASER ACCELERATED ELECTRONS BASED RADIOTHERAPY

M. G. Lobok, V. Yu. Bychenkov

Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA),
Moscow, Russia

E-mail: mglobok@vniia.ru

Short laser pulse interaction with a rather dense gas plasma target may result in pulse propagation regime which maximize the charge of the high-energy electron bunches. This regime corresponds to laser pulse propagation in a self-trapping mode, where the diffraction divergence is balanced by the relativistic nonlinearity, so that the laser beam radius stays unchanged during pulse propagation over many Rayleigh lengths. Such regime occurs for near critical density where the pulse length exceeds both the plasma wavelength and the pulse width. This work presents simulation results with deeply penetrating dose delivery for 30–250 MeV laser accelerated Very high energy electron (VHEE) 30–250 MeV in human tissues. This study shows perspectives of medical treatment at depths required for deep-seated tumours.

3-13

ОДНОМЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ ДВУХКАСКАДНОЙ МИШЕНИ ПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ ДЛЯ МЕГАДЖОУЛЬНЫХ УСТАНОВОК С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 0,35 мкм И 0,53 мкм

В. А. Лыков, Е. С. Андреев, Е. С. Бакуркина,
Н. Г. Карлыханов, Г. Н. Рыкованов, В. Е. Черняков

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: v.a.lykov@vniitf.ru

Обсуждаются результаты расчетов двухкаскадной мишени прямого облучения, выполненных для двух лазерных импульсов с энергией, мощностью и длиной волны лазерного излучения (ЛИ) соответственно: 1) $E_L = 1,9$ МДж, $P_L = 300$ ТВт, $\lambda = 0,35$ мкм и 2) $E_L = 2,5$ МДж, $P_L = 400$ ТВт, $\lambda = 0,53$ мкм. Параметры мишени взяты из [1]: *W*-оболочка с диаметром 0,77 мм и толщиной стенки 0,06 мм, заполнена *DT*-жидкостью и помещена внутрь *Be*-оболочки с диаметром 3,31 мм и толщиной стенки 0,07 мм, между оболочками – *CH*-пена с плотностью 15 мг/см³. Расчеты проводились по одномерной газодинамической программе с учетом спектрального кинетического переноса излучения, нелокального электронного теплопереноса, турбулентного перемешивания по *ke*-модели [2]. Использовалась модель поглощения ЛИ [3], которая учитывает вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ), генерацию быстрых электронов (БЭ) в процессах двухплазмонного распада (ДПР) и вынужденного Рамановского рас-

сеяния (BPP). Без учета перемешивания, процессов ВРМБ, ДПР и ВРР расчеты дали выход нейтронов $N_{DT} \approx 1,8 \cdot 10^{18}$ и запасы по термоядерному зажиганию мишеней [4] $W_Q \approx 6\div 7$ для обоих типов лазерных установок. Учет перемешивания по $k\varepsilon$ -модели [2] с константами, отвечающими автомодельной «постоянной» $\alpha_b \approx 0,04$, привел к снижению величин W_Q и N_{DT} в 2–3 раза в задачах без учета генерации БЭ и к $N_{DT} \sim 10^{16}$ в расчете с учетом БЭ для лазерного импульса с $\lambda = 0,53$ мкм. Основной причиной этого снижения явился разогрев W -оболочки БЭ с температурой $\sim 100\text{--}200$ кэВ, генерация которых происходит в процессе ДПР. Быстрые электроны, рождающиеся в процессе ВРР, менее опасны для двухкаскадных мишеней, т. к. их температура в $\sim 2\text{--}3$ раза ниже. Для подавления ДПР целесообразно использовать смещение длин волн ЛИ в соседних лазерных пучках на $10\text{--}20$ Å [5], что полезно также для уменьшения ВРМБ и СВЕТ (Cross Beam Energy Transfer) [3, 4]. В этом случае влияние процессов ДПР и СВЕТ на величины W_Q и N_{DT} будет минимальным.

Литература

1. **Hu, S. X.** [Text] / S. X. Hu, R. Epstein, W. Theobald et al. // Phys. Rev. E. – 2019. – 100, 063204.
2. **Неуважаев, В. Е.** Математическое моделирование турбулентного перемешивания [Текст]. – Снежинск : Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ. – 2007.
3. **Бакуркина, Е. С.** [Текст] / Е. С. Бакуркина, Н. Г. Карлыханов, В. А. Лыков, Г. Н. Рыкованов, И. А. Химич, В. Е. Черныakov // Ядерная физика и инжиниринг. – 2019. – 10 (3), 271–284.
4. **Bakurkina, E. S.** [Text] / E. S. Bakurkina, V. E. Chernyakov, N. G. Karlykhanov, I. A. Khimich, V. A. Lykov, G. N. Rykovanov // Physics of Atomic Nuclear. – 2019. – 82 (10), 1348–1359; ibid 83 (12), 1738 (2020).
5. **Follett, R. K.** [Text] / R. K. Follett, J. G. Shaw, J. F. Myatt et al. // Phys. Rev. Lett. – 2018. – 120, 135005.

THE 1D-SIMULATIONS OF DIRECT DRIVE DOUBLE-SHELL TARGET FOR MEGAJOULE FACILITIES WITH LASER WAVELENGTH OF 0.35 μm AND 0.53 μm

V. A. Lykov, A. S. Andreev, V. E. Chernyakov,
E. S. Bakurkina, N. G. Karlykhanov, G. N. Rykovanov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

E-mail: v.a.lykov@vniitf.ru

The 1D-simulations of direct-drive double-shell targets were performed for two types of laser pulses with the energy, power and wavelength of a laser radiation: 1) $E_L = 1.9$ MJ, $P_L = 300$ TW, $\lambda = 0.35$ μm and 2) $E_L = 2.5$ MJ, $P_L = 400$ TW, $\lambda = 0.53$ μm . Target parameters were taken from [1]: the W -shell with a diameter of 0.77 mm and wall thickness of 0.06 mm is filled by DT -liquid and is placed in the center of Be-shell with diameter of 3.31 mm and wall thickness of 0.07 mm, the cushion

layer between two shells is stuffed with CH-foam with density of 15 mg/cc. Calculations were carried out with using of the 1D- hydrodynamic code that taking into account a spectral kinetic radiation transfer, nonlocal electron transport, turbulent mixing by means of the $k\varepsilon$ -model [2]. The used model [3] of laser light absorption in plasma considers the stimulated Brillouin scattering (SBS), a generation of a fast electrons (FE) in processes of the two-plasmon decay (TPD), and the stimulated Raman scattering (SRS). The neutron yield $N_{DT} \approx 1,8 \cdot 10^{18}$ and thermonuclear ignition margin [4] $W_Q \approx 6\text{--}7$ were obtained in 1D-calculations performed without the allowance for mixing, SBS, TPD and SRS for both types of laser facilities. The allowance for mixing through $k\varepsilon$ -model [2] with empirical parameters corresponding to self-similar “constant” $\alpha_b \approx 0.04$ has led to decrease values of W_Q and N_{DT} in 2–3 times in problems without generation FE and to $N_{DT} \sim 10^{16}$ in calculation taking into account FE for a laser pulse with $\lambda = 0.53$ μm . The primary cause of this decrease was the preheating the W -shell by FE with temperature $\sim 100\text{--}200$ keV which generation occurs in the course of TPD. The fast electrons generated in SRS are less dangerous for the compression of double-shell targets because their temperature in $\sim 2\text{--}3$ time lower. It is appropriate to use the displacement of laser emission lines in neighboring channels by $\Delta\lambda \approx 10\text{--}20$ Å for a suppression TPD [5] that is useful also for a minimization of SBS and CBET (Cross Beam Energy Transfer) [3, 4]. In this case the influence of TPD and CBET processes on W_Q and N_{DT} will be insignificant.

References

- 1 **Hu, S. X.** [Text] / S. X. Hu, R. Epstein, W. Theobald et al. // Phys. Rev. E. – 2019. – 100, 063204.
2. **Neuvazhaev, V. E.** Mathematical modelling of turbulent mixing [Text]. – Snezhinsk : Publishing house of RFNC – VNIITF, 2007.
3. **Bakurkina, E. S.** [Text] / E. S. Bakurkina, N. G. Karlykhanov, V. A. Lykov, G. N. Rykovanov, I. A. Khimich, V. E. Chernyakov // Yadernaya Fizika i Inzhiniring. – 2019. – 10 (3), 271–284.
4. **Bakurkina, E. S.** [Text] / E. S. Bakurkina, V. E. Chernyakov, N. G. Karlykhanov, I. A. Khimich, V. A. Lykov, G. N. Rykovanov // Physics of Atomic Nuclear. – 2019. – 82 (10), 1348–1359; ibid 83 (12), 1738 (2020).
5. **Follett, R. K.** [Text] / R. K. Follett, J. G. Shaw, J. F. Myatt et al. // Phys. Rev. Lett. – 2018. – 120, 135005.

3-14

ИОНИЗАЦИОННЫЙ БАЛАНС НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ ПО РАДИАЦИОННО-СТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ СРЕДНЕГО АТОМА

А. А. Овечкин¹, П. А. Лобода¹, А. С. Королёв¹,
С. В. Кольчугин¹, И. Ю. Вичев², А. Д. Соломянная²,
А. С. Грушин², Д. А. Ким²

¹Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша
РАН, Москва, Россия

E-mail: ovechkin.an@mail.ru

Предложен упрощенный вариант радиационно-столкновительной модели среднего атома, основанный на использовании атомных данных, часть из которых получена по модели среднего атома в приближении локального термодинамического равновесия, а другая часть – для изолированных ионов. Введенные упрощения не вносят большой погрешности и позволяют существенно ускорить вычисления по сравнению с исходной моделью, в которой решаются уравнения самосогласованного поля. Средние заряды ионов в плазме германия, рассчитанные в данной работе по радиационно-столкновительной модели среднего атома в различных ее вариантах, сравниваются с результатами расчетов по радиационно-столкновительной модели среднего атома SCAALP [1], а также расчетов с детальным учетом электронных конфигураций по программе THERMOS [2].

Литература

1. **Faussurier, G.** [Text] / G. Faussurier, C. Blancard, E. Berthier // Phys. Rev. E. – 2001. – 63, 026401.
2. **Vichev, I. Yu.** [Text] / I. Yu. Vichev, A. D. Solomyannaya, A. S. Grushin, D. A. Kim // HEDP. – 2019. – 33, 100713.

IONIZATION BALANCE OF NON-LTE PLASMAS WITH AVERAGE-ATOM COLLISIONAL-RADIATIVE MODEL

A. A. Ovechkin¹, P. A. Loboda¹, A. S. Korolyov¹,
S. V. Kol'chugin¹, I. Yu. Vichev², A. D. Solomyannaya²,
A. S. Grushin², D. A. Kim²

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

²Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS,
Moscow, Russia

E-mail: ovechkin.an@mail.ru

We present a simplified version of average-atom collisional-radiative model employing atomic data obtained under the average-atom framework in the local thermodynamic equilibrium (LTE) approximation along with the isolated-ion atomic data. The simplifications introduced do not generate substantial errors and significantly speed

up computations as compared to the basic average-atom model envisaging a direct solution of the self-consistent field equations. Mean ion charges of germanium plasmas calculated using various modifications of the average-atom collisional-radiative model are compared to those ones obtained with the SCAALP average-atom model [1] and the THERMOS model [2] which employs the detailed configuration accounting.

References

1. **Faussurier, G.** [Text] / G. Faussurier, C. Blancard, E. Berthier // Phys. Rev. E. – 2001. – 63, 026401.
2. **Vichev, I. Yu.** [Text] / I. Yu. Vichev, A. D. Solomyannaya, A. S. Grushin, D. A. Kim // HEDP. – 2019. – 33, 100713.

3-15

СПОСОБЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИШЕНЕЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В ЛАЗЕРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Л. Е. Пешкичева, Д. С. Носуленко, Д. А. Вихляев,
Ю. Ю. Смирнов, Д. И. Башкин

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: dep5@vniitf.ru (с пометкой для Пешкичевой)

Галогенсодержащие полимерные пленки могут быть использованы в лазерных экспериментах для диагностики неустойчивости границы раздела двух разноплотных материалов мишени. В работе предложены два способа легирования полистирола йодом: насыщение пленки в процессе сублимации йода и изготовление пленки из раствора, содержащего галоген. Толщину мишени определяли прямым методом с помощью микрометра, поверхность исследовали с помощью АСМ и РФЭС. По величине ослабления рентгеновского излучения в пленке толщиной 70 мкм, изготовленной вторым способом, было установлено, что содержание йода составляет $0,21 \pm 0,02$ мг/см² ($0,14 \pm 0,02\%$ ат.). Такая добавка галогена уменьшает коэффициент пропускания пленки с 0,9 до 0,75 (для квантов с энергией 5 кэВ). Таким образом, создается контраст галогенированного и нелегированного полимера, что может быть эффективным в лазерных экспериментах изучения гидродинамических неустойчивостей.

METHODS TO MANUFACTURE TARGET REFERENCE LAYERS FOR HYDRODYNAMIC-INSTABILITY STUDIES IN LASER EXPERIMENTS

L. E. Peshkicheva, D. S. Nosulenko, D. A. Vikhlyayev,
Yu. Yu. Smirnov, D. I. Bashkin

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,

Snezhinsk, Russia

E-mail: dep5@vniitf.ru (for Peshkicheva)

Halogenated polymer films may be used in laser experiments to diagnose the instabilities of the interface between two target layers of different densities. Two methods to dope polystyrene with iodine are proposed: saturation of the film in the process of iodine sublimation and production of the film from a halogen-containing solution. The thickness of target reference layer was determined by a direct micrometer method, the surface was analyzed by with the AFM and XPS techniques. Using the X-ray attenuation in the 70 μm – film obtained by the second method, the iodine fraction was found to amount $0.21 \pm 0.02 \text{ mg/cm}^2$ ($0.14 \pm 0.02 \text{ at. } \%$). Such an addition of halogen enables one to reduce the transmittance of the film from 0.9 to 0.75 at 5 keV photon energies. Thus, the contrast between the halogenated and pure polymer may be created, being effective in laser experiments targeted at hydrodynamic-instability studies.

3-16

РАСЧЕТЫ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ КВАЗИКЛАССИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СРЕДНЕГО АТОМА

А. С. Полюхин^{1,2}, С. А. Дьячков^{1,3}, П. Р. Левашов^{1,2}

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (Государственный университет), Долгопрудный, Россия

³Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова, Москва, Россия

E-mail: polyukhinas@gmail.com

Для исследования различных процессов в неупорядоченных конденсированных системах, например, взаимодействия лазерного излучения с веществом, необходимо знание уравнений состояния. Разработаны универсальные подходы, основанные на методе функционала плотности [1], которые позволяют рассчитывать различные свойства исследуемого вещества в широком диапазоне параметров, однако такие подходы имеют высокую вычислительную сложность и требуют длительных расчетов на суперкомпьютерах. Более простые теоретические модели обеспечивают согласие с экспериментальными данными только в узких областях фазовой диаграммы, что делает их применение сильно ограниченным. Целью данной работы служит разработка относительно простой модели для расчета термодинамических свойств веществ в широком диапазоне температур и плотностей.

Для моделирования термодинамических параметров плазмы металлов разрабатывается самосогласованная квазиклассическая модель среднего атома [2], которая может использоваться для расчета термодинамических свойств веществ в широком диапазоне температур и плотностей. Благодаря высокой скорости расчетов и до-

статочно высокой точности ее можно использовать как самостоятельную модель для проведения оценок термодинамических параметров, так и в качестве начального приближения для более сложных моделей, значительно уменьшая объем необходимых вычислений.

В данной работе продемонстрированы области температур и плотностей, в которых достигнута сходимость и имеет место согласованность термодинамических параметров, а также указаны текущие ограничения, связанные с появлением в расчетах смешанных состояний.

Литература

1. **Kohn, W.** Self-Consistent equations including exchange and correlation effects [Text] / W. Kohn, L. J. Sham // Phys. Rev. A. – 1965. – Vol. 140, No. 4. – P. 1133–1141.
2. **Nikiforov, A. F.** Quantum-Statistical Models of Hot Dense Matter. Methods for Computation Opacity and Equation of State [Text] / A. F. Nikiforov, V. G. Novikov, V. B. Uvarov. – Birkhauser, Switzerland, 2005. – P. 20–30.

CALCULATIONS OF THERMODYNAMIC PARAMETERS OF METALLIC PLASMA USING SEMI-CLASSICAL AVERAGE ATOM MODEL

A. S. Polyukhin^{1,2}, S. A. Dyachkov^{1,3}, P. R. Levashov^{1,2}

¹Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

³Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA), Moscow, Russia

E-mail: polyukhinas@gmail.com

To study various processes in disordered condensed systems, for example, interaction of laser radiation with matter, it is necessary to know the equations of state. There are approaches based on the density functional theory [1], which allow us to calculate various properties of matter in a wide range of parameters, but usually, they computationally expensive and require significant calculation time on supercomputers. Simpler theoretical models provide agreement with experimental data only in restricted regions of the phase diagram, which makes their application very limited. The purpose of this work is to develop a relatively simple model for calculating the thermodynamic properties of substances in a wide range of temperatures and densities.

To simulate the thermodynamic parameters of metallic plasma, a self-consistent semi-classical average atom model is being developed [2], which can be used to calculate the thermodynamic properties of substances in a wide range of temperatures and densities. Due to the high speed of calculations and sufficiently high accuracy, the model itself can either be used for making realistic estimates of thermodynamic parameters or as an initial approximation for more complex models, thus significantly reducing the number of necessary calculations.

In this work, we demonstrate the regions of temperatures and densities in which convergence has been

achieved and the consistency of thermodynamic parameters takes place for a number of metals, as well as the current limitations associated with the appearance of mixed states in the calculations.

References

1. **Kohn, W.** Self-Consistent equations including exchange and correlation effects [Text] / W. Kohn, L. J. Sham // Phys. Rev. A. – 1965. – Vol. 140, No. 4. – P. 1133–1141.
2. **Nikiforov, A. F.** Quantum-Statistical Models of Hot Dense Matter. Methods for Computation Opacity and Equation of State [Text] / A. F. Nikiforov, V. G. Novikov, V. B. Uvarov. – Birkhauser, Switzerland, 2005. – P. 20–30.

3-17

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОКАТОДОВ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА СПЕКТРА

Н. А. Пхайко, А. А. Кондратьев, С. Н. Пахомов,
А. В. Потапов, И. А. Сорокин,
А. С. Тищенко, Д. И. Башкин

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия
E-mail: dep5@vniitf.ru

Фотоэмиссионные элементы с высокой чувствительностью к квантам ультрафиолетового (УФ) диапазона спектра имеют большой круг практических применений в ускорительной технике и генераторах сверхкоротких электромагнитных импульсов СВЧ-диапазона. Потенциальные выгоды применения УФ фотокатодов в данных областях техники определяются таким сочетанием их свойств как высокая электропрочность и большой квантовый выход. В докладе приведены результаты экспериментальных исследований характеристик фотокатодов на основе магний-бариевых (Mg-Ba) сплавов и иодида цезия (CsJ). Фотокатоды изготавливались методом термического вакуумного распыления на полированные подложки из нержавеющей стали. Показано, что электрическая прочность вакуумных промежутков с УФ катодами существенно выше, чем с сурьмяно-цезиевыми катодами видимого диапазона спектра (для CsJ катодов – в 2,5 раза, для Mg-Ba катодов – более, чем в три раза). Квантовая эффективность Mg-Ba катодов составляет ~1% на длине волны 247 нм, CsJ катодов – 7,5% на длине волны 196 нм. Приведены результаты исследований динамики снижения квантовой эффективности фотокатодов при импульсно-периодическом облучении их лазерными импульсами с флюенсом ~6 мкДж/см². Проведено сравнение характеристик фотокатодов с точки зрения их практических применений.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE CHARACTERISTICS OF PHOTOCATHODES OF THE ULTRAVIOLET SPECTRUM

N. A. Pkhaiko, A. A. Kondratyev, S. N. Pakhomov,
A. V. Potapov, I. A. Sorokin,
A. S. Tishchenko, D. I. Bashkin

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia
E-mail: dep5@vniitf.ru

Photoemission cells with high sensitivity to photons in the ultraviolet (UV) spectrum have a wide range of practical applications in accelerator technology and generators of ultrashort electromagnetic pulses in the microwave range. The potential benefits of using UV photocathodes in these areas of technology are determined by such a combination of their properties as high electrical strength and high quantum efficiency. The report presents the results of experimental studies of the characteristics of photocathodes based on magnesium-barium (Mg-Ba) alloys and cesium iodide (CsJ). Photocathodes were fabricated by thermal vacuum sputtering on polished stainless steel substrates. It is shown that the dielectric strength of vacuum gaps with UV cathodes is significantly higher than with antimony-cesium cathodes in the visible range of the spectrum (for CsJ cathodes – 2.5 times, for Mg-Ba cathodes – more than three times). The quantum efficiency of Mg-Ba cathodes is ~1% at a wavelength of 247 nm, and that of CsJ cathodes is 7.5% at a wavelength of 196 nm. The results of studies of the dynamics of a decrease in the quantum efficiency of photocathodes under repetitively pulsed irradiation with laser pulses with a fluence 6 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$. The characteristics of photocathodes are compared in terms of their practical applications.

3-18

АСИМПТОТИЧЕСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ *n*-ГО ПОРЯДКА И УТОЧНЕННЫЕ ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

С. А. Серов

Институт теоретической и математической физики,
Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия
E-mail: S.A.Serov@inbox.ru

Рассматривается новое асимптотическое приближение *n*-го порядка, предлагаемое для использования в расчетах распространения излучения без рассеяния в оптически толстых средах; асимптотическое приближение значительно проще и точнее известного диффузионного приближения.

Из построенного асимптотического решения кинетического уравнения распространения излучения в оптически толстой среде получен строгий вывод

уравнений диффузионного приближения и приближения лучистой теплопроводности.

В расчетах распространения излучения в оптически толстых средах без рассеивания нужно использовать граничные условия более высокого порядка асимптотической точности, когда используются новое асимптотическое приближение n -ого порядка или диффузионное приближение и приближение лучистой теплопроводности повышенной точности.

ASYMPTOTIC APPROXIMATION OF n^{th} ORDER AND IMPROVED BOUNDARY CONDITIONS

S. A. Serov

Institute of Theoretical and Mathematical Physics,
Russian Federal Nuclear Centre – All-Russian Scientific
Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

E-mail: S.A.Serov@inbox.ru

New asymptotic approximation of the n^{th} order, which we propose to use in calculations of radiation propagation without scattering in optically thick media, is considered; the asymptotic approximation is much simpler and more precise than the known diffusion approximation.

The rigorous derivation of the diffusion approximation equation and the equation of the radiation heat conduction approximation is obtained from the constructed asymptotic solution of the kinetic equation of radiation propagation in optically thick media.

Boundary conditions of higher order of the asymptotic precision must be used in calculations of radiation propagation in non-scattering optically thick media, when the new asymptotic approximation of the n^{th} order or the diffusion approximation and the radiation heat conduction approximation of increased precision are used.

ВЧ связи и др., имеющих в своей составе элементы микроэлектроники.

Приведены результаты испытаний на этой установке на ЭМС электронных приборов учета электроэнергии. ИУ «Аллюр-П» также дает возможность моделировать электромагнитные процессы в крупногабаритной испытательной установке наносекундного диапазона «Аллюр-С» [1,2].

В состав испытательной установки «Аллюр-П» входят генератор импульсного напряжения наносекундного диапазона (ГИН), полеобразующая система (ПОС), фидерный кабель, разделительный трансформатор и шина заземления. Полеобразующая система состоит из коаксиально-полоскового перехода, согласующего пирамидальный переход (СПП) и ТЕМ – ячейки.

Цели и задачи испытаний, проведенных на ИУ «Аллюр-П»:

1. Проверка электрической прочности фидера и ПОС.

2. Определение параметров импульсов, формируемых в полеобразующей системе и измерение их основных характеристик:

- величины магнитного и электрического полей;
- длительность фронта импульса, измеряемая между уровнями 0,1 и 0,9;
- общей длительности импульса.

3. Определение пространственных распределений напряженности электрического (E) и магнитного (H) полей, создаваемых в полеобразующей системе.

4. Демонстрация возможностей установки по воздействию на электротехнические и радиотехнические устройства, включая возникновение нарушений режимов их работы и полного вывода их из строя.

По результатам проведенных испытаний на созданной установке можно сделать следующие выводы:

- испытательная установка «Аллюр-П» позволяет формировать сверхширокополосные (СШП) ЭМИ с длительностью фронта 0,140 нс, шириной основного пика порядка $0,5 \div 1$ нс и общей длительностью порядка 3 нс;

- пиковое значение напряженности электрического поля внутри ТЕМ-ячейки достигает 140 кВ/м, напряженности магнитного поля 0,2 кА/м. Внутри пирамидального согласующего перехода измеренные пиковые значения напряженностей полей достигают 600 кВ/м и 1 кА/м соответственно;

- размер однородного поля внутри ТЕМ-ячейки практически совпадает с размерами самой ячейки – $50 \times 50 \times 50$ см. Структура и импеданс поля СШП ЭМИ внутри ТЕМ-ячейки близки к плоской волне.

Установка может работать в режиме одиночных импульсов и пачек импульсов, следующих с частотой до 1 кГц. Длительность пачек импульсов может быть любой.

Предварительные испытания электротехнического оборудования, имеющего в своем составе микроэлектронику (испытывались электронные приборы учета электроэнергии) показали, что при определенных параметрах воздействующих импульсов, генерируемых ИУ «Аллюр-П», происходят нарушения в их работе (обратимые и необратимые).

3-19

ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА «АЛЛЮР-П» – КОМПАКТНЫЙ ИМИТАТОР ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА

В. С. Сысоев¹, Н. Н. Швец¹, А. И. Орлов¹,
Д. И. Сухаревский¹, Е. В. Басов¹, М. А. Гуштин²,
А. В. Палицин², П. А. Микрюков²,
И. Ю. Зудин², Е. А. Мареев²

¹Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ
технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
отделение ВНИЦ 900, Истра, Россия

²Федеральный исследовательский центр «Институт
прикладной физики» РАН, Нижний Новгород, Россия

E-mail: Nikolay.Shvets@vniitf.ru

В докладе приведены параметры созданной компактной испытательной установки (ИУ) «Аллюр-П» на электромагнитную совместимость (ЭМС) объектов электротехники, радиоэлектронного оборудования,

Следует ожидать, что СШП ЭМИ, формируемые на установке, могут при испытаниях приводить к обратимым и необратимым отказам функционирования электро и радиотехнических систем, работающих в диапазоне частот до 10 ГГц (активные элементы СВЧ трактов радиолокаторов, радиовысотомеров, входные каскады приемной аппаратуры СВЧ диапазона, скоростные АЦП и т. д.).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №19-19-00501.

Литература

1. Швец, Н. Н. Использование полигонной установки Испытательного Центра РФЯЦ – ВНИИТФ ВНИЦ (г. Истра) для испытаний электротехнического оборудования на стойкость к электромагнитным импульсам наносекундного диапазона [Текст] : материалы XIV Забавихинских научных чтений / Н. Н. Швец, Ю. А. Кузнецов, В. С. Сысоев, Н. М. Лепёхин. – Снежинск, 2019. – С. 44.
2. Швец, Н. Н. Об энергетической безопасности России в условиях воздействия электромагнитного импульса высотного ядерного взрыва [Текст] / Н. Н. Швец, А. И. Орлов, В. С. Сысоев, Н. М. Лепёхин, Е. В. Басов // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2020. – Т. 16, № 11. – С. 2036–2059. <https://doi.org/10.24891/ni.16.11.2036>.

TEST SETUP “ALLUR-P” – COMPACT SIMULATOR ELECTROMAGNETIC PULSES OF THE NANOSECOND RANGE

V. S. Sysoev¹, N. N. Shvets¹, A. I. Orlov¹,
D. I. Sukharevsky¹, E. V. Basov¹, M. A. Gushchin²,
A. V. Palitsin², P. A. Mikryukov²,
I. Yu. Zudin², E. A. Mareev²

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, department of VNIITF 900, Istra, Russia

²Federal Research Center «Institute of Applied Physics» RAS, Nizhny Novgorod, Russia
E-mail: Nikolay.Shvets@vniitf.ru

The report contains the parameters of the created compact testing facility (IU) “Allur-P” for electromagnetic compatibility (EMC) of electrical engineering objects, radio-electronic equipment, high-frequency communications, etc., which include elements of microelectronics.

The results of tests on this installation on EMC of electronic electricity metering devices are presented. IU “Allur-P” also makes it possible to simulate electromagnetic processes in a large-sized nanosecond test setup “Allur-S” [1,2].

The “Allur-P” test setup includes a nanosecond pulse voltage generator (GVP), a field-generating system (POS), a feeder cable, an isolation transformer and a grounding bus. The field-forming system consists of a coaxial-strip junction that matches a pyramidal junction (PJT) and a TEM cell.

Goals and objectives of the tests carried out at the IS “Allur-P”:

1. Checking the dielectric strength of the feeder and PIC.

2. Determination of parameters of pulses formed in the field-generating system and measurement of their main characteristics:

- magnitude of the magnetic and electric fields;
- pulse rise time, measured between levels 0.1 and 0.9;
- total pulse duration.

3. Determination of the spatial distributions of the strength of the electric (E) and magnetic (H) fields generated in the field-generating system.

4. Demonstration of facility's capabilities for influencing electrical and radio engineering devices, including the occurrence of violations of their operation modes and their complete incapacitation.

As a result of the tests carried out on the created installation, the following conclusions can be drawn

- test setup “Allur-P” allows to form ultra-wideband (UWB) EMR with a rise time of 0.140 ns, a width of the main peak of the order of 0.5÷1 ns and a total duration of about 3 ns;
- the peak value of the electric field strength inside the TEM cell reaches 140 kV/m, the magnetic field strength is 0.2 kA/m. Inside the pyramidal matching junction, the measured peak field strengths reach 600 kV/m and 1 kA/m, respectively;
- the size of the uniform field inside the TEM cell practically coincides with the size of the cell itself – 50×50×50 cm. The structure and impedance of the UWB EMP field inside the TEM cell are close to a plane wave.

The installation can operate in the mode of single pulses and bursts of pulses, following with a frequency of up to 1 kHz. The duration of the bursts of impulses can be any.

Preliminary tests of electrical equipment containing microelectronics (electronic energy metering devices were tested) showed that under certain parameters of the impacting pulses generated by the “Allur-P” IS, there are violations in their operation (reversible and irreversible).

It should be expected that UWB EMP generated at the facility can, during testing, lead to reversible and irreversible failures in the functioning of electrical and radio engineering systems operating in the frequency range up to 10 GHz (active elements of microwave paths of radars, radio altimeters, input stages of microwave receiving equipment, high-speed ADC, etc.).

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 19-19-00501.

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 19-19-00501.

References

1. Shvets, N. N. Use of the testing center of the RFNC – VNIITF VNITs (Istra) for testing electrical equipment for resistance to electromagnetic pulses of the nanosecond range [Text] : materials of the XIV Zababakhin Scientific Readings / N. N. Shvets, Yu. A. Kuznetsov, V. S. Sysoev, N. M. Lepekhn. – Snezhinsk, 2019. – P. 44.
2. Shvets, N. N. On the energy security of Russia under the influence of an electromagnetic pulse from a high-altitude nuclear explosion [Text] / N. N. Shvets, A. I. Orlov, V. S. Sysoev, N. M. Lepekhn, E. V. Basov // National interests: priorities and security. – 2020. – Т. 16, No. 11. – P. 2036–2059. <https://doi.org/10.24891/ni.16.11.2036>

3-20

**ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДНЫХ
ПРОЦЕССОВ
В СВЕРХДЛИННЫХ ВОЗДУШНЫХ
ПРОМЕЖУТКАХ, ВЛИЯЮЩИХ
НА ПРОЦЕСС ГЕНЕРАЦИИ В НИХ
СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ**

В. С. Сысоев¹, Л. М. Макальский²,
Ю. А. Кузнецов¹, М. Ю. Наумова¹

¹Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ
технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
отделение ВНИЦ 900, Истра, Россия

²Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт», Москва, Россия

E-mail: v.s.sysoev@vniitf.ru

Исследование генерации ВЧ и СВЧ диапазона излучения молниями представляет значительный интерес для фундаментальной науки и приложений, связанных с мониторингом грозовой активности и защитой технических систем от электромагнитных импульсов. В лабораторных экспериментах [1] по моделированию грозовой ячейки, выполненных с заряженным до потенциала более 1 MV водным аэрозольным облаком размером в несколько кубических метров, впервые зафиксированы параметры сверхширокополосных электромагнитных импульсов (СШЭИ) искровых разрядов длиной от 1 до 1,5 м в частотной полосе до 10 GHz. Исследовались разные фазы разрядного процесса (стримерная зона, канал лидера, обратный удар), параметры которых регистрировались.

В то же время представляет интерес параметры разрядных процессов, важные для генерации СВЧ излучения, в более длинных искровых разрядах. Такие разряды (длиной в несколько десятков метров), моделирующих молнию, получают в лабораторных условиях с помощью высоковольтного генератора Маркса [2].

В работе приведены параметры разряда в разных фазах электрической длинной искры (до нескольких десятков метров) с амплитудой импульса в несколько МВ, важных для процесса генерации СВЧ излучений. Особый интерес (с точки зрения излучений в СВЧ диапазоне) представляет стримерная составляющая разрядных процессов в длинной электрической искре. Как показано в [1], именно при стримерных процессах генерируются излучения в СВЧ с частотой более 1 ГГц. При экспериментах со сверхдлинной искрой на генераторе Маркса размеры стримерной зоны в лидерной фазе разряда составляют значение от 1 до 10 м (в зависимости от формы импульса напряжения и его амплитуды). Приведены результаты специальных измерений электрических параметров стримерных зон длинной искры [3]. Отметим, что стримерная зона при молниевом разряде (лидерная фаза), составляет значение в несколько десятков метров.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00501).

Литература

1. **Guschin, M. G.**, S. B. Korobkov and all [Text]. – GRL, april 2021. – Vol. 48, Issue 7. <https://doi.org/10.1029/2020GL092108>
2. **Макальский, Л. М.** К предельной электрической прочности длинных воздушных промежутков [Текст] : сборник докладов / Л. М. Макальский, В. С. Сысоев. – VI Российская конференция по молниезащите. – Санкт-Петербург, 17–19 апреля 2018 г. – С. 129–133. <https://cloud.mail.ru/public/8gzd/yz7zp8y5U>
3. **Bogatov, N. A.** Investigation of the Streamer Zone of Long Spark Positive Leader Using High Speed Photography and Microwave Probing [Text] / N. A. Bogatov, A. Yu. Kostinskiy, V. S. Sysoev et al. [Text] // Journal of Geophysical Research : Atmospheres, 123, e2019JD031826. <https://doi.org/10.1029/2019JD031826>.

**PARAMETERS OF ELECTRICAL DISCHARGE
PROCESSES IN ULTRA-LONG AIR GAPS,
AFFECTING THE PROCESS OF GENERATION
OF MICROWAVE RADIATION IN THEM**

V. S. Sysoev¹, L. M. Makalsky²,
Yu. A. Kuznetsov¹, M. Yu. Naumova¹

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics,
department of VNIITF 900, Istra, Russia

²National Research University “Moscow Power Engineering
Institute”, Moscow, Russia

E-mail: v.s.sysoev@vniitf.ru

Investigation of the generation of HF and UHF radiation by lightning is of considerable interest for fundamental science and applications related to monitoring thunderstorm activity and protecting technical systems from electromagnetic pulses. In laboratory experiments [1] on simulating a thunderstorm cell, carried out with a water aerosol cloud of several cubic meters charged to a potential of more than 1 MV, the parameters of ultra-wideband electromagnetic pulses of spark discharges with a length of 1 to 1.5 m in a frequency band of up to 10 GHz. We studied different phases of the discharge process (streamer zone, leader channel, back impact), the parameters of which were recorded.

At the same time, the parameters of the discharge processes, which are important for the generation of microwave radiation in longer spark discharges, are of interest. Such discharges (several tens of meters long) simulating lightning are obtained under laboratory conditions using a high-voltage Marx generator [2].

The paper presents the discharge parameters in different phases of an electric long spark (up to several tens of meters) with a pulse amplitude of several MV, which are important for the process of generating microwave radiation. Of particular interest (from the point of view of radiation in the microwave range) is the streamer component of the discharge processes in a long electric spark. As shown in [1], it is during streamer processes that microwave radiation with a frequency of more than 1 GHz is generated. In experiments with an ultra-long spark on a Marx generator, the dimensions of the streamer zone in the leader phase of the discharge range from 1 to 10 m

(depending on the shape of the voltage pulse and its amplitude). The results of special measurements of electrical parameters of streamer zones of a long spark are presented [3]. Note that the streamer zone during a lightning discharge (leader phase) is several tens of meters.

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 19-19-00501).

References

1. **Guschin, M. G.**, S. B. Korobkov and all [Text]. – GRL, april 2021. – Vol. 48, Issue 7. <https://doi.org/10.1029/2020GL092108>
2. **Makalsky, L. M.** To ultimate dielectric strength of long air gaps [Text]: collection of reports / L. M. Makalsky, V. S. Sysoev. – VI Russian conference on lightning protection. – St. Petersburg, April 17–19, 2018. – P. 129–133. <https://cloud.mail.ru/public/8gzd/yz7zp8y5U>
3. **Bogatov, N. A.** Investigation of the Streamer Zone of Long Spark Positive Leader Using High Speed Photography and Microwave Probing [Text] / N. A. Bogatov, A. Yu. Kostinskiy, V. S. Syssoev et al. [Text] // Journal of Geophysical Research : Atmospheres, 123, e2019JD031826. <https://doi.org/10.1029/2019JD031826>

3-21

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНИСЦЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕОДИМОВЫХ СТЕКОЛ

Н. Ю. Титаренко, А. Г. Какшин, Е. А. Лобода

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: dep5@vniitf.ru (с пометкой для Титаренко)

Представлены результаты исследования спектрально-люминисцентных характеристик лазерных неодимовых стекол на фосфатной основе: ГЛС-22, N31, КТФС3 (2 различные варки). На основе полученных результатов сделан вывод, что стекло N31 обладает наилучшим сочетанием исследованных параметров для использования в мощных усилителях. Полученные данные предназначены для сравнительной оценки различных типов стекол и расчета систем усиления лазерного импульса.

RESEARCH OF THE SPECTRAL AND LUMINESCENT CHARACTERISTICS OF NEODYMIUM GLASSES

N. Yu. Titarenko, A. G. Kakshin, E. A. Loboda

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

E-mail: dep5@vniitf.ru (for Titarenko)

The results of research of the spectral-luminescence characteristics of laser neodymium glasses based on phosphate: GLS-22, N31, KTFS3 (2 different types) are

presented. Based on the results obtained, it was concluded that the N31 glass has the best combination of the investigated parameters for the use in high-power amplifiers. The data obtained are intended for a comparative assessment of various types of glasses and for the prediction of the laser-pulse-amplification system parameters.

3-22

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЯЗКОСТИ И ИОННОЙ САМОДИФФУЗИИ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ МЕТОДОМ ПСЕВДОАТОМНОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

А. Л. Фальков¹, П. А. Лобода^{1,2}, А. А. Овечкин¹

¹Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», Москва, Россия

E-mail: sinarit9091@mail.ru

С помощью квазиклассического варианта метода псевдоатомной молекулярной динамики выполнены расчеты коэффициентов динамической вязкости и ионной самодиффузии теплой и умеренно нагретой плотной плазмы ряда химических элементов, представляющей интерес для описания экспериментов по физике высоких плотностей энергии, решения ряда прикладных геофизических и планетологических задач, а также для сравнения с расчетными данными других авторов. Учтены эффекты, обусловленные кулоновским взаимодействием в среде, а также квантовыми свойствами электронной подсистемы плазмы. Предложены соответствующие аналитические аппроксимации для коэффициентов вязкости и ионной самодиффузии плотной плазмы Al, Fe, Cu, Ag, Au и U.

CALCULATION OF VISCOSITY AND ION SELF-DIFFUSION COEFFICIENTS IN DENSE PLASMAS WITH PSEUDOATOM MOLECULAR DYNAMICS

A. L. Falkov¹, P. A. Loboda^{1,2}, A. A. Ovechkin¹

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

²National Research Nuclear University «MEPhI»,
Moscow, Russia

E-mail: sinarit9091@mail.ru

Using the pseudoatom molecular-dynamics approach, dynamic viscosity and ion self-diffusion coefficients are calculated for the conditions of warm and moderately hot dense plasmas of some chemical elements being of interest for the simulations relevant to the high-energy-density physics research, various geophysical and planetary-sci-

ence problems, and for making comparisons with other calculated data. The effects due to the Coulomb interaction and quantum properties of plasma electrons are included. Analytical approximations of the calculated data for the Al, Fe, Cu, Ag, Au, and U plasmas are proposed.

Секция 4
СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ
ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ПРОЦЕССАХ

Section 4
PROPERTIES OF MATTER
AT HIGH-INTENSITY PROCESSES

4-1

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ В
ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ,
СОЗДАВАЕМЫХ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ**

Лян Сунь, Сяоси Дуань, Юлун Ли, Вэймин Ян, Хао Лю, Чэнь Чжан, Хуань Чжан, Чжэбинь Ван, Цзяминь Ян, Шаоэнь Цзян

Центр лазерных термоядерных исследований, Китайская академия инженерной физики, Мяньян, 621900, Китайская народная республика

E-mail: sunliangyp@outlook.com

Недавние исследования соотношения массы и радиуса твердых экзопланет указывают, что они состоят из железа, силикатов, воды и соединений углерода. Точное уравнение состояния (УРС) в условиях недр суперземель имеет чрезвычайно важную роль для оценки их состава и внутренней структуры. Условия в недрах таких суперземель, состоящих из горных пород, достигают 1–4 ТПа и ~104 К, и их невозможно достичь при однократном ударно-волновом или квази-изэнтропическом сжатии в лабораторных экспериментах.

Мощные лазерные установки все чаще используются для динамического нагружения материалов, особенно до сверхвысокого давления такого уровня.

Преимущество лазерного динамического нагружения состоит в том, что нарастающую нагрузку под действием серии слабых волн сжатия, можно создать за счет изменения формы лазерного импульса, что позволяет реализовать сжатие материала при намного меньшей температуре, характерной для горных пород недр суперземель.

В данной работе мы разработали методики ударного и нарастающего динамического лазерного сжатия для проведения экспериментов с мишенями из Fe-LiF, в которых образцы сначала подвергались ударному, а затем — нарастающему динамическому нагружению под действием профилированных лазерных импульсов. В представленных экспериментах начальное давление в ударной волне составляло около 200 ГПа, чтобы обеспечить высокую температуру, соответствующую условиям недр суперземель. Максимальные величины давления при нарастающем динамическом нагружении превышали 1 ТПа, что соответствовало прогнозируемым условиям в центре суперземель. Путём моделирования скорости звука по лагранжевой методике для данных измерений методом VISAR, мы определяли давление, плотность и скорость звука вдоль изэнтропы при таких экстремальных условиях. Наши данные по УРС также сравнивались с более ранними данными для определения влияния начального давления и температуры. В итоге, наши результаты представляют собой величины основных физических характеристик железа при сверхвысоком давлении и температуре, полученные в прямых измерениях, которые можно использовать для моделирования физических и хи-

мических свойств железа и для понимания структуры и динамики ядер суперземель.

Мы также представим свои возможности в области ударного нагружения и диагностики, такие как динамическая рентгеновская дифракция *in situ* (DXRD), запороговая спектроскопия тонкой структуры рентгеновского спектра поглощения (EXAFS) и методика рентгеновской радиографии в LFRC. Также будут отмечены некоторые ключевые научные проблемы. В заключение мы расскажем о нашей стратегии по исследованию свойств материалов при высоких давлениях в экстремальных условиях создаваемых лазерными импульсами.

**EXPERIMENTAL RESEARCH
ON MATERIAL PROPERTY
AT LASER-DRIVEN EXTREME CONDITIONS**

Liang Sun, Xiaoxi Duan, Yulong Li, Weiming Yang,
Hao Liu, Chen Zhang, Huan Zhang, Zhebin Wang,
Jiamin Yang, Shaoen Jiang

Laser Fusion Research Center, Chinese Academy
of engineering Physics, Mianyang, China

E-mail: sunliangyp@outlook.com

Recent investigations of the mass-radius relationship of solid exoplanets indicate they consist of iron, silicates, water, and carbon compounds. The accurate equation of state (EOS) at Super-Earth interior conditions is fundamental to evaluate the composition and interior structure. The conditions in these rocky Super-Earths interiors reach 1–4 TPa and ~104 K and cannot be easily achieved by a single shock or quasi-isentropic compression in laboratory experiments.

High power laser facility is increasing being used for dynamic loading of materials, especially for this extreme high pressure. Ramp loading, a series of weak compress waves, as a advantage for laser-based dynamics, can be realized easily by the laser pulse shape and can be applied to compress material in much lower temperature under rocky Super-Earth interiors condition.

Here we developed laser shock and ramp compression techniques to perform a series of experiments on Fe-LiF targets initially shocked and then ramped using shaped laser pulses in the high-powered laser facility of China. In the present experiments, the initial shock pressure was nearly 200 GPa to provide high temperature for achieving interiors conditions. The peak ramp pressures were more than 1 TPa, comparable to that predicted at the center of Super-Earths. By the Lagrangian sound-speed analysis for the measured VISAR data, we determined pressure, density and sound speed along the isentropic path at these extreme condition. Our EOS data were also compared with the previous ones to know the effects of the initial shock pressure and temperature. Finally, our results provide directly-measured key physical properties of iron at the extreme high pressure and temperature, which can be used to model the physics and chemistry of iron and to understand the structures and dynamics of the cores of Super-Earths.

We will also present our shock loading and diagnostic abilities, such as *in-situ* dynamic X-ray diffraction

(DXRD), extended X-ray absorption fine structure measurements (EXAFS) and X-ray radiography technique in LFRFC. Several key scientific problems will be also mentioned. In the end, we will talk about our strategy in discovering high pressure material properties at laser-driven extreme conditions.

4-2

ЗАВИСИМОСТЬ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ И СВОЙСТВ КРИСТАЛЛА НИОБАТА КАЛИЯ ОТ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Т. Чжан¹, Цянь У¹, Син У², Хун-лян Хэ¹

¹Институт физики жидкости, Китайская академия инженерной физики, Мянъян, Китай

²Институт системного проектирования, Китайская академия инженерной физики, Мянъян, Китай

E-mail: tayloszhang@163.com

Проведены исследования фазовых переходов, спонтанных поляризаций и диэлектрических свойств ферроэлектрических кристаллов ниобата калия (KNbO₃) в условиях высокого давления от 0 до 21,3 ГПа. Исследования показали, что температуры фазовых переходов от кубической фазы к четырехугольной, от четырехугольной фазы к орторомбической и от орторомбической фазы к ромбоэдрической снижались по мере подъема давления. Согласно расчетам, производная температур фазовых переходов в зависимости от давления может составить $-33,1^\circ\text{C}/\text{ГПа}$. С понижением давления происходило нелинейное уменьшение спонтанных поляризаций. Это можно объяснить сокращением межионного расстояния под действием давления. Диэлектрическая восприимчивость ϵ_{33} возросла примерно на 85%, диэлектрическая восприимчивость ϵ_{11} уменьшилась примерно на 50%, когда давление поднималось от 0 до 4 ГПа при 260°C. Получен новый эффективный способ увеличения чувствительности акустического преобразователя к давлению и показатели накопления энергии в конденсаторе. Изменения диэлектрической восприимчивости, обусловленные давлением, объяснялись сглаживанием крутизны профиля свободной энергии Гиббса. Поскольку за свойства керамики отвечает один кристалл, результаты данной работы могут быть полезны в изучении основной закономерности изменения показателей бессвинцовой керамики на основе ниобата калия (KNbO₃) под действием давления.

THE HIGH PRESSURE DEPENDENCE OF THE PHASE TRANSITIONS AND PROPERTIES FOR A POTASSIUM NIOBATE CRYSTAL

T. Zhang¹, Q. Wu¹, X. Wu², H.L. He¹

¹Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, China

²Institute of System Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, China

E-mail: tayloszhang@163.com

The phase transitions, spontaneous polarizations, and dielectric properties of a potassium niobate (KNbO₃) ferroelectric crystal were investigated under high pressure from 0 to 21.3 GPa. It was shown that the phase transition temperatures of cubic to tetragonal, tetragonal to orthorhombic, and orthorhombic to rhombohedral decreased as the pressure was increased and the derivative of the phase transition temperatures with respect to pressure could be estimated to be $-33.1^\circ\text{C}/\text{GPa}$. The spontaneous polarizations decreased nonlinearly with increasing pressure which could be attributed to the pressure-induced decrease of the interionic distance. The dielectric susceptibility ϵ_{33} increased by about 85% and the dielectric susceptibility ϵ_{11} decreased by about 50% when pressure increased from 0 to 4 GPa at 260°C. It provides a new effective way to improve the pressure sensitivity in acoustic transducer and the energy storage performance of capacitor. The changes of dielectric susceptibilities induced by pressure had been explained by the flattening or steepness of Gibbs free energy profile. As the properties of the ceramics are related to those of the single crystal, results in this paper can be used to explore the general rule of performance change induced by pressure for lead free KNbO₃-based ceramics.

4-3

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МЕДИ, ЛЕГИРОВАННОЙ ЦИРКОНИЕМ, ХРОМОМ И ГРАФЕНОМ

Д. Н. Абдуллина¹, И. В. Хомская¹, С. В. Разорёнов², Л. А. Елшина³, Е. В. Шорохов⁴

¹Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

³Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

⁴Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия

E-mail: abdullina@imp.uran.ru

Изучены особенности формирования субмикроструктурной (СМК) структуры и механических свойств меди, легированной микродобавками (0,02–0,1) мас. % циркония, хрома и графена, полученной высокоскоростной деформацией методом ДКУП. Ранее показано, что отличительной особенностью метода ДКУП, представляющего собой динамический вариант квазистатического способа РКУП, является комбинированное воздействие высокоскоростной (10^4 – 10^5 с⁻¹) деформации сдвига, ударно-волновой деформации сжатия и температуры. Формирование при ДКУП неравновесной СМК структуры в сплавах меди, легированных хромом и цирконием, происходит в результате процессов фрагментации и частичного деформационного старения с выделением наночастиц

вторых фаз. Динамические свойства бинарных СМК сплавов на основе меди исследованы в условиях ударного сжатия интенсивностью 4,7–7,3 ГПа и скоростью деформации $(0,9–2,1) \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$. Регистрацию волновых процессов в образцах осуществляли с помощью Доплеровского измерителя скорости VIZAR. Показано, что ДКУП ($n = 1–3$) сплавов Cu-0,03 мас.% Zr и Cu-0,1 мас.% Cr, приводящее к измельчению кристаллитов от 200–400 мкм до 0,2–0,4 мкм, увеличивает в 1,9–2,8 раза динамический предел упругости Гюгонио (σ_{HEL}) и динамический предел текучести (Y) и в 1,4 раза откольную прочность (σ_{sp}), по сравнению с исходным крупнокристаллическим состоянием. Последующие отжиги при 400–450 °C приводят к дополнительному увеличению динамических свойств в 1,2–1,9 раз. Повышенный уровень механического свойств сплавов, по сравнению с медью, связан с упрочнением, обусловленным выделением наночастиц вторых фаз в процессе ДКУП и последующего отжига. Показано, что ДКУП ($n = 13$) композита на основе меди с микродобавкой графена (Cu-0,02 мас.% Gn) приводит к увеличению σ_{HEL} и Y в 4,0–5,6 раз и σ_{sp} в 1,5–1,8 раз. Полученные экспериментальные данные о характере откольного разрушения бинарных сплавов меди, легированных микродобавками циркония, хрома и графена с СМК структурой, сформированной при ДКУП и оценка влияния дисперсности и дефектности структуры на сопротивление высокоскоростному деформированию при субмикросекундных длительностях нагрузки позволят прогнозировать поведение СМК материалов в экстремальных условиях их эксплуатации.

Д. Н. Абдуллина благодарит Институт физики металлов имени М. Н. Михеева за поддержку работы по государственному заданию Минобрнауки России по теме «Структура» № АААА-А18-118020190116-6, выполненной в рамках молодежного проекта ИФМ УрО РАН № м 24-21.

THE DYNAMIC PROPERTIES OF SUBMICROCRYSTALLINE COPPER ALLOYED WITH ZIRCONIUM, CHROMIUM AND GRAPHENE

D. N. Abdullina¹, I. V. Khomskaya¹, S. V. Razoryonov²,
L. A. Elshina³, E. V. Shorokhov⁴

¹M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch
of RAS, Ekaterinburg, Russia

²Institute of Problems of Chemical Physics of RAS,
Chernogolovka, Russia

³The Institute of High Temperature Electrochemistry of the
Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

⁴Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia
E-mail: abdullina@imp.uran.ru

The features of the formation of the submicrocrystalline (SMC) structure and mechanical properties of copper alloyed microadditives (0.02–0.1) wt.% of zirconium, chromium and graphene obtained by high-speed deformation by the DCAP method were studied. Previously it

has been shown that a distinctive feature of the DCAP method, which is a dynamic version of the quasi-static method of equal-channel angular pressing (ECAP), is the combined effect of high-strain-rate ($10^4–10^5 \text{ s}^{-1}$) shear deformation, shock-wave compression deformation and temperature. The formation of non-equilibrium SMC structure in copper alloys doped with chromium and zirconium by DCAP occurs as a result processes of fragmentation and partial strain aging with the precipitation of nanoparticles of the second phase. The dynamic properties of binary SMC copper-based alloys were investigated under shock compression with intensity 4.7–7.3 GPa and strain rate of $(0.9–2.1) \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$. Registration of wave processes in the samples was carried out using the Doppler Velocity Sensor VISAR. It has been shown that the DCAP of the Cu-0.03 wt.% Zr and Cu-0.1 wt.% Cr alloys, which leads to the grain refinement of crystallites from 200–400 to 0.2–0.4 μm , increases the dynamic Hugoniot elastic limit (σ_{HEL}) and the dynamic yield stress (Y) by 1.9–2.8 times and the spall strength (σ_{sp}) by 1.4 times, compared to the initial coarse-crystalline state. Subsequent annealing at 400–450°C leads to an additional increase in dynamic properties by 1.2–1.9 times. The increased level of mechanical properties of the alloy, compared with copper, is associated with the additional strain hardening caused by the precipitation of nanoparticles of the second phases during DCAP and subsequent annealing. It is shown that the DCAP ($n = 1$) of a copper-based composite with a graphene microadditive (Cu-0.02 wt.% Gn) leads to an increase in σ_{HEL} and Y by 4.0–5.6 times and σ_{sp} by 1.5–1.8 times. The obtained experimental data on the nature of the spall fracture of binary copper alloys doped with microadditives of zirconium, chromium and graphene with a SMC structure formed during DCAP and the estimation of the influence of the dispersion and defect of the structure on the resistance to high-speed deformation at submicrosecond durations of loading will allow us to predict the behavior of SMC materials under extreme operating conditions.

D. N. Abdullina thanks the M. N. Mikheev Institute of Metal Physics for supporting the work on the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on the theme “Structure” No. АААА18-118020190116-6, carried out as part of the youth project of the IMP UB RAS No. m 24-21.

4-4

РАСЧЕТ СОСТАВА ЯДРА ЗЕМЛИ

В. Ф. Анисичкин

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, Россия
E-mail: avf@hydro.nsc.ru

Циклические ядерные процессы в ядре Земли могут существенно менять магнитное поле и климат Земли [1–3]. Поэтому важно знать его основные характеристики.

Предложено уравнение состояния, позволяющее рассчитывать скорость звука и температуру конденсированной среды при высоких плотностях энергии [4]. При этом уравнение состояния основывается на экспериментальных ударно-волновых данных – наиболее полных и достоверных в представляющей интерес области высоких давлений и температур ядра Земли.

С помощью предложенного уравнения состояния необходимые добавки легких элементов в железоникелевом ядре Земли подбирались так, чтобы расчетные давление, плотность и скорость звуковых волн соответствовали геофизическим значениям, а температура не выходила за допустимые пределы.

Получено, что необходимым требованием в качестве основной легкой добавки в верхних слоях жидкого ядра Земли удовлетворяет углерод в алмазной фазе с содержанием $(4,5 \pm 0,5)\%$ масс. Во внешнем жидком ядре Земли у границы с внутренним твердым ядром более вероятен углерод в алмазной фазе с содержанием $(3,0 \pm 0,5)\%$ масс., или карбид железа с содержанием до $(3,0 \pm 1)\%$ масс. углерода.

Такой состав среды может поддерживать циклические цепные ядерные реакции в скоплениях актиноидов в ядре Земли [2, 3].

Литература

1. **Ершов, А. П.** О нейтронно-делительной волне [Текст] / А. П. Ершов, В. Ф. Анисичкин. // Физика горения и взрыва. – 2003. – 39, № 2. – С. 121–127.
2. **Анисичкин, В. Ф.** Цепные ядерные реакции деления нуклидов в ядре Земли в течение миллиардов лет [Текст] / В. Ф. Анисичкин, А. А. Безбородов, И. Р. Суслов // Атомная энергия. – 2005. – 98, вып. 5, С. 370–379.
3. **Anisichkin, V. F.** Georeactor in the Earth [Text] / V. F. Anisichkin, A. A. Bezborodov, and I. R. Suslov // Transport Theory and Statistical Physics. – 2008. – 37, 624–633.
4. **Анисичкин, В. Ф.** Уравнение состояния для расчета температуры материалов при обработке взрывом [Текст] // Инженерно-физический журнал. – 2017. – 90, № 4. – С. 1025–1036.

CALCULATION OF THE THE EARTH'S CORE COMPOSITION

V. F. Anisichkin

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

E-mail: avf@hydro.nsc.ru

Cyclic nuclear processes in the Earth's core can significantly change the Earth's magnetic field and climate [1–3]. Therefore, it is important to know its main characteristics.

An equation of state is proposed that allows to calculate the sound speed and temperature of the condensed matter at high energy densities [4]. At the same time, the equation of state is based on experimental shock wave data – the most complete and reliable in the region of interest of high pressures and temperatures of the Earth's core.

With the help of the proposed equation of state, the necessary additions of light elements in the iron-nickel core of the Earth were selected so that the calculated pressure, density and speed of sound waves corresponded to geophysical values, and the temperature did not exceed the permissible limits.

It is obtained that the necessary requirements as the main light additive in the upper layers of the liquid core of the Earth satisfies carbon in the diamond phase with a content of $(4.5 \pm 0.5)\%$ by weight. In the outer liquid core of the Earth at the border with the inner solid core, carbon in the diamond phase with a content of $(3.0 \pm 0.5)\%$ by weight, or iron carbide with a content of up to $(3.0 \pm 1)\%$ by weight is more likely.

Such a composition of the medium can support cyclic chain nuclear reactions in clusters of actinides in the Earth's core [2, 3].

References

1. **Ershov, A. P.** Natural neutron-fission wave [Text] / A. P. Ershov and V. F. Anisichkin // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2003. – 39, No. 2. – P. 226–231.
2. **Anisichkin, V. F.** Nuclear fission chain reactions of nuclides in the Earth's core over billions of years [Text] / V. F. Anisichkin, A. A. Bezborodov, and I. R. Suslov // Atomic Energy. – 2005. – 98, No. 5. UDC 621.039.5 Translated from Atomnaya Énergiya. – 2005. – Vol. 98, No. 5. – P. 370–379.
3. **Anisichkin, V. F.** Georeactor in the Earth [Text] / V. F. Anisichkin, A. A. Bezborodov, and I. R. Suslov // Transport Theory and Statistical Physics. – 2008. – 37, 624–633.
4. **Anisichkin, V. F.** Equation of state for calculating temperature of material in explosive processing [Text] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 90, No. 4, (2017).

4-5

УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ ВБЛИЗИ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ ЖИДКОСТЬ–ПАР

К. А. Боярских^{1,2,3}, К. В. Хищенко^{1,2,3,4}

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

³Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

⁴Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

E-mail: shagom55@gmail.com

Вопрос построения универсального уравнения состояния для металлов вблизи критической точки жидкость–пар представляется интересным при решении актуальных задач физики высоких плотностей энергии. Настоящая работа посвящена изучению различных моделей уравнения состояния и их сравнению с имеющимися экспериментальными данными. На

начальной стадии этой работы изучалось относительно простое, хорошо известное уравнение Ван-дер-Ваальса. С его помощью был проверен алгоритм расчета термодинамических характеристик границы двухфазной области жидкость–пар. Далее, используя отработанный алгоритм, позволяющий осуществлять расчеты давления и удельных объемов жидкости и пара в точке фазового равновесия при заданной температуре с контролируемой точностью, были исследованы еще две модели: Ликальтера и Хольцапфеля. С учетом сделанных дополнительных предположений о теплоемкости вещества были проведены также расчеты термодинамических потенциалов, их первых и вторых производных. Построены ударные адиабаты Гюгонио для различных значений начального давления и плотности. Полученные результаты расчетов представлены в сравнении с различными экспериментальными данными для металлов с известными параметрами критической точки жидкость–пар (ртуть, цезий, рубидий). Также проведены оценки параметров критической точки для тугоплавких металлов (иридий, рений, родий) исходя из экспериментальных данных по плотности жидкой фазы вблизи температуры плавления. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-19-00713).

EQUATIONS OF STATE FOR METALS AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES NEAR THE LIQUID–VAPOR CRITICAL POINT

K. A. Boyarskikh^{1,2,3}, K. V. Khishchenko^{1,2,3,4}

¹Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology,
Dolgoprudny, Russia

³Institute of Problems of Chemical Physics RAS,
Chernogolovka, Russia

⁴South Ural State University, Chelyabinsk, Russia
E-mail: shagom55@gmail.com

The question of constructing a universal equation of state for metals near the liquid–vapor critical point seems to be interesting in solving urgent problems of physics of high energy densities. This work is devoted to the study of various models of the equation of state and their comparison with the available experimental data. At the initial stage of this work, a relatively simple, well-known van der Waals equation was studied. It was used to test the algorithm for calculating the thermodynamic characteristics of the boundary of the two-phase liquid–vapor region. Further, using a proven algorithm that allows calculating the pressure and specific volumes of liquid and vapor at the point of phase equilibrium at a given temperature with controlled accuracy, two more models were investigated: Likalter and Holzapfel. Taking into account the additional assumptions about the heat capacity of the substance, calculations of the thermodynamic potentials and their first and second derivatives were also carried out. Hugoniot shock adiabats are constructed for various values of the initial pressure and density. The calculation results obtained are presented in comparison with various experimental data for metals with known parameters of the liq-

uid–vapor critical point (mercury, cesium, and rubidium). We also estimated the parameters of the critical point for refractory metals (iridium, rhenium, and rhodium) based on experimental data on the density of the liquid phase near the melting point. This work is supported by the Russian Science Foundation (grant No. 19-19-00713).

4-6

СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ С ГРАФЕНОМ

И. Г. Бродова¹, Л. А. Елшина², Е. В. Шорохов³,
Д. Ю. Распосиенко¹, И. Г. Ширинкина¹, А. Н. Петрова¹,
С. В. Разорёнов^{4,5}, К. В. Гаан³, Р. В. Мурадымов²

¹Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

²Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

³Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

⁴Институт проблем химической физики РАН,
Москва, Россия

⁵Национальный исследовательский университет,
Томск, Россия

E-mail: brodova@imp.uran.ru

Получены композиты на основе алюминия и Al-Mg сплава, упрочненные нанопленками графена, синтезом «*in situ*» под слоем солевого расплава. С помощью SEM и HRTEM изучены морфологические и размерные характеристики структурных составляющих композитов с разным содержанием графена. Выполнен эксперимент по динамическому сжатию композитов методом Кольского, измерены динамические свойства и рассмотрена эволюция литой структуры в процессе высокоскоростной деформации.

Исследованы особенности структурообразования и деформационное поведение алюмоматричных композитов, полученных методом динамического канально-углового прессования. Установлено, что в процессе деформации образуются композиты с субмикроструктурой, обладающие повышенной в 2,5 раза относительно литого состояния твердостью. Впервые измерены динамические свойства композитов с разным содержанием графена в условиях нагружения плоскими ударными волнами со скоростью $5,0 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$. Сравнение с динамическими характеристиками литых композитов показало рост динамических пределов упругости и текучести в 1,8–2,0 раза.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Структура», № АААА-А18-118020190116-6).

SYNTHESIS, STRUCTURE AND PROPERTIES OF ALUMINUM COMPOSITES WITH GRAPHENE

I. G. Brodova¹, L. A. Yolshina², E. V. Shorokhov³,
D. Yu. Rasposienko¹, I. G. Shirinkina¹, A. N. Petrova¹,
S. V. Razorenov^{4,5}, K. V. Gaan³, R. V. Muradymov²

¹M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

²Institute of High-Temperature Electrochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

³Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

⁴Institute of Problems of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia.

⁵National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia
E-mail: brodova@imp.uran.ru

Al-base and Al-Mg alloy-based composites reinforced with graphene nanoplatelets have been synthesized *in-situ* for the first time under a layer of molten salts. The morphological and dimensional characteristics of the structural constituents in the composites with different graphene content were studied by SEM and HRTEM. Dynamic compression tests of the composites were performed on a Kolsky bar, dynamic properties were measured and the evolution of the as-cast structure during high-speed deformation was studied. The features of structure formation and deformation behavior of aluminum-matrix composites obtained by dynamic channel-angular pressing are investigated. It was found that in the process of deformation, composites with a submicrocrystalline structure are formed, which have a 2.5 times higher hardness relative to the cast state. The dynamic properties of composites with different graphene content were measured for the first time under conditions of loading by plane shock waves at a speed of $1.4\text{--}5.4 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$. Comparison with the dynamic characteristics of a coarse-crystalline composite showed an increase in the dynamic limits of elasticity and yield by 1.8–2.0 times.

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme “Structure” No. AAAA-A18-118020190116-6).

4-7

ВОЗМОЖНОСТИ БЕЗУДАРНОГО СЖАТИЯ МЕТАЛЛОВ ДО 40 Мбар ПРИ ИМПЛОЗИИ ЛАЙНЕРОВ ОТ ДИСКОВЫХ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

А. М. Буйко

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия
E-mail: ambuyko@vniief.ru.

При имплозии цилиндрических лайнеров под действием импульсных токов 16–70 МА (азимутальных

магнитных полей 16–10 МГс) – возможны безударные сжатия металлов до давлений 10–20 Мбар [1–4]. Рассматривались лайнеры из алюминия и двухслойные лайнеры, внутренний слой которых – исследуемый металл (Cu, Ta, W), а в прилегающем наружном слое (Al, Cu) течет ток и формируется магнитное давление. В экспериментах [1] на Z-машине Сандийской Национальной Лаборатории США были проведены прецизионные измерения скорости $v_m(t) < 20 \text{ км/с}$ внутренних границ Al-, Al/Cu- и Al/Ta-лайнеров. Это позволило новым экспериментально-расчетным методом получать изэнтропы металлов до давлений 10 Мбар, в принципе, с точностью несколько процентов. Аналогичный подход был использован в расчётах [2–4]. Рассматривалась имплозия Al-, Al/Cu-, Al/W- и Cu/W-лайнеров от дисковых взрывомагнитных генераторов – в устройствах типа ALT (Advanced Liner Technology). Аналогичные расчеты, методические уточнения которых приведены в работе [4], показывают возможности достижения в таких устройствах безударных давлений 40 Мбар, – при имплозии Cu/W-лайнера, что обеспечивается увеличением магнитных полей с 10 до 20 МГс и, особенно глубины имплозии (уменьшением минимального радиуса лайнера к концу имплозии до уровня [1]).

Литература

1. **Lemke, R.W.** Probing off-Hugoniot states in Ta, Cu, and Al to 1000GPa compression with magnetically driven liner implosions [Text] / R.W. Lemke, D. H. Dolan, D. G. Dalton et al. // Journal of Applied Physics. – 2016. – 119.
2. **Buyko, A. M.** Some Promises of Magnetic Implosion of High-Velocity Liners in the ALT-3 Driver [Text] / IEEE Transactions on Plasma Science. – 2018. – Vol. 46, no. 10. – P. 3512–3517.
3. **Kuznetsov, S. D.** Simulation of Isentropic Compression of Aluminum by Magnetically Imploded Liners in experiments ALT-1-3 [Text] / S. D. Kuznetsov, A. M. Buyko, S. F. Garanin et al. // 16th International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics (MEGAGAUSS), Kashiwa, Japan, 2018. – P. 1–4. doi: 10.1109/MEGAGAUSS.2018.8722649.
4. **Buyko, A. M.** Simulations of ALT-like explosive magnetic devices for ramp compression of materials by magnetically imploded liners» [Text] / A. M. Buyko, G. G. Ivanova, I. V. Morozova // Matter and Radiation at Extremes 5, 047402 (2020). doi: 10.1063/1.5140621.

POSSIBILITY OF RAMP COMPRESSION OF METALS TO 40 MBAR BY LINER IMPLOSION DRIVEN BY DISK EXPLOSIVE MAGNETIC GENERATORS

A. M. Buyko

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia
E-mail: ambuyko@vniief.ru.

Implosion of cylindrical liners driven by pulsed currents of 16–70 MA (azimuthal magnetic fields of 16–10 MG) enables ramp compression of metals to 10–20 Mbar

pressures [1–4]. Aluminum liners and two-layer liners with an inner layer of the test material (Cu, Ta, W) and an adjacent outer layer (Al, Cu), which carries current and creates magnetic pressure, were considered. In the experiments [6] on the Z machine at Sandia National Laboratories, USA, precision measurements of inner-layer velocities $v_m(t) < 20$ km/s were taken for Al-, Al/Cu- and Al/Ta-liners. A new technique combining experiments and calculations was developed, which allows predicting isentropes of metals up to 10 Mbar pressures – in principle, to within several percent. A similar approach was used in the calculations reported in [2–4]. Implosion of Al-, Al/Cu-, Al/W- and Cu/W liners driven by disk explosive magnetic generators was considered in ALT-like (Advanced Liner Technology) devices. Similar calculations, the methodological improvements to which are discussed in [4], demonstrate that such devices can deliver 40 Mbar ramp pressures when driving a Cu/W liner by increasing magnetic fields from 10 to 20 MG and, most notably, by increasing implosion depth (with a decrease in the minimum liner radius by late implosion times to the level of [1]).

References

1. **Lemke, R.W.** Probing off-Hugoniot states in Ta, Cu, and Al to 1000GPa compression with magnetically driven liner implosions [Text] / R.W. Lemke, D. H. Dolan, D. G. Dalton et al. // Journal of Applied Physics. – 2016. – 119.
2. **Buyko, A. M.** Some Promises of Magnetic Implosion of High-Velocity Liners in the ALT-3 Driver [Text] / IEEE Transactions on Plasma Science. – 2018. – Vol. 46, no. 10. – P. 3512–3517.
3. **Kuznetsov, S. D.** Simulation of Isentropic Compression of Aluminum by Magnetically Imploded Liners in experiments ALT-1-3 [Text] / S. D. Kuznetsov, A. M. Buyko, S. F. Garanin et al. // 16th International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics (MEGAGAUSS), Kashiwa, Japan, 2018. – P. 1–4. doi: 10.1109/MEGAGAUSS.2018.8722649.
4. **Buyko, A. M.** Simulations of ALT-like explosive magnetic devices for ramp compression of materials by magnetically imploded liners» [Text] / A. M. Buyko, G. G. Ivanova, I. V. Morozova // Matter and Radiation at Extremes 5, 047402 (2020). doi: 10.1063/1.5140621.

и титан. Представительные элементы объема металлов, изначально с идеальной решеткой так и с вырезанной в центре порой подвергались равномерному трехосному растяжению. На границе объемов задавались периодические граничные условия. МД моделирование проводилось с использованием программного пакета LAMMPS [1] и межатомных потенциалов типа EAM для следующих металлов: Ta [2], W [3] и Ti [4]. На начальном этапе при подготовке МД системы давление снижалось до нуля с помощью баростата. Температура на этапе подготовки и растяжения поддерживалась с помощью термостата, в различных расчетах она варьировалась от 300 до 3000 К. Сначала система выдерживалась 10 пс в баростате. Далее баростат выключался, и прикладывалось всестороннее растяжение с постоянной объемной скоростью деформации 3 нс^{-1} . Распределение пор по размерам и их количество определялось по алгоритму обработки атомных конфигураций, взятому из работы [5, 6]. Результаты МД моделирования используются для проверки континуальной модели разрушения [7] и позволяют определять параметры этой модели. На этапе зародышеобразования выявлено, что распределение пор по размерам носит экспоненциальный характер. Исследование проведено при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-79-10229).

Литература

1. **Plimpton, S.** Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics [Text] // Journal of Computational Physics. – 1995. – Vol. 117. – P. 1–19.
2. **Ravelo, R.** Shock-induced plasticity in tantalum single crystals: Interatomic potentials and large-scale molecular-dynamics simulations [Text] / R. Ravelo, T. C. Germann, O. Guerrero, Q. An, B. L. Holian // Physical Review B. – 2013. – Vol. 88(13). – P. 134101.
3. **Marinica, M.-C.** Interatomic potentials for modelling radiation defects and dislocations in tungsten [Text] / M.-C. Marinica, L. Ventelon, M. R. Gilbert, L. Proville, S. L. Dudarev, J. Marian, G. Bencteux, F. Willaime // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2013. – Vol. 25(39). – P. 395502.
4. **Mendelev, M. I.** Development of an interatomic potential for the simulation of defects, plasticity, and phase transformations in titanium [Text] / M. I. Mendelev, T. L. Underwood, G. J. Ackland // The Journal of Chemical Physics. – 2016. – Vol. 145(15). – P. 154102.
5. **Mayer, P. N.** Size distribution of pores in metal melts at non-equilibrium cavitation and further stretching, and similarity with the spall fracture of solids [Text] / P. N. Mayer, A. E. Mayer // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – Vol. 127, Part C. – P. 643–657.
6. **Майер, А. Е.** Алгоритм для анализа распределения пор по размерам, основанный на результатах молекулярно-динамического моделирования [Текст] / А. Е. Майер, П. Н. Майер // Челябинский физико-математический журнал. – 2018. – Т. 3(3). – С. 344–352.
7. **Mayer, A. E.** Strain rate dependence of spall strength for solid and molten lead and tin [Text] / A. E. Mayer, P. N. Mayer // International Journal of Fracture. – 2020. – Vol. 222(1–2). – P. 171–195.

4-8

АТОМИСТИЧЕСКОЕ И КОНТИНУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

Д. С. Воронин, А. Е. Майер

Челябинский государственный университет,
Челябинск, Россия

E-mail: v-demonizerus@mail.ru, mayer@csu.ru

В данной работе при помощи метода молекулярной динамики (МД) изучена кинетика порообразования в тугоплавких металлах: тантал, вольфрам

ATOMISTIC AND CONTINUUM MODELING OF FRACTURE OF REFRACTORY METALS

D. S. Voronin, A. E. Mayer

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: v-demonizerus@mail.ru, mayer@csu.ru

In this work, using the molecular dynamics (MD) we study the kinetics of pore formation in the following refractory metals: tantalum, tungsten, and titanium. Representative volume elements of these metals are subjected to uniform triaxial stretching; the volumes are both with initially perfect lattice and with a pore in the center. Periodic boundary conditions are set at the boundary of the volumes. MD simulation is carried out using the LAMMPS software package [1] and interatomic potentials of the EAM type: Ta [2], W [3], and Ti [4]. During the preparation of the MD system, the pressure is reduced to zero using a barostat. The temperature at the stage of preparation and stretching is maintained using a thermostat; in various calculations, it varies from 300 to 3000 K. Initially, the system was held for 10 ps in the barostat. Then the barostat is turned off, and uniform triaxial stretching is applied at a constant volumetric strain rate of 3 ns^{-1} . The pore size distribution and their number are determined using an algorithm of processing of the atomic configurations taken from [5, 6]. The results of MD simulations are used to check the continuum fracture models [7] and make it possible to determine the parameters of this model. At the stage of nucleation, it was revealed that the pore size distribution is exponential. The study is supported by the Russian Science Foundation (project No. 20-79-10229).

References

1. **Plimpton, S.** Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics [Text] // Journal of Computational Physics. – 1995. – Vol. 117. – P. 1–19.
2. **Ravelo, R.** Shock-induced plasticity in tantalum single crystals: Interatomic potentials and large-scale molecular-dynamics simulations [Text] / R. Ravelo, T. C. Germann, O. Guerrero, Q. An, B. L. Holian // Physical Review B. – 2013. – Vol. 88(13). – P. 134101.
3. **Marinica, M.-C.** Interatomic potentials for modelling radiation defects and dislocations in tungsten [Text] / M.-C. Marinica, L. Ventelon, M. R. Gilbert, L. Proville, S. L. Dudarev, J. Marian, G. Bencteux, F. Willaime // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2013. – Vol. 25(39). – P. 395502.
4. **Mendelev, M. I.** Development of an interatomic potential for the simulation of defects, plasticity, and phase transformations in titanium [Text] / M. I. Mendelev, T. L. Underwood, G. J. Ackland // The Journal of Chemical Physics. – 2016. – Vol. 145(15). – P. 154102.
5. **Mayer, P. N.** Size distribution of pores in metal melts at nonequilibrium cavitation and further stretching, and similarity with the spall fracture of solids [Text] / P. N. Mayer, A. E. Mayer // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – Vol. 127, Part C. – P. 643–657.
6. **Mayer, A. E.** Algorithm for the analysis of pore size distribution based on the results of molecular dynamics modeling (in rus) [Text] / A. E. Mayer, P. N. Mayer // Chelyabinsk Physics and Mathematics Journal. – 2018. – T. 3 (3). – P. 344–352.

7. **Mayer, A. E.** Strain rate dependence of spall strength for solid and molten lead and tin [Text] / A. E. Mayer, P. N. Mayer // International Journal of Fracture. – 2020. – Vol. 222(1–2). – P. 171–195.

4-9

МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОВ

С. Д. Гилёв

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

E-mail: gilev@hydro.nsc.ru

Для описания ударного сжатия конденсированного вещества предложено малопараметрическое уравнение состояния вещества в форме Ми–Грюнайзена. Уравнение основывается на постулируемой зависимости коэффициента Грюнайзена от удельного объема и температуры $\Gamma(V, T)$, качественно описывающей сжатие металлических образцов в сильных ударных волнах. По зависимости $\Gamma(V, T)$, используя обобщенную формулу для функции Грюнайзена, найдена кривая холодного сжатия. Тепловые колебания кристаллической решетки описываются в приближении Дебая. Построенная функция Грюнайзена имеет два свободных параметра. Значения других коэффициентов уравнения состояния определяются по справочным данным для вещества при нормальных условиях, а также из предельных значений в экстремальных условиях. Апробация модели выполнена для меди и алюминия. Построенное уравнение состояния описывает кривую холодного сжатия, нормальную изотерму, ударную сжимаемость, а также кривые разгрузки металлов в диапазоне плотности, давления и внутренней энергии, для которых доступны опытные данные. Выполнены расчеты термодинамических характеристик металлов (изэнтропический модуль объемного сжатия, скорость звука, температура Дебая, теплоемкость, коэффициент линейного расширения, температура плавления). Сравнение с имеющимися на сегодняшний день опытными данными показывает, что построенная модель, несмотря на свою простоту, позволяет единообразно описать большой массив экспериментов в области высоких плотностей энергии. Показаны возможности повышения точности и расширения рабочей области модели за счет учета изменения характера взаимодействия атомов в кристалле при сжатии. Для этого безразмерный параметр t в обобщенном уравнении для коэффициента Грюнайзена рассматривается как функция сжатия. Для кривой холодного сжатия рабочая область модели может быть увеличена почти на порядок величины по плотности и более чем на два порядка по давлению (по сравнению с моделью, в которой параметр t полагался постоянным).

FEW-PARAMETER EQUATION OF STATE OF METALS

S. D. Gilyov

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, SB RAS,
Novosibirsk, Russia

E-mail: gilev@hydro.nsc.ru

A few-parameter equation of state in the Mie–Grüneisen form is proposed to describe shock compression of condensed matter. The equation is based on a postulated dependence of the Grüneisen coefficient on the specific volume and temperature $\Gamma(V, T)$, which provides a qualitative description of compression of metal samples in strong shock waves. The curve of cold compression is found on the basis of the dependence $\Gamma(V, T)$ with the use of a generalized formula for the Grüneisen function. Heat-induced oscillations of the crystal lattice are described in the Debye approximation. The resultant Grüneisen function has two free parameters. The values of other coefficients of the equation of state are determined from the reference data for matter under normal conditions and also from limiting values under extreme conditions. The model is tested by an example of copper and aluminum. The derived equation of state describes the cold compression curve, normal isotherm, shock compressibility, as well as the metals unloading curves in density, pressure, and internal energy ranges for which experimental data are available. The thermodynamic characteristics of metals (isentropic modulus of volume compression, velocity of sound, Debye temperature, specific heat, linear expansion coefficient, and melting temperature) are calculated. Comparisons with available experimental data show that the proposed model, despite its simplicity, ensures a consistent description of a large array of experimental data in the region of high energy densities. The possibilities of increasing the accuracy and expanding the working area of the model by taking into account the change in the nature of the interaction of atoms in the crystal during compression are shown. For this, the dimensionless parameter t in the generalized equation for the Grüneisen coefficient is considered as a function of compression. For a cold compression curve, the working area of the model can be increased by almost an order of magnitude in density and by more than two orders of magnitude in pressure (as compared to the model in which the parameter t was assumed to be constant).

4-10

ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ МЕДИ ПРИ СИЛЬНОМ СЖАТИИ: РАВНОВЕСНАЯ МОДЕЛЬ И УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

С. Д. Гилёв

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

E-mail: gilev@hydro.nsc.ru

На основе уравнения электросопротивления Блоха–Грюнайзена и малопараметрического уравнения состояния типа Ми–Грюнайзена разработана простая феноменологическая модель электросопротивления металла при больших давлениях и температурах. Сравнением предсказаний модели с экспериментальными данными по изотермическому сжатию и изобарическому нагреву найдены два свободных параметра модели для меди. Проведены эксперименты по измерению электросопротивления фольговых образцов меди при ударном сжатии. Выявлено значительное влияние на электросопротивление металла диэлектрической обоймы и геометрии образца. Численным моделированием определены термодинамические параметры состояния фольговых металлических образцов при ударном сжатии. Определена зависимость удельного электросопротивления меди от давления ударной волны в диапазоне до 20 ГПа. Экспериментальные данные по удельному электросопротивлению сравниваются с предсказаниями равновесной модели. Выявлены значимые расхождения модели и ударно-волнового эксперимента, которые обусловлены особенностями физического состояния металла при ударном сжатии.

ELECTRIC RESISTANCE OF COPPER AT STRONG COMPRESSION: EQUILIBRIUM MODEL AND SHOCK-WAVE EXPERIMENT

S. D. Gilyov

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, SB RAS,
Novosibirsk, Russia

E-mail: gilev@hydro.nsc.ru

A simple phenomenological model of the electrical resistance of a metal at high pressures and temperatures is developed on the basis of the Bloch–Grüneisen equation of electrical resistance and a low-parameter equation of state of the Mie–Grüneisen type. Comparing the predictions of the model with experimental data on isothermal compression and isobaric heating, two free parameters of the model are found for copper. Experiments on measuring the electrical resistance of foil copper samples under shock compression have been carried out. A significant effect on the electrical resistance of the dielectric surrounded and the geometry of the sample is revealed. The thermodynamic parameters of the state of foil metal samples under shock compression are determined by simulation. The dependence of the electrical resistivity of copper

on the shock wave pressure in the range up to 20 GPa has been determined. Experimental data on electrical resistivity are compared with the predictions of the equilibrium model. Revealed significant discrepancies between the model and shock experiment, which are due to physical state features of the metal under shock compression.

4-11

НЕРАВНОВЕСНОСТЬ ФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕДИ ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ

С. Д. Гилёв

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

E-mail: gilev@hydro.nsc.ru

Разрешенные во времени измерения электросопротивления и модель равновесного удельного электросопротивления используются для нахождения компоненты удельного электросопротивления ударно-сжатого металла, обусловленной рождением дефектов кристаллической структуры. Это позволяет оценить *in situ* концентрацию точечных дефектов, генерируемых ударным фронтом, непосредственно за ударным переходом и сделать заключение о степени равновесности физического состояния ударно-сжатой меди. Количество дефектов монотонно возрастает при увеличении давления ударной волны. При давлении 20 ГПа найденная концентрация дефектов достигает 0,8 атомных процента, что превышает на десять (!) порядков величины соответствующее равновесное значение. Это означает, что состояние меди при ударном сжатии является высокодефектным и сильно неравновесным. Сравнение концентрации дефектов в меди и серебре показывает общие особенности состояния этих металлов. Сопоставление данных, полученных в процессе ударного сжатия (эксперименты *in situ*) и для сохраненных после ударного эксперимента образцов демонстрирует, что в первом случае регистрируются заметно большие (до двух порядков величины) концентрации дефектов. Это означает, что техника сохраненных образцов, традиционно применявшаяся для изучения свойств материалов, не обеспечивает исследователя достоверными данными о состоянии вещества непосредственно за ударным фронтом. Все известные уравнения состояния вещества в области высоких давлений и температур основываются на постулате о термодинамической равновесности вещества. Настоящее исследование показывает, что состояние ударно-волнового эталона – меди – оказывается сильно неравновесным. Поэтому проблема построения уравнения состояния в динамических экспериментах нуждается в переосмыслении. Обсуждается возможный путь решения это важнейшей задачи.

NONEQUILIBRIUM OF THE PHYSICAL STATE OF COPPER UNDER SHOCK COMPRESSION

S. D. Gilyov

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Siberian Branch of the
Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

E-mail: gilev@hydro.nsc.ru

Time-resolved measurements of electrical resistance and a model of equilibrium resistivity are used to obtain a component of the resistivity of shock-compressed metal caused by the formation of crystal structure defects. This allows one to estimate *in situ* the concentration of point defects generated by the shock front just after shock transition and to draw a conclusion on the equilibrium degree of the physical state of shock-compressed copper. The number of defects monotonically increases with increasing pressure of a shock wave. At pressure of 20 GPa, the defect concentration reaches 0.8 atomic percent, which is ten (!) orders of magnitude larger than the corresponding equilibrium value. This means that the state of copper under shock compression is highly defective and very nonequilibrium. A comparison of the concentration of defects in copper and silver reveals the general features of the state of these metals. A comparison of the data obtained under shock compression (experiments *in situ*) and for samples recovered after the shock experiment demonstrates that in the first case, noticeably higher (up to two orders of magnitude) defect concentrations are recorded. This means that the technique of recovered samples (that traditionally has been used to study materials properties) does not provide reliable data on the matter state directly behind the shock front. All known equations of state of matter in the region of high pressures and temperatures are based on the postulate of thermodynamic equilibrium of matter. The present study shows that the state of the shock-wave standard (copper) turns out to be highly non-equilibrium. Therefore, the problem of constructing the equation of state in dynamic experiments needs to be rethought. A possible way to solve this most important problem is being discussed.

4-12

О МЕХАНИЗМАХ РАЗРУШЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЗРЫВНОЙ НАГРУЗКИ

Е. Ф. Грязнов, М. М. Бойко

Московский государственный университет
им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: gryaznov-2000@mail.ru

Результаты экспериментальных исследований, проведенных в широком диапазоне свойств сталей, параметров взрывной нагрузки и размерных параметров цилиндрических оболочек, дали возможность разработать качественную модель механизмов зарождения и развития фрагментообразующих трещин.

Начальный этап разрушения в оболочках с большой и средней толщиной стенки обусловлен волновыми эффектами, вызывающими появление первичных очагов трещин откольной природы в средних зонах стенки оболочки. Развитие трещин из первичных очагов в процессе расширения происходит в направлениях как внешней, так и внутренней поверхностей оболочки, вызывая «торможение» пластического течения материала. Заключительный этап сквозного разрушения оболочки связан с локализацией деформаций в зонах, прилегающих к внутренней поверхности. Измерения микродеформаций в различных зонах осколков оболочек позволили построить пространственно-временную диаграмму процесса разрушения.

В тонких оболочках откольные эффекты отсутствуют, и механизм разрушения в них связан с локализацией деформаций в виде сдвига по всей толщине стенки уже на ранних стадиях нагружения.

MECHANISMS OF STEEL SHELL FRACTURE DRIVEN BY BLAST LOAD

E. F. Gryaznov, M. M. Boyko

Bauman Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: gryaznov-2000@mail.ru

The results of experimental studies, conducted in the wide range of steel properties, blast load parameters, and cylindrical shell parameters, helped to develop qualitative model of nucleation and evolution of cracks that form fragments. The initial stage of fracturing in the shells with thick and medium walls is due to wave effects, causing nucleation of spallation cracks in the medium regions of the shell walls. Crack propagation from the initial nuclei goes both inside and outside, causing material plastic flow “deceleration”. Final stage of the perforating shell fracturing evolves with deformation localized in the regions, adjacent to the outer surface. Microdeformation measurements in various shell spall regions facilitate plotting the space-time diagram of the fracturing process.

In thin shells spallation effects are absent, the fracturing mechanism is connected with deformation localization as a shear along the whole wall thickness at the early stages of loading.

4-13

НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ДИНАМИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ БЕРИЛЛИЯ В ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ 10^3 – 10^5 с⁻¹

А. А. Дегтярев¹, А. Е. Ковалёв^{1,3}, А. В. Кальманов²

¹Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

³Южно-Уральский государственный университет (НИУ),
Челябинск, Россия

E-mail: a.a.degtjarjov@gmail.com, kae-snz@mail.ru

В последние годы бериллий все более активно применяется в различных областях науки и техники (атомной, космической, авиационной и т. д. промышленности). Востребованность этого материала обусловлена его уникальными физическими, механическими и теплофизическими свойствами. В литературе не так много данных о его механических характеристиках, особенно при высокоскоростной деформации ($\dot{\epsilon}$).

Цель работы: получение экспериментальной информации по динамическим свойствам бериллия.

Задачи:

- изучение свойств бериллия при динамическом сжатии по методу составных стержней Гопкинсона (ССГ) в зависимости от направления прессования заготовок, естественного старения и скорости деформации.
- получение и анализ экспериментальных данных по откольной прочности ($\sigma_{отк}$) бериллия в зависимости от скорости деформации.

В работе исследовались образцы, изготовленные из порошка бериллия методом горячей объемной штамповки с последующей механической обработкой – вырезанием относительно направления прессования в трех направлениях – вдоль, поперек и под углом 45° относительно оси прессования штампованной заготовки.

Получение экспериментальных данных по динамическому нагружению образцов выполнено на экспериментальной установке ССГ РФЯЦ – ВНИИЭФ. Ударно-волновые эксперименты по откольной прочности проведены с использованием взрывных нагружающих устройств в РФЯЦ – ВНИИТФ.

По результатам экспериментов ССГ показано, что с увеличением скорости деформации исследуемый материал упрочняется. Наблюдается линейное увеличение условного предела текучести ($\sigma_{0,2}$). Естественно состаренный бериллий не обладает анизотропией свойств в поперечном и продольном направлениях прессования заготовки. Образцы, вырезанные под углом 45°, проявляют большую пластичность и меньшую прочность.

Свежеизготовленный бериллий напротив, проявляет анизотропные свойства. Средняя величина условного предела текучести для образцов вырезанных перпендикулярно направлению прессования в $\approx 1,3$ раза меньше чем для образцов, вырезанных параллельно

направлению прессования. Образцы, вырезанные под углом 45°, обладают промежуточным значением условного предела текучести.

Полученные данные по динамическим свойствам бериллия в ударно-волновых экспериментах указывают на нелинейное поведение откольной. Зависимость откольной прочности бериллия от скорости деформации имеет максимум в диапазоне скоростей деформации $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^4 \div 15 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, что не противоречит ранее опубликованным данным.

NEW DATA ON DYNAMIC PROPERTIES OF BERYLLIUM IN THE $10^3 \div 10^5 \text{ s}^{-1}$ DEFORMATION RATE RANGE

A. A. Degtyaryov¹, A. E. Kovalyov^{1,3}, A. V. Kal'manov²,
F. F. Galiev², E. V. Koshatova²

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

²Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

³South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

E-mail: a.a.degtyaryov@gmail.com, kae-snz@mail.ru

Beryllium has recently become a widely used material in various fields of science and technology (nuclear, space, aircraft and other industries). Demand in beryllium is associated with its unique physical, mechanical, and thermophysical properties. Literature provides little information on its mechanical characteristics especially at high-rate deformation ($\dot{\epsilon}$).

The intention of the present work was to obtain experimental data on dynamic properties of beryllium.

The work was broken down into several tasks:

- study the properties of dynamically-compressed beryllium using Hopkinson split-bar method depending on the blanks' pressing direction, natural ageing and deformation rate;

- acquire and analyze experimental data on the spall strength (σ_{spall}) of beryllium depending on the deformation rate.

This work was carried out to study the specimens consisting of beryllium powder prepared by hot forging and post-process machining. This procedure was used for cutting-out with reference to the direction of pressing (in three directions): longitudinal and transverse directions and at a 45-degree angle with respect to the pressing axis of the forged blank. The experimental data on dynamic loading of the specimens were obtained using the experimental Hopkinson split-bar test facility at RFNC – VNIIEF. The shock-wave experiments to test the spall strength were conducted with the explosive loading devices at RFNC – VNIIEF.

The experimental results obtained with Hopkinson split bars showed that the studied material strengthened as the deformation rate increased. It was apparent that conventional yield strength ($\sigma_{0.2}$) was increasing linearly. Naturally aged beryllium does not demonstrate anisotropic

behavior in the transverse and longitudinal directions of the blank pressing. The specimens cut out at a 45-degree angle show greater plasticity and less strength.

In contrast, freshly prepared beryllium demonstrates anisotropic behavior. The average conventional yield strength of the specimens cut out normal to the pressing direction is less by a factor of about 1.3 as compared to those ones cut out parallel to the pressing direction. Conventional yield strength of the specimens cut out at a 45-degree angle is of an average value.

The data on dynamic properties of beryllium obtained in the shock-wave experiments is suggestive of nonlinear behavior of the spall strength. Beryllium spall strength dependence on the deformation rate has its maximum in the $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^4 \div 15 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$ deformation rate range and this does not contradict the previously published data.

4-14

ВНУТРИФОРМЕННОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ МЕДИ

А. А. Жданок¹, В. А. Кузнецов¹,
З. А. Коротаева¹, Н. В. Степанова²

¹Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

E-mail: a-zhdanok@mail.ru

Главные свойства меди, которые определяют ее преимущественное использование, – это высокие значения электропроводности и теплопроводности, а также хорошая стойкость по отношению к коррозии. В чистом виде медь относительно мягкая, хорошо поддается обработке (легко прокатывается и протягивается в проволоку). Легирование металлами помогает повысить твердость, но при этом падают основные характеристики.

Влиять на механические свойства металлов можно введением малых добавок инертных керамических материалов (модификаторов), которые будут являться центрами кристаллизации, изменять микро- и макроструктуру, при этом не будут снижать тепло- и электропроводность. А для лучшего смачивания керамических частиц расплавом их необходимо плакировать металлами. Для этого используют совместную обработку керамических порошков и металлов в планетарно-центрибежных активаторах.

Для модифицирования были приготовлены пять литейных форм с целью получения цилиндрических образцов диаметром 30 мм с модификаторами: 1) $\text{W}_4\text{C}(\text{Cu}/\text{Cr}/\text{Zr})$; 2) $\text{W}_4\text{C}(\text{Cu}/\text{Cr})$; 3) $\text{WC}/\text{TiC}(\text{Cu}/\text{Cr})$; 4) редкоземельный металл церий; 5) без добавок (контрольный). Количество активной фазы (керамики и церия) составляло 0,03% от массы отливки.

Расплав меди (1080°C) заливали в формы, после охлаждения вынимали из форм, от полученных образцов отрезали шайбы высотой 10 мм для микрострук-

турных исследований, определения твердости, коррозионной стойкости.

Оптическая и электронная микроскопии показали отличия в макро- и микроструктуре модифицированных образцов от контрольного. Твердость по Бринеллю (HB) и Виккерсу (HV) определяли по среднему значению из 30–60 уколов. Коррозионную стойкость определяли в 11% азотной кислоте.

Обнаружено, что образцы 1–3 имеют наименьшие стандартные отклонения по твердости от средних значений, что может служить показателем более равномерной кристаллизации расплава при применении модификаторов B_4C и WC/TiC . Стандартные отклонения у образцов 1–5 по HB: 2,37; 1,90; 1,37; 6,29; 2,54; по HV: 3,19; 2,39; 2,89; 6,53; 5,28, соответственно. Образцы 2 и 3 имеют наименьшие стандартные отклонения значений твердости на разных расстояниях от центра образца.

Улучшение коррозионной стойкости по отношению к немодифицированному образцу, в %: через 43 часа выдержки в азотной кислоте – 11, 7; 9,3; 2,2; –10,9; 0,0; через 177 часов – 33,5; 11,6; 16,2; 19,8; 0,0, соответственно.

IN-MOLD MODIFICATION OF COPPER

A. A. Zhdanok¹, V. A. Kuznetsov¹,
Z. A. Korotaeva¹ and N. V. Stepanova²

¹Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk State Technological University,
Novosibirsk, Russia

E-mail: a-zhdanok@mail.ru

The main properties of copper that determine its preferable application areas are high values of its electrical conductance and thermal conductivity, as well as high stability against corrosion. In the pure state, copper is relatively soft and readily amenable to treatment (easily rolled and drawn into wire). Doping with metals allows enhancing the hardness, but the main characteristics deteriorate.

Mechanical characteristics of metals may be affected by introducing trace additives of inert ceramic materials (modifying agents), which would be crystallization centers, alter micro- and macrostructure, but would not cause a decrease in thermal and electrical conductivity. For better wetting with the melt, ceramic particles are to be plated with metals. For this purpose, the joint treatment of ceramic powders and metals in planetary centrifugal activators is applied.

For modification, five molds were prepared in order to obtain cylindrical samples 30 mm in diameter, with modifying agents: 1) $B_4C(Cu/Cr/Zr)$; 2) $B_4C(Cu/Cr)$; 3) $WC/TiC(Cu/Cr)$; 4) rare-earth metal cerium; 5) without additives. The amounts of the active phase (ceramics and cerium) was 0.03 wt.% of the mass of the cast mass.

Copper melt (1080°C) was poured in the molds, after cooling the samples were taken out of the molds, and washers 10 mm high were cut off the samples to carry

out microstructure studies, to determine the hardness and corrosion stability.

Optical and electron microscopy showed that the modified samples differed in macro- and microstructure from the reference sample. Brinell hardness (HB) and Vickers hardness (HV) were determined from the average value over 30–60 pricks. Corrosion resistance was determined in 11% nitric acid.

It was discovered that samples 1–3 exhibit the smallest standard deviations of hardness from the mean values, which may be the sign of more uniform crystallization of the melt in the cases when B_4C and WC/TiC are used as modifying agents. Standard deviations for samples 1–5 with respect to HB are 2,37; 1,90; 1,37; 6,29; 2,54; with respect to HV: 3,19; 2,39; 2,89; 6,53; 5,28, respectively. Samples 2 and 3 exhibit the smallest standard deviations of hardness values at different distances from sample center.

The improvement of corrosion stability in comparison with non-modified sample was, in %: after exposure for 43 hours in nitric acid – 11, 7; 9,3; 2,2; –10,9; 0,0; after exposure for 177 hours – 33,5; 11,6; 16,2; 19,8; 0,0, respectively.

4-15

УДАРНОЕ СЖАТИЕ ГИДРИДОВ МЕТАЛЛОВ

М. В. Жерноклетов, Л. Ф. Гударенко, А. А. Каякин

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

В докладе анализируются результаты выполненных в разные годы во ВНИИЭФ экспериментальных исследований ударных адиабат гидридов и дейтеридов ванадия, кальция, магния, тантала, титана, циркония с разной концентрацией атомов водорода или дейтерия в диапазоне давлений 30–220 ГПа. Для ряда соединений представляются новые данные.

При выборе формы уравнения состояния проведено сравнение описания экспериментов с расчетами для гидридов ванадия и тантала, выполненными с использованием широкодиапазонного уравнения состояния [1] и простого по форме уравнения состояния в форме Ми–Грюнайзена. При определении параметров простого УРС использовано отмеченное в японских работах свойство одинаковой сжимаемости ($\rho_0 \cdot C_0^2$) металла и его соединений с изотопами водорода D и H. Приведенные в работе результаты свидетельствуют о том, что при расчетах ударных адиабат рассмотренных соединений данное свойство выполняется.

Сравнение показало, что в диапазоне исследованных давлений и плотностей не выявлено практически значимых отличий в расчетах ударных адиабат V и Ta и их соединений с водородом и дейтерием, полученных с использованием широкодиапазонного и простого УРС. Учитывая это, в дальнейшем все расчеты, результаты которых представлены в докладе, выполнены с использованием УРС в простой форме.

Результаты проведенных экспериментов служат базовым материалом для разработки уравнений состояния таких соединений и калибровки (верификации) методик расчета свойств веществ «из первых принципов». Однако сравнительно небольшой объем имеющейся экспериментальной и расчетной информации о термодинамических свойствах гидридов (дейтеридов) титана, циркония и тантала ограничивает разработку широкодиапазонных уравнений состояния этих соединений.

Литература

1. Гордеев, Д. Г. Модель уравнения состояния металлов с эффективным учетом ионизации. Уравнения состояния Ta, W, Al, Be [Текст] / Д. Г. Гордеев, Л. Ф. Гударенко, А. А. Каякин, В. Г. Куделькин // ФГВ. – 2013. – Т. 49, № 1. – С. 106–120.

SHOCK COMPRESSION OF METAL HYDRIDES

M. V. Zhernokletov, L. F. Gudarenko, A. A. Kayakin

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

The paper analyzes the results of experimental studies of shock adiabats of hydrides and deuterides of vanadium, calcium, magnesium, tantalum, zirconium with different concentrations of hydrogen atoms or deuterium atoms in a pressure range of 30–220 GPa. These studies have been implemented in VNIIEF in various years. New data are presented for a series of compounds.

When selecting a form of an equation of state (EOS), a description of experiments was compared with calculations for vanadium hydrides and tantalum hydrides. They were fulfilled by using a wide-range equation of state [1] and a simple in a form equation of state that is in the shape of Mie–Grueneisen. By determining parameters of a simple EOS the authors used a property of equal compressibility ($\rho_0 \cdot C_0^2$) of a metal and its compounds with isotopes of hydrogen D and H. This property was mentioned in the works of some Japan researchers. Results presented in the paper testify that this property is realized in the course of calculations of shock adiabats of the considered compounds.

A comparison showed that over a range of the studied pressures and densities some significant differences were not revealed practically in the calculations of shock adiabats of V and Ta and their compounds with hydrogen and deuterium, which were obtained with the use of a wide-range EOS and a simple EOS. Considering this, in what follows all the calculations, whose results are presented in the paper, were fulfilled using EOS in a simple form.

The results of the implemented experiments serve as a basic material to develop equations of state of such compounds and to calibrate (verify) design procedures of substance properties «on first principles». However, a comparatively small volume of available experimental and calculated information on thermodynamic properties of hydrides (deuterides) of titanium, zirconium and tantalum restricts the development of wide-range equations of state of these compounds.

References

1. Gordeev, D. G. Model of equation of state of metals with efficient consideration of ionization. Equation of states of Ta, W, Al, Be [Text] / D. G. Gordeev, L. F. Gudarenko, A. A. Kayakin, V. G. Kudel'kin // FGV. – 2013. – Vol. 49, No. 1. – P. 106–120.

4-16

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ НА СХОЖДЕНИЕ МЕДНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

В. И. Зельдович¹, А. Э. Хейфец¹, Н. Ю. Фролова¹,
А. А. Дегтярев¹, Е. Б. Смирнов², Е. В. Шорохов²

¹Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

²Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: zeldovich@imp.uran.ru

Цилиндрические оболочки из меди М1 диаметром 48 мм, толщиной стенки 4 мм и длиной 200 мм окружались цилиндрическим слоем пластического взрывчатого вещества (ВВ). Детонационные волны в ВВ возбуждались с торца оболочки с помощью кольцевой системы инициирования. Возникшие скользящие детонационные волны распространялись вдоль боковой поверхности оболочек и вызывали схождение оболочек к оси симметрии. Интенсивность нагружения изменяли за счет изменения толщины слоя ВВ от 2,0 до 5,0 мм в разных экспериментах. Были реализованы три режима нагружения: недостаточный для полного схождения, оптимальный и избыточный. При избыточном режиме происходил разлет схлопнутых оболочек под действием волн напряжений, отраженных от оси симметрии.

Под действием скользящей ударной волны оболочка испытывает пластическую деформацию в радиальном направлении, от поверхности к оси симметрии, и в продольном, вдоль оси оболочки. Скорость радиальной деформации при схождении оболочек высока и составляет 10^4 – 10^5 1/с. Истинная радиальная деформация в центре сходящейся оболочки достигает $e = 3$ [1]. Для исследования радиальной деформации в процессе схождения были сделаны поперечные разрезы нагруженных оболочек, и исследована макро- и микроструктура. В начале схождения на поверхности оболочек образуются выступы и вмятины, происходит потеря устойчивости гладкого фронта деформации. Число выступов на внешней поверхности увеличивается с увеличением интенсивности нагружения, при этом их высота уменьшается. В оболочке, нагруженной по избыточному режиму, выступы «сглаживаются». Значит, при достаточно большой интенсивности нагружения фронт деформации на внешней поверхности сходящейся оболочки не теряет устойчивость. Отметим, что число выступов при гофрировании исследованных оболочек прибли-

зительно прямо пропорционально квадрату толщины слоев ВВ. Принимаем, что толщина слоя ВВ пропорциональна величине энергии, сообщенной оболочке при взрыве, и, далее, кинетической энергии оболочки в начале схождения. Тогда число выступов пропорционально квадрату кинетической энергии.

На более поздней стадии схождения на внутренней поверхности сходящейся оболочки возникают выбросы, пластические струи [1, 2]. Такая потеря устойчивости фронта деформации обусловлена высокой скоростью деформации и имеет гидродинамическое происхождение. Назовем такой механизм потери устойчивости гидродинамическим, в отличие от деформационного, описанного выше. Заметим, что медь в пластических струях испытывает большую деформацию, но не плавится. На завершающей стадии схождения выбросы сливаются, и в поперечном сечении полученного цилиндра формируется окончательная структура в виде «цветка» [1, 2].

При избыточном режиме нагружения был обнаружен эффект потери устойчивости фронта продольной деформации. При толщине слоя ВВ 4,5 мм было зафиксировано начало разлета, при толщине 5,0 мм – разлет привел к полному разрушению и распаду оболочки на части. На начальной стадии разлета участки полного схождения чередовались по длине оболочки с участками разлета (разрушения). Значит, процесс разлета носил периодический (пульсирующий) характер. Пульсирующий характер деформации под действием скользящей ударной волны может быть объяснен попеременным возрастанием и сбросом напряжений в продольном (осевом) направлении. Напряжения в продольном направлении складываются с радиальными, и повышают общий уровень напряжений. Разлет приводит к сбросу напряжений.

Схождение оболочек под действием ударной волны сопровождается явлениями откола. Откол возникает на начальной стадии схождения при взаимодействии падающей и отраженной ударных волн. При последующей высокоскоростной деформации откольные поры и трещины залечиваются. Залечивание пор фиксируется по образованию характерных участков, структура которых резко отличается от окружающей. Обнаружены участки, в которых остатки поры окружены сильно деформированной структурой в виде вихря. Вихревая деформация приводит к «затеканию» материала в пору, как в воронку, и к ее заполнению. Также обнаружены участки округлой формы со следами кристаллизации в виде столбчатых кристаллов. Следовательно, высокоскоростная деформация при залечивании поры привела к повышению температуры выше температуры плавления меди, 1083°C. В отдельных участках, испытавших плавление, присутствует большое количество мелких пор размером от нескольких микрометров до десятков микрометров. Происхождение пор можно объяснить следующим образом. Так как внутри поры был вакуум, то на внутренней поверхности поры могло происходить кипение жидкой меди. Образовавшиеся при кипении пузырьки зафиксировались в материале в виде микропор при быстрой кристаллизации расплава.

Таким образом, в процессе схождения исследованных медных цилиндрических оболочек под действием скользящей ударной волны обнаружены два механизма потери устойчивости гладкого фронта высокоскоростной радиальной деформации: деформационный и гидродинамический. Продольная высокоскоростная деформация может иметь периодический (пульсирующий) характер. Откольные поры, возникшие при взаимодействии ударных волн, залечиваются при высокоскоростной деформации. Залечивание может сопровождаться скачкообразным повышением температуры, выше температуры плавления меди.

Работа выполнена в рамках государственной программы по теме «Структура» № АААА-А18-118020190116-6).

Литература

1. Зельдович, В. И. Металлографическое исследование структурных изменений в меди, происходящих при сходе цилиндрических оболочек [Текст] / В. И. Зельдович, А. Э. Хейфец, Н. Ю. Фролова, И. В. Хомская, Е. Б. Смирнов, А. А. Дегтярев, Е. В. Шорохов // Физика металлов и металловедение. – 2019. – Т. 120. – № 4. – С. 352–359.
2. Зельдович, В. И. Металлографическое исследование схождения медных цилиндрических оболочек при различной интенсивности взрывного нагружения [Текст] / В. И. Зельдович, А. Э. Хейфец, Н. Ю. Фролова, А. А. Дегтярев, Е. Б. Смирнов, Е. В. Шорохов // Физика металлов и металловедение. – 2021. – Т. 122. – № 6.

INFLUENCE OF THE INTENSITY OF EXPLOSIVE LOADING ON THE CONVERGENCE OF COPPER CYLINDRICAL SHELLS

V. I. Zeldovich¹, A. E. Kheifets¹, N. Yu. Frolova¹,
A. A. Degtyaryov¹, E. B. Smirnov², E. V. Shorokhov²

¹M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

²Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: zeldovich@imp.uran.ru

Cylindrical shells made of M1 copper with a diameter of 48 mm, a wall thickness of 4 mm and a length of 200 mm were surrounded by a cylindrical layer of plastic explosive. Detonation waves in explosives were excited from the end of the shell using a ring initiation system. The resulting sliding detonation waves propagated along the lateral surface of the shells and caused the shells to converge to the axis of symmetry. The loading intensity was changed by changing the thickness of the explosive layer from 2.0 to 5.0 mm in different experiments. Three loading modes were implemented: insufficient for full convergence, optimal and excessive. In the excess mode, the converged shells were expanded under the action of stress waves reflected from the axis of symmetry.

Under the action of a sliding shock wave, the shell experiences plastic deformation in the radial direction, from the surface to the axis of symmetry, and in the longitudinal direction, along the axis of the shell. The rate of radial

deformation at the convergence of the shells is high and is 10^4 – 10^5 1/s. The true radial deformation in the center of the converging shell reaches $e = 3$ [1]. To study the radial deformation in the process of convergence, cross – sections of the loaded shells were made, and the macro- and microstructure was studied. At the beginning of convergence, protrusions and dents form on the surface of the shells, and the smooth deformation front loses its stability. The number of protrusions on the outer surface increases with increasing loading intensity, while their height decreases. In a shell loaded in excess mode, the protrusions are “smoothed out”. This means that at a sufficiently high loading intensity, the deformation front on the outer surface of the converging shell does not lose stability. Note that the number of protrusions during the corrugation of the studied shells is approximately directly proportional to the square of the thickness of the explosive layers. We assume that the thickness of the explosive layer is proportional to the amount of energy imparted to the shell during the explosion, and, further, to the kinetic energy of the shell at the beginning of the convergence. Then the number of protrusions is proportional to the square of the kinetic energy.

At a later stage of convergence, outliers, plastic jets, appear on the inner surface of the converging shell [1, 2]. This loss of stability of the deformation front is due to the high deformation rate and has a hydrodynamic origin. Let's call this mechanism of loss of stability hydrodynamic, in contrast to the deformation described above. Note that copper in plastic jets undergoes a large deformation, but does not melt. At the final stage of convergence, the outliers merge, and the final structure in the form of a “flower” is formed in the cross section of the resulting cylinder [1, 2].

The effect of loss of stability of the longitudinal deformation front was found in the excessive loading mode. At a thickness of 4.5 mm of the explosive layer, the beginning of expansion was recorded, at a thickness of 5.0 mm, the expansion led to complete destruction and disintegration of the shell into parts. At the initial stage of expansion, the areas of complete convergence alternated along the length of the shell with the areas of expansion (destruction). This means that the process of expansion was periodic (pulsating) in nature. The pulsating nature of the deformation under the action of a sliding shock wave can be explained by the alternating increase and release of stresses in the longitudinal (axial) direction. The stresses in the longitudinal direction add up to the radial ones, and increase the overall stress level. Destruction leads to a stresses drop.

The convergence of the shells under the action of the shock wave is accompanied by the phenomena of separation. The separation occurs at the initial stage of convergence during the interaction of incident and reflected shock waves. With subsequent high-speed deformation, the spall pores and cracks are healed. The healing of the pores is recorded by the formation of characteristic areas, the structure of which is sharply different from the surrounding one. Areas where the pore remains are surrounded by a strongly deformed structure in the form of a vortex are found. Vortex deformation leads to the “flow” of the

material into the pore, as in a funnel, and to its filling. Also found areas of rounded shape with traces of crystallization in the form of columnar crystals. Consequently, the high-speed deformation during the healing of the pore led to an increase in temperature above the melting point of copper, 1083°C. In some areas that have experienced melting, there are a large number of small pores ranging in size from a few micrometers to tens of micrometers. The origin of the pores can be explained as follows. Since there was a vacuum inside the pore, liquid copper could boil on the inner surface of the pore. The bubbles formed during boiling were fixed in the material in the form of micropores during the rapid crystallization of the melt.

Thus, in the process of convergence of the studied copper cylindrical shells under the action of a sliding shock wave, two mechanisms of loss of stability of a smooth front of high-speed radial deformation are found: deformation and hydrodynamic. The longitudinal high-speed deformation can have a periodic (pulsating) character. Spall pores formed by the interaction of shock waves are healed during high-speed deformation. Healing can be accompanied by a sudden increase in temperature, above the melting point of copper.

The work was carried out within the framework of the state program on the topic “Structure” No. AAAAA 18-118020190116-6).

References

1. **Zel'dovich, V. I.** Metallographic studies of structural changes in copper, occurring at the convergence of cylindrical shells [Text] / V. I. Zel'dovich, A. E. Kheifetz, N. Yu. Frolova, I. V. Khomsкая, E. B. Smirnov, A. A. Degtyarev, E. V. Shorokhov // *Physics of Metals and Metallography*. – 2019. – Т. 120. – No. 4. – P. 352-359.
2. **Zel'dovich, V. I.** Metallographic study of the convergence copper cylindrical shells under various intensity of explosive loading [Text] / V. I. Zel'dovich, A. E. Kheifetz, N. Yu. Frolova, A. A. Degtyarev, E. B. Smirnov, E. V. Shorokhov // *Physics of Metals and Metallography*. – 2021. – Т. 122. – No. 6.

4-17

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБРАЗЦАХ СТАЛИ 09Г2С, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО 3D-ПРИНТЕРА

Н. В. Казанцева¹, А. А. Исупова², Л. Ю. Егорова¹,
Ю. Н. Коэмец¹, А. П. Ничипурук¹

¹Институт физики металлов УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

²Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

E-mail: kazantseva@imp.uran.ru

В работе проведено сравнительное моделирование процесса остывания образца стали 09Г2С в камере лазерного 3D-принтера и в условиях обычной кристал-

лизации, получено распределение поля температур и остаточных напряжений в материале. При выбранных условиях модели получено, что трехмерное распределение поля температур в 3D-образце имеет вид, схожий с образцом, полученным методом традиционной металлургии. Отличие заключается лишь в том, что температуры, которым подвергается материал в случае процесса селективного лазерного сплавления (СЛС), в несколько раз превосходят температуру плавления стали, и зона воздействия высоких температур (зона плавления) очень узкая. Наличие значительного градиента температур приводит к большим остаточным деформациям и следующими за ними внутренним напряжениям, вследствие которых материал находится в неравновесном состоянии, что может приводить к короблению и даже разрушению готового изделия.

Наличие остаточных внутренних напряжений в литых образцах стали 09Г2С и полученных с помощью лазерного 3D-принтера проверено экспериментально (рентгенографическим методом).

Полученные данные могут способствовать рациональному выбору технологических параметров лазерного 3D-принтера (мощности лазера, пятна лазера), а также различных видов термической обработки для снятия остаточных внутренних напряжений в цифровых 3D-изделиях из стали 09Г2С.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобнауки России (тема «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3) при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-58-00015 Бел_а).

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF RESIDUAL INTERNAL STRESSES IN 09G2S STEEL SAMPLES MANUFACTURED WITH 3D LASER PRINTER

N. V. Kazantseva¹, A. A. Isupova², L. Yu. Egorova¹,
Yu. N. Koemets¹, A. P. Nichipuruk

¹Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

²Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

E-mail: kazantseva@imp.uran.ru

A comparative simulation of the cooling process in 09G2S steel sample during 3D-laser printing and under conditions of conventional crystallization was carried out in this work. The distributions of the temperature field and residual stresses in the material were obtained. Under the chosen model conditions, it was obtained that the three-dimensional distribution of the temperature field in 3D-sample was similar to that for the sample obtained by the method of traditional metallurgy. The difference between the temperatures up to which the material was heated in the case of the laser powder bed fusion (L-PBF) process and during conventional crystallization was found. The temperatures obtained during L-PBF process were several times higher than the melting temperature of steel, and the zone of exposure to high temperatures (melting zone) was very narrow. The

presence of a significant temperature gradient led to large residual deformations and, following them, internal stresses, due to which the material was in a non-equilibrium state, which could lead to warping and even destruction of the finished product.

The presence of residual internal stresses in cast samples of 09G2S steel and in the sample manufactured by 3D-laser printing was verified experimentally (by X-ray method).

The obtained results can contribute to the rational choice of technological parameters of 3D-laser printer (laser power, laser spot), as well as various types of heat treatment to relieve residual internal stresses in digital 3D-products made of 09G2S steel.

Support by State program Diagnostics AAA-A18-118020690196-3, and the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) (project No. 20-58-00015 Bel_a) is acknowledged.

4-18

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ УДАРНО-НАГРУЖЕННЫХ ОБРАЗЦОВ С ПОМОЩЬЮ КОМБИНАЦИИ ЛАЗЕРНО-ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

В. Г. Каменев¹, Ю. Д. Арапов¹, П. В. Кубасов¹,
П. Н. Ярошук¹, Д. П. Кучко², Д. Г. Панкратов²,
В. И. Таржанов², А. В. Воробьев², А. Г. Попцов²

¹Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова, Москва, Россия

²Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ технической физики им. академика Е. И. Забахина, Снежинск, Россия

В работе описаны результаты совместных экспериментов ФГУП «ВНИИА» и ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ» с целью отработки перспективных лазерно-оптических методов регистрации быстропротекающих процессов. Динамика движения образцов исследовалась с помощью нескольких методов: лазерной гетеродин-интерферометрии, голографии, метода широкополосного лазерного зондирования, метода структурированного света. Были предложены и экспериментально отработаны варианты одновременного использования данных методов при регистрации движения образцов в газодинамических экспериментах. Проведена отработка нескольких модификаций голографического метода регистрации формы поверхности: голографии с опорным пучком [1], сдвиговой интерферометрии [2], метода структурированного света. Показано, что метод структурированного света обеспечивает надежную регистрацию рельефа поверхности с пространственным разрешением до 50 мкм и временным разрешением до 7 нс. Впервые получены результаты одновременной регистрации с помощью трех оптических методов деформации образца при точечном нагружении с помощью электродетонатора.

Литература

1. **Таржанов, В. И.** и др. [Текст]. – Исследование возможности создания голографической методики регистрации трехмерного изображения поверхности объекта в микросекундном диапазоне времени Отчёт о НИР// РФЯЦ–ВНИИТФ, 2016 г.
2. **Арапов, Ю.Д.,** В.Г. Каменев, Ш.М. Исмаилов [Текст]. – Голографическое исследование рельефа поверхности с использованием интерферометра сдвига // Известия ВУЗов. Радиофизика, 63(8):652–660, 2020 г.

EXPERIMENTAL STUDIES OF SHOCK-LOADED SPECIMENS' DYNAMICS BY COMBINATION OF LASER AND OPTICAL TECHNIQUES

V. G. Kamenev¹, Yu. D. Arapov¹, P. V. Kubasov¹,
P. N. Yaroshchuk¹, D. P. Kuchko², D. G. Pankratov²,
V. I. Tarzhanov², A. V. Vorobyov², A. G. Poptsov²

¹Dukhov Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

²Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

The paper reports about joint experiments of Dukhov Automatics Research Institute and Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics aimed at development of promising laser and optical techniques for imaging fast processes. Dynamics of specimens' motion was studied using several techniques: laser heterodyne interferometry, holography, wide-band laser probing, and technique of structured light. Several options of simultaneous application of these techniques were proposed and mastered in the process of specimens' motion imaging in gas dynamics experiments. We mastered several modifications of holographic technique for surface shape recording: holography with reference beam [1], shear interferometry [2], and technique of structured light. Our studies demonstrated that technique of structured light allows reliable recording of surface relief with spatial resolution up to 50 μm and time resolution up to 7 ns. For the first time we have obtained results of simultaneous imaging of specimen strain under one point loading with electric detonator by three optical techniques.

References

1. **Tarzhanov, V. I.** et al. [Text]. – Research of feasibility of development of holographic technique for imaging 3D surface in microsecond time range. R&D report. RFNC–VNIITF, 2016. (in Russian)
2. **Arapov, Yu. D.,** V. G. Kamenev, Sh. M. Ismailov [Text]. – Holographic study of surface relief using shear interferometer // Russian journal: Izvestia VUZov. Radiophysics, 63(8):652–660, 2020. (in Russian)

4-19

ШИРОКОДИАПАЗОННОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОДОРОДА ДЛЯ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

А. В. Караваев, В. В. Дрёмов, Е. Е. Миронова

Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия

E-mail: a.v.karavayev@vniitf.ru

Водородная экономика – это образ будущего для глобальной экономики, в которой водород станет новым глобальным энергоносителем и начнет играть роль, сопоставимую с ролью традиционных углеводородных носителей. В настоящее время водород в основном производится из углеводородов и потребляется на предприятиях химической промышленности без транспортировки на значительные расстояния. Вызов ближайших десятилетий – в создании принципиально новой индустрии и рынка, основанного на массовом безуглеродном производстве водорода, его крупномасштабном хранении и транспортировке на тысячи километров наземным, морским и трубопроводным транспортом. Разработка таких технологий требует решения большого количества научно-технических и инженерных задач, в том числе в сфере безопасности разрабатываемых технологий. Немаловажная роль в этом отводится компьютерному моделированию аварийных ситуаций, связанных с утечками, разливом, воспламенением и детонацией воздушно-водородных смесей. Необходимым требованием для такого моделирования является точное описание термодинамических свойств водорода. Уравнение состояния должно количественно воспроизводить свойства водорода в широком диапазоне параметров: от криогенных температур для описания испарения до температур каталитического горения, от малых плотностей для задач моделирования истечения из сосудов высокого давления в атмосферу до плотностей конденсированного состояния для задач транспортировки криогенного сжиженного водорода и т. д. Еще одним потенциальным полем применения широкодиапазонного УРС водорода является научно-исследовательское обеспечение водородной безопасности ядерной энергетики. Представленное УРС разработано на основе фундаментальных УРС нормального водорода и ортоводорода Личмана и др. [1], которые в настоящее время являются фактически стандартом описания термодинамических свойств водорода от подкритических температур до 1000°K. При построении УРС Личмана и др. [1] особое внимание уделялось описанию критических параметров и кривых равновесия жидкость–пар различных родов водорода. Для расширения УРС в область высоких температур выше 1000°K до 6000°K оно сшивалось с уравнением состояния, построенным на основе вариационной теории возмущений с учетом вклада диссоциации при высоких температурах.

Литература

1. Leachman, J. W. et al. [Text] // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 2009. – 38, 721–748.

**EQUATION OF STATE OF HYDROGEN
FOR POWER ENGINEERING**

A. V. Karavaev, V. V. Dryomov, E. E. Mironova

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

E-mail: a.v.karavayev@vniitf.ru

Hydrogen economy is a vision of the future for global economy where hydrogen becomes a new global energy carrier and starts to play the role comparable with that of traditional hydrocarbon power sources. Currently hydrogen is produced mainly from hydrocarbons and used in chemical industry without long-distance transportation. The challenge of next decades is to build fundamentally new industry and market based on carbon-free mass production of hydrogen, its large-scale storage, and surface, sea and pipeline transportation for thousands kilometers. In order to develop these technologies, it is necessary to solve a lot of scientific and engineering problems including technological safety. No small part here is given to computer simulation of emergencies with leakage, spill, ignition, and detonation of hydrogen-aerial mixtures. Such computer studies require an accurate description of the thermodynamic properties of hydrogen. Its equation of state needs to be able to reproduce its properties in a wide range of parameters: from cryogenic temperatures for evaporation to the temperatures of catalytic combustion, from small densities for modeling leakage from high-pressure tanks to condensed-state densities for modeling liquefied cryogenic hydrogen transportation, etc. Another potential realm for the use of hydrogen wide-range equations of state is scientific research aimed at hydrogen safety in nuclear power. The equation of state (EOS) we are presenting is based on the fundamental EOSs developed by Leachman et al. [1] for normal hydrogen and ortho-hydrogen. In fact, these EOSs are now a standard for the description of the thermodynamic properties of hydrogen from subcritical temperatures up to 1000°K. Leachman et al [1] gave special attention to the description of critical parameters and liquid-vapor equilibrium curves for hydrogen of different kinds. For extension to the region of high temperatures above 1000°K to 6000°K, the EOSs were coupled to an equation of state derived from variational perturbation theory with account for dissociation at high temperatures.

References

1. Leachman, J. W. et al. [Text] // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 2009. – 38, 721–748.

4-20

**СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ КРИПА
ПРЕДЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ
ТВЕРДЫХ ОБРАЗЦОВ**

Ф. Х. Каримов, Н. Г. Саломов

Институт геологии, сейсмостойкого строительства
и сейсмологии Национальной академии наук
Таджикистана, Душанбе, Таджикистан

Приводятся результаты наблюдений над деформациями образцов твердых тел за период с сентября 2009 г. до июня 2021 г., подверженных действию предельно высоких, постоянно действующих механических одноосных давлений 70–100 кг/см², когда образцы находятся в состоянии крипа в активной стадии разрушения. Образцы изолированы от микросейсм с помощью специальных демпферов и обеспечена стабилизация температурного режима наблюдений в пределах 1–2°С. Для измерения деформаций применялся специальный метод регистрации импульсов скачков деформаций, преобразующихся в электромагнитные сигналы на основе применения высокочувствительной установки. На фоне долговременного, монотонного тренда, отражающего процесс постоянного разрушения образцов, обнаружены повторяющиеся с интервалами около 4-х лет чередования роста и замедления скорости крипа, которые, по-видимому, происходят из-за постоянного уменьшения числа межатомных связей при разрушении образцов. Волнообразный характер ускорений и замедлений скорости крипа относительно трендовой линии, показывает, что разрушение происходит неравномерно, волнами наступления и отступления, которые, по-видимому, представляют собой деформационные волны. Обнаружены сезонные, годовые вариации скорости деформаций, которые коррелируются с соответствующим ходом изменений атмосферного давления и температуры окружающей среды во времени. Для оценки влияния термонапряжений, действующих в результате различий в коэффициентах линейного температурного расширения образцов и стального пресса, были приняты характерные значения 10⁻⁵/°С, и для модуля упругости – 5 · 10⁻⁵ кг/см². Оценки показали, что годовые изменения температуры с амплитудой 1°С могут приводить к вариациям одноосных давлений, действующих на предельно напряженные образцы, равные 1 кг/см² по порядку величины и превосходящие на 2 порядка годовые вариации атмосферного давления.

**SEASONAL CREEP VARIATIONS
OF EXTREMELY STRESSED SOLID SAMPLES**

F. H. Karimov, N. G. Salomov

Institute of Geology, Earthquake Engineering and Seismology
National Academy of Sciences of Tajikistan,
Dushanbe, Tajikistan

The results of observations on solid samples' deformations for the period from September 2009 to June 2021, exposed to extremely high permanent mechanical uniaxial pressures of 70–100 kg/cm², when the samples are in a

state of creep in the active stage of fracture, are presented. The samples are isolated from microseisms by means of special dampers, and the temperature regime of observations is stabilized within the range of 1–2°C. To measure the deformations, a special method was used to register deformation jump pulses, which are converted into electromagnetic signals, based on the use of a highly sensitive installation. Against the background of a long-term, monotonic trend, reflecting the process of permanent destruction of the samples, the growth and deceleration of the creep rate, which are repeated at intervals of about 4 years, are found, which, apparently, are due to a constant decrease in the number of interatomic bonds during the destruction of the samples. The wavelike nature of the acceleration and deceleration of the creep velocity relative to the trend line shows that the destruction occurs unevenly, by waves of advance and retreat, which, perhaps, are the deformation waves. Seasonal, annual variations in the rate of deformations were found, which correlate with the corresponding course of changes in atmospheric pressure and ambient temperature over time. To assess the influence of thermal stresses, acting as a result of differences in the coefficients of linear thermal expansion of the samples and the steel press, the characteristic values were taken to be $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, and for the elastic modulus – $5 \cdot 10^{-5} \text{ kg/cm}^2$. Estimates have shown that annual temperature variations with an amplitude of 1°C can lead to variations in uniaxial pressures acting on extremely stressed samples, equal to 1 kg/cm^2 in order of magnitude and exceeding by 2 orders of magnitude the annual variations in atmospheric pressure.

учитывать процесс перераспределения энергии, выделяющейся на фронте фазового перехода, то есть правильно описывать теплопроводность. В металлических системах определяющую роль в процессах теплопереноса играет электронная подсистема, в то время как ионная теплопроводность может быть в несколько раз меньше электронной. В стандартном виде КМД моделирует только ионную подсистему. Для учета обмена энергией между ионной и электронной подсистемами и вклада электронов в теплопроводность в настоящей работе применяется двухтемпературная модель (Two-Temperature Model – TTM). На основе экспериментальных данных и моделирования теплового потока при установлении температурного градиента в однофазных кристаллических и жидких системах выполнена параметризация TTM для исследуемых материалов. В дальнейшем изучалось влияние учета электронов на скорость плавления/кристаллизации в двухфазных системах. Для этого моделировалось движение границы кристалл–жидкость при различных степенях перегрева/переохлаждения систем, при повышенном и пониженном давлении с различными кристаллографическими ориентациями твердой фазы относительно фронта кристаллизации. Такие расчеты были выполнены как в стандартной КМД, так и в рамках TTM. Расчеты показали, что учет вклада электронной подсистемы в теплоперенос приводит к изменению профиля температуры на фронте кристаллизации за счет более эффективного оттока выделяющейся при кристаллизации теплоты. Это в свою очередь приводит к уменьшению в несколько раз скорости кристаллизации при одинаковых степенях переохлаждения системы.

4-21

**ВЛИЯНИЕ
ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
НА КИНЕТИКУ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ:
АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Р. М. Кичигин^{1,2}, П. В. Чирков¹,
В. В. Дрёмов¹, А. В. Караваев^{1,2}

¹Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. акад. Е. И. Забахина,
Снежинск, Россия

²Снежинский физико-технический институт
Национального исследовательского ядерного университета
«МИФИ», Снежинск, Россия
E-mail: a.v.karavayev@vniitf.ru

С помощью неравновесной классической молекулярной динамики (КМД) исследуются закономерности движения межфазной границы кристалл–жидкость при плавлении/кристаллизации ОЦК железа, ОЦК титана и модельной аустенитной стали (Fe-14.5Ni-19Cr). Негомогенные плавление/кристаллизация происходят с выделением/поглощением на фронте значительной по величине скрытой теплоты фазового перехода. При КМД моделировании кинетики плавления/кристаллизации необходимо правильно

**EFFECT OF ELECTRONIC HEAT TRANSFER ON
CRYSTALLIZATION KINETICS:
ATOMISTIC STUDY**

R. M. Kichigin^{1,2}, P. V. Chirkov¹,
V. V. Dryomov¹, A. V. Karavaev^{1,2}

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

²Snezhinsk Institute of Physics and Technology National
Research Nuclear University «MEPhI», Snezhinsk, Russia
E-mail: a.v.karavayev@vniitf.ru

Nonequilibrium classical molecular dynamics (CMD) is used to study the motion of the crystal-liquid interphase boundary during melting/crystallization of BCC iron, BCC titanium, and model austenitic steel (Fe-14.5Ni-19Cr). Inhomogeneous melting/crystallization occur with release/absorption of significant latent heat on the front of the phase transitions. CMD simulation of melting/crystallization kinetics requires proper account for the redistribution of the released energy, i.e., an adequate description of heat transfer. In metal systems, electronic heat transfer can be several times higher than ionic heat transfer. Standardly, CMD simulates only the ionic subsystem. A Two-Temperature Model (TTM) was used here to account for energy exchange between ionic and electronic

subsystems, and electronic heat transfer. Its parametrization for materials under study is based on experimental data and results of heat flow simulation for the established temperature gradients in single-phase crystal and liquid systems. The effect of the accounting for electronic heat transfer on the melting/crystallization rate in two-phase systems was studied. For this purpose we simulated the motion of the crystal-liquid boundary at different degrees of system overheating/overcooling, at elevated and reduced pressures for different crystallographic orientations of the solid phase relative to the crystallization front. These simulations were done both within standard CMD, and within the TTM. Their results suggest that account for electronic heat transfer changes the temperature profile on the crystallization front due to the more effective sink of crystallization heat, which, in turn, increases by several times the rate of crystallization at equal degrees of overall system overcooling.

4-22

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ
ДЕФОРМАЦИИ СПЛОШНЫХ
И ОБЪЕМНО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ
НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ
ПО АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ,
В ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ 10^2 – 10^3 С⁻¹**

А. Ю. Гармашев, Е. Б. Смирнов, Е. А. Петухов,
А. И. Клёнов, К. С. Сидоров, М. А. Шистириков,
Д. Т. Юсупов, З. И. Завьялов, А. А. Борцов

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: vniitf@vniitf.ru

В настоящей работе приведены результаты исследований динамических свойств образцов нержавеющей стали, полученной с помощью аддитивной технологии – методом 3D-печати. Исследовались образцы, как со сплошной однородной, так и с объемно-периодической структурой. Эксперименты по нагружению проведены на установке метода составных стержней Гопкинсона (ССГ). Метод ССГ позволяет проводить испытания широкого круга материалов, исследовать динамические диаграммы сжатия и растяжения в диапазоне скоростей деформации $\varepsilon=10^2$ – 10^3 с⁻¹.

Цель работы: исследование динамических свойств образцов, изготовленных по методу аддитивных технологий.

Задача: получение и анализ экспериментальных результатов, полученных в результате проведения серии экспериментов на установке ССГ с образцами 3-D нержавеющей стали, имеющими сплошную и объемно-периодическую структуру.

Образцы из нержавеющей стали (аналог 12X18H10T), как сплошные, так и объемно-периодические были изготовлены методом лазерного спекания металлического порошка (Selective Laser Sintering) на промышленном 3-D принтере.

В ходе исследований проведено более 50 экспериментов с образцами из нержавеющей стали. В работе получены диаграммы напряжение-деформация и скорость деформации-деформация в диапазоне скоростей ударника от 7 до 14 м/с, при этом собственные скорости деформации образцов составили от $0,75 \times 10^3$ до $2,8 \times 10^3$ 1/с. Проведен сравнительный анализ результатов исследования образцов, изготовленных с помощью аддитивных технологий, с данными стали, изготовленной традиционным способом, представлены направления дальнейших исследований.

**HIGH STRAIN RATES OF STAINLESS-STEEL
SOLID AND VOLUME-PERIODIC SPECIMENS
MANUFACTURED USING ADDITIVE
TECHNOLOGY OVER RATE
RANGE 10^2 – 10^3 SEC⁻¹**

A. Yu. Garmashev, E. B. Smirnov, E. A. Petukhov,
A. I. Klenov, K. S. Sidorov, M. A. Shistirikov,
D. T. Yusupov, Z. I. Zavialov, A. A. Bortsov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: vniitf@vniitf.ru

This study presents the research results of dynamic behavior of stainless steel specimens manufactured using additive technology, i.e. 3D-printing. The specimens having both solid structure and also volume-periodic structure are the subject of this study. Experiments on loading were conducted using Hopkinson bar (SHPB) set-up. SHPB method allows performing structural tests on wide range of materials and studying stress-strain dynamic curves over the strain rate range $\varepsilon=10^2$ – 10^3 c⁻¹.

Goals and objectives: investigations into dynamic behavior of stainless-steel specimens manufactured using additive technology; collection and analysis of data from a set of experiments on the SHPB-method set-up with 3D stainless-steel specimens having both solid and volume-periodic structure.

Stainless-steel specimens (analogue of 12Cr18Ni10Ti), both solid and volume-periodic, were manufactured by Selective Laser Sintering using an industrial 3D printer.

The study included more than 50 experiments fulfilled with specimens made of AM-stainless steel. We obtained stress-strain and strain rate-strain curves over the striker velocity range 7-14 m/sec, at this proper strain rates of the specimens ranged from $0,75 \times 10^3$ to $2,8 \times 10^3$ 1/c. A comparative analysis was carried out between the research results for the specimens manufactured using additive technologies and the data of the steel manufactured using conventional methods. Directions for future research are outlined.

4-23

МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

В. С. Красников, А. Е. Майер, В. В. Погорелко,
Е. В. Фомин, Д. С. Воронин, Ф. Т. Латыпов,
П. А. Безбородова, А. А. Эбель

Челябинский государственный университет,
Челябинск, Россия

Прочность алюминиевых сплавов во многом определяется наноразмерными упрочняющими включениями легирующих элементов. Для анализа механизмов упрочнения проведено многомасштабное исследование влияния таких включений на напряжение течения сплава при динамическом деформировании. С помощью атомистического моделирования проводилось исследование взаимодействия дислокаций и различных упрочняющих фаз в системе алюминий–медь и алюминий–медь–магний. Далее полученные данные использовались для построения и калибровки континуальных моделей взаимодействия дислокации и включений. На третьем этапе полученные модели использовались в 2-мерной дискретной дислокационной динамике для построения кривых напряжение–деформация репрезентативного объема сплава.

Результаты моделирования демонстрируют хорошее согласие по величине напряжения течения и коэффициенту термического разупрочнения с экспериментальными результатами для алюминиевых сплавов, деформируемых в динамическом режиме. Предсказано снижение сопротивления скольжению дислокаций со стороны упрочняющих фаз вследствие их разрушения во время продолжительной пластической деформации.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-71-10038.

MULTISCALE MODELING OF THE DYNAMIC PLASTICITY OF ALUMINUM ALLOYS

V. S. Krasnikov, A. E. Mayer, V. V. Pogorelko,
E. V. Fomin, D. S. Voronin, F. T. Latypov,
P. A. Bezborodova, A. A. Ebel

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

The strength of aluminum alloys is largely determined by nanoscale hardening inclusions of alloying elements. To analyze the hardening mechanisms, a multiscale study of the influence of such inclusions on the flow stress of the alloy during dynamic deformation was carried out. Atomistic modeling was used to study the interaction of dislocations and various hardening phases in the aluminum–copper and aluminum–copper–magnesium systems. Further, the data obtained were used to construct and calibrate continuous models of the interaction between dislocations and inclusions. At the third stage, the resulting models were used in 2D–discrete dislocation dynamics to plot stress–strain curves of a representative alloy volume.

The simulation results demonstrate good agreement in the magnitude of the flow stress and the coefficient of thermal softening with the experimental results for aluminum alloys deformed in the dynamic mode. A decrease in the resistance to sliding of dislocations from the side of the strengthening phases due to their destruction during prolonged plastic deformation is predicted.

This work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 18-71-10038.

4-24

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭКСТРУЗИИ МАТЕРИАЛОВ ЧЕРЕЗ МАТРИЦУ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ

П. А. Кузнецов, А. П. Яловец

Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет),
Челябинск, Россия

E-mail: ialovetcap@susu.ru, kuznetcovpa@susu.ru

В работе представлена математическая модель динамической экструзии материалов. Выдавливание материалов под действием высоких нагрузок через матрицу сложной геометрии позволяет получить материалы с новыми прочностными характеристиками [1]. Представленная модель включает дифференциальные уравнения механики сплошных сред (МСС) в цилиндрическом осесимметричном случае в лагранжевых координатах, уравнения состояния выдавливаемых образцов, модель пластичности Прандтля–Рейса и модель упрочнения материала [2]. Модель учитывает эффекты, связанные с взаимодействием образца и матрицы: трение, нагрев, а также деформацию матрицы. Было проведено компьютерное моделирование динамической экструзии Al-6061 и Cu (OFHC) через коническую матрицу с коэффициентом редукции, равным 9. Расчеты были проведены при помощи программного комплекса, разработанного авторами. В основе комплекса заложен полуаналитический численный метод решения задач МСС [3]. Представлены температурные поля и поля напряжений в образцах после их выдавливания в канал узкого сечения. Исследована зависимость упрочнения образца от угла конусности матрицы (10–30°).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Челябинской области в рамках научного проекта № 20-41-740006.

Литература

1. Polyakov, A. P. Dynamic powder compaction processes [Text] // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2018. – Iss. 2. – P. 42–82.
2. Zerilli, F. J. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations / F. J. Zerilli, R. W. Armstrong [Text] // Journal of Applied Physics. – 1987. – 61(5). – P. 1816–1825.

3. Яловец, А. П. Расчет течений среды при воздействии интенсивных потоков заряженных частиц [Текст] // Прикладная механика и техническая физика. – 1997. – № 1. – С. 151–166.

**MODELING THE DYNAMIC EXTRUSION
PROCESS OF MATERIALS THROUGH A DIE
WITH COMPLEX GEOMETRY**

P. A. Kuznetsov, A. P. Yalovets

South Ural State University (National Research University),
Chelyabinsk, Russia

E-mail: ialovetcap@susu.ru, kuznetcovpa@susu.ru

The paper presents a mathematical model of dynamic extrusion of materials. Extrusion of materials under high loads through a die of complex geometry makes it possible to obtain materials with new strength characteristics [1]. The presented model includes differential equations of continuum mechanics in the cylindrical axisymmetric case in Lagrangian coordinates, equations of state for extruded substances, Prandtl–Reuss plasticity model and a model of material hardening [2]. The model takes into account the effects associated with the interaction of the sample and the die: friction, heating, and deformation of the die. A computer simulation of the dynamic extrusion of Al-6061 and Cu (OFHC) through a conical die with a reduction ratio of 9 was carried out. The calculations were carried out using a software package developed by the authors. The complex is based on a semi-analytical numerical method for solving problems in continuum mechanics [3]. Temperature and stress fields in the samples after their extrusion into a narrow-section channel are presented. The dependence of the hardening of the sample on the taper angle of the matrix (10–30°) has been investigated.

The work was funded by RFBR and Chelyabinsk Region, project number 20-41-740006.

References

1. Polyakov, A. P. Dynamic powder compaction processes [Text] // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2018. – Iss. 2. – P. 42–82.
2. Zerilli, F. J. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations / F. J. Zerilli, R. W. Armstrong [Text] // Journal of Applied Physics. – 1987. – 61(5). – P. 1816–1825.
3. Yalovets, A. P. Calculation of flows of a medium induced by high-power beams of charged particles [Text] // Journal of applied mechanics and technical physics. – 1997. – Iss. 1. – P. 137–150.

4-25

**ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ
ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ
В РАБОТАХ ИПХФ РАН**

И. В. Ломоносов

ФГБУН «Институт проблем химической физики РАН»,
Черноголовка, Россия

E-mail: director@icp.ac.ru

Приводится обзор результатов работ, выполненных ИПХФ РАН в рамках крупных проектов в области химической физики экстремальных состояний вещества. Излагаются вопросы разработки взрывных генераторов высоких давлений, исследований свойств веществ при однократном и многоступенчатом ударном сжатии. Обсуждаются новые экспериментальные данные в сопоставлении с результатами теоретических расчетов.

**STUDIES OF THE PROPERTIES
OF SUBSTANCES UNDER EXTREME
CONDITIONS IN THE WORKS OF THE IPCP RAS**

I. V. Lomonosov

Institute of Problems of Chemical Physics RAS,
Chernogolovka, Russia

E-mail: director@icp.ac.ru

An overview of the results of the work carried out by the IPCP RAS within the framework of big projects in the field of chemical physics of extreme states of matter is given. The issues of the development of high-pressure explosive generators, studies of the properties of substances under conditions of single and multi-step shock compression are presented. New experimental data are discussed in comparison with the results of theoretical calculations.

4-26

**РАСЧЕТЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ В ОКРЕСТНОСТИ
КРИВЫХ ПЛАВЛЕНИЯ И ИСПАРЕНИЯ
С ПОМОЩЬЮ КВАНТОВОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ
ДИНАМИКИ**

Д. В. Минаков¹, М. А. Парамонов^{1,2}, П. Р. Левашов¹

¹Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

²Московский физико-технический институт
(Государственный университет), Москва, Россия

E-mail: minakovd@ihed.ras.ru

Высокотемпературные уравнения состояния жидких металлов традиционно важны для металлургии, астрофизики, планетарной физики, исследований управляемого термоядерного синтеза и инженерии.

Вместе с тем появляются и новые многообещающие приложения, связанные с альтернативной энергетикой, импульсными и лазерными технологиями, а также разработкой новых материалов.

Однако, несмотря на научную и прикладную значимость, свойства металлов в жидком состоянии, за некоторыми исключениями, все еще не так хорошо известны, как свойства металлов в твердой фазе.

В данной работе мы представляем обширное первопринципное исследование термодинамических свойств некоторых металлов в окрестности плавления, а также в околокритической области. Наши расчеты с помощью метода квантовой молекулярной динамики успешно описывают результаты экспериментов для W, Mo, Zr, Pb и ряда других металлов в области нагретого расширенного вещества.

Мы предоставляем наши оценки критических параметров для W, Mo, Zr и Pb, основанные на квантовом молекулярно-динамическом расчете сверхкритических изотерм. Для рассматриваемых металлов мы восстановили критическую изобару, а также выполнили расчеты изохорной и изобарной теплоемкости, коэффициента Грюнайзена и скорости звука вплоть до критической точки. В наших расчетах наблюдается значительный рост изохорной и изобарной теплоемкостей вдоль критической изобары при приближении к критической точке. Вместе с тем параметр Грюнайзена заметно уменьшается вдоль критической изобары и в критической точке достигает значения, которое намного ниже предела для идеального газа $\gamma = 2/3$.

Данная работа была поддержана Российским Научным Фондом (грант № 20-79-10398).

**CALCULATIONS OF THERMOPHYSICAL
PROPERTIES OF METALS
IN THE VICINITY OF MELTING
AND LIQUID-GAS COEXISTENCE CURVES
BY QUANTUM MOLECULAR DYNAMICS**

D. V. Minakov¹, M. A. Paramonov^{1,2}, P. R. Levashov¹

¹Joint Institute for High Temperatures of RAS, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology
(State University), Moscow, Russia

E-mail: minakovd@ihed.ras.ru

High-temperature equations of state (EOSs) of liquid metals are traditionally of interest to the fields of metallurgy, astrophysics, planetary physics, controlled thermonuclear fusion research, and engineering. There are also promising new applications emerging related to alternative power engineering, impulse technologies, and the development of new materials. However, despite their scientific and industrial importance, the properties of metals in a liquid state, with few exceptions, are still not as widely known as those of crystalline metals.

In this work, we present comprehensive first-principle study of thermodynamic properties of several metals in the vicinity of melting and in the near-critical region as well. We demonstrate that quantum molecular dynamics calculations can successfully describe experiments for hot expanded W, Mo, Zr, Pb, and some other metals.

We provide the first ab initio estimates of the critical parameters of W, Mo, Zr, and Pb based on quantum molecular dynamics calculations of supercritical isotherms. We also present isochoric and isobaric heat capacity, the Grüneisen coefficient, the critical isobar and the speed of sound in the liquid metals up to the critical point. A significant growth of isochoric and isobaric heat capacities along the critical isobar while approaching the critical point is observed in our calculations. On the other hand, the Grüneisen parameter noticeably decreases along the critical isobar and reaches the value at the critical point that is much lower than the ideal gas limit of $\gamma = 2/3$.

The work has been supported by the Russian Science Foundation (grant No. 20-79-10398).

4-27

**ШИРОКОДИАПАЗОННОЕ МНОГОФАЗНОЕ
УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ПЛАТИНЫ**

В. Н. Михайлов, В. М. Елькин,
А. А. Овечкин, Н. А. Смирнов

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: v.n.mikhaylov@vniitf.ru

В данной работе представлено полуэмпирическое широкодиапазонное уравнение состояния платины с учетом плавления, испарения и ионизации, построенное на основе широкого спектра экспериментальных и расчетных данных. Для подбора параметров УРС использовался генетический алгоритм, хорошо зарекомендовавший себя при оптимизации в случае большого количества данных. При построении УРС в областях, где отсутствуют какие-либо экспериментальные данные, для оптимизации параметров использовались результаты расчетов из первых принципов, а также расчеты по модели среднего атома. На основе разработанного УРС определены кривая плавления платины до давлений выше 1 ТПа, изменение скоростей звука на ударной адиабате, параметры плавления металла при ударно-волновом сжатии и оценка критической точки.

**A WIDE-RANGE MULTIPHASE EQUATION
OF STATE FOR PLATINUM**

V. N. Mikhaylov, V. M. El'kin,
A. A. Ovechkin, N. A. Smirnov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

E-mail: v.n.mikhaylov@vniitf.ru

The work presents a semi-empirical wide-range EOS for Pt considering melting, evaporation, and ionization, based on a wide spectrum of experimental and calcula-

tion data. In the regions where no experimental data were available, we used data from first-principles and average-atom model calculations. The EOS was used to calculate the melting curve of platinum to pressure above 1 TPa, sound speeds along the shock Hugoniot, parameters of melting under shock compression, and the critical point.

4-28

МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАДРОМОРФНОЙ ТЕКСТУРЫ МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК

Р. Ф. Муфтахетдинова, В. И. Гроховский, Г. А. Яковлев

Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

E-mail: gizrozka91@bk.ru

После падения метеорита Челябинск стало понятно насколько уязвима человеческая жизнь перед столкновениями с космическими объектами. Изучение этого события помогает нам лучше понять, как развивать технологии для защиты Земли. Степень угрозы зависит от того, как метеороид разрушается в атмосфере Земли. Для прогнозирования фрагментации важно изучить структурные особенности и механические свойства таких тел. В данной работе провели модельные эксперименты по воссозданию текстуры Челябинского метеороида. Это даст более четкое представление о причинах фрагментации при входе в атмосферу Земли. Проведен сравнительный анализ текстуры брекчии больших образцов с различными структурными зонами, образовавшиеся после ударного эксперимента. Показано, что во время эксперимента со сферически сходящимися ударными волнами, выполненного с использованием исходного вещества Челябинского метеорита со светлой литологией, был реализован градиент Р-Т условий, в результате чего в образце сформировались темная литология, смешанная литология и ударный расплав, что дало нам уникальное представление о сложной структуре астероидов в диапазоне размеров декаметра.

MODELING OF QUADROMORPHIC TEXTURE OF THE CHELYABINSK METEORITE

R. F. Muftakhetdinova, V. I. Grokhovsky, G. A. Yakovlev

Ural Federal University named after the first President
of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

E-mail: gizrozka91@bk.ru

After the fall of the Chelyabinsk meteorite, it became clear how vulnerable human life is to collisions with space objects. Studying this event helps us better understand how to develop technologies to protect the Earth. The degree of threat depends on how the meteoroid is destroyed in the Earth's atmosphere. To predict fragmentation, it is important to study the structural features and mechanical properties of such bodies. In this work, we carried out model experiments to recreate the texture of the Chelyabinsk meteoroid. This will provide a clearer understanding of the

causes of fragmentation when entering the Earth's atmosphere. A comparative analysis of the texture of breccias of large samples with different structural zones, formed after the impact experiment, has been carried out. It is shown that during the experiment with spherically converging shock waves, performed using the initial material of the Chelyabinsk meteorite with light lithology, a gradient of PT conditions was realized, as a result of which dark lithology, mixed lithology and shock melt were formed in the sample, which gave us a unique idea of the complex structure of asteroids in the range of decameter sizes.

4-29

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПОЛИКАРБОНАТА МАРКИ ПК-ЭТ-3,5 ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

М. С. Мытарев, А. В. Павленко, С. Н. Малюгина,
А. С. Майорова, Д. Н. Казаков, С. С. Мокрушин

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: www.dep5@vniitf.ru

В составе конструкций, которые потенциально могут быть подвержены ударному или взрывному воздействию, используются различные пластмассы. В данной работе представлены результаты исследований поликарбоната марки ПК-ЭТ-3,5, который производится в РФЯЦ – ВНИИТФ.

Проведено изучение таких динамических свойств поликарбоната марки ПК-ЭТ-3,5, как откольная прочность при скоростях деформации растяжения от 10^4 до 10^5 с⁻¹ и коэффициент вязкости при скоростях деформации сжатия от 10^6 до $3,6 \cdot 10^7$ с⁻¹. Давления ударного сжатия составляли от 0,39 до 2,69 ГПа. Исследования проведены на легкогазовой пушке [1], скорость ударника варьировали от 194 до 841 м/с. Скорость соударения, его плоскостность контролировали с помощью электроконтактных датчиков (ЭКД). Данные по поведению материала при прохождении по нему ударных волн сжатия, волн разрежения, при его разрушении зарегистрированы с помощью интерферометрических комплексов VISAR [2] и PDV [3].

В ходе наших исследований была рассмотрена вязкость материалов. Параметр вязкости играет существенную роль при высокоскоростной деформации. Полученные результаты указывают на значительное отклонение в соотношении Свегла–Грейди, которое выполняется для большого спектра материалов, как металлов, так и неметаллов. Данное соотношение устанавливает биквадратную связь между скоростью сжатия и ударным давлением [4]. Для поликарбоната ПК-ЭТ-3,5 это оказалось несправедливо.

Откольная прочность поликарбоната в рассматриваемом диапазоне скоростей деформации растяжения не зависит ни от материала ударника, ни от скорости деформации.

В результате экспериментов в поликарбонате ПК-ЭТ-3,5 наблюдается значительное изменение скоростей звука под воздействием ударных волн.

Литература

1. **Павленко, А. В.** Одноступенчатая газовая пушка для изучения динамических свойств конструкционных материалов в диапазоне до 40 ГПа [Текст] / А. В. Павленко, С. И. Балабин, О. Е. Козелков, Д. Н. Казаков // Приборы и техника эксперимента. – 2013. – № 4. – С. 122–124.
2. **Пат. № 2638582 Российская Федерация, МПК G01B 9/02 (2006.01).** Двухканальная интерферометрическая система для исследования ударно-волновых процессов [Текст] / Малюгина С. Н., Павленко А. В.; заявитель РФЯЦ – ВНИИТФ. – № 2016139954; заявл. 10.10.2016; опубл. 14.12.2017. – 2 с.: ил.
3. **Мокрушин, С. С.** Интерферометр с частотно-временным уплотнением для исследования свойств материалов в ударно-волновых экспериментах [Текст] / С. С. Мокрушин, Н. Б. Аникин, С. Н. Малюгина и др. // Приборы и техника эксперимента. – 2014. – № 4. – С. 107.
4. **Kanel, G. I.** Shock wave rise time and the viscosity of liquids and solids / G. I. Kanel, A. S. Savinykh, G. V. Garkushin et al. // In: Altenbach H., Goldstein R., Murashkin E. Mechanics for materials and Technologies. Advanced Structured Materials, vol. 46, Springer, Cham.

INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF POLYCARBONATE PK-ET-3,5 UNDER SHOCK IMPACT

M. S. Mytarev, A. V. Pavlenko, S. N. Malyugina,
A. S. Mayorova, D. N. Kazakov, S. S. Mokrushin

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

E-mail: www.dep5@vniitf.ru

Different plastics are used in the constructions, which can be exposed to shock or explosive impact. The work presents the results of investigation of polycarbonate PK-ET-3,5 produced at RFNC – VNIITF.

Such dynamic properties of polycarbonate PK-ET-3,5 as spall strength at tensile deformation rates from 10^4 to 10^5 s⁻¹ and viscosity ratio at compression deformation rates from 10^6 to $3.6 \cdot 10^7$ s⁻¹ were studied. Shock compression pressures varied from 0.39 до 2.69 GPa. The investigation was carried out using light gas gun [1], the velocity of flyer ranged from 194 to 841 m/s. The impact velocity and its flatness were controlled by electrocontact sensors. Interferometric systems VISAR [2] and PDV [3] were applied to record the data on the material response under shock compression waves and rarefaction waves propagating through the material and on the material degradation.

Viscosity of solid materials was studied. The viscosity parameter plays an important role at high-rate deformation. The obtained results show considerable deviation in Swegle–Grady ratio, which is true for a wide range of materials, both for metals and non-metals. This ratio establishes a biquadratic relation between the compression

rate and the shock pressure. For polycarbonate PK-ET-3,5 it was shown to be unfair.

The spall strength of polycarbonate, within the considered range of tensile deformation rates, is independent from the impactor material or the deformation rate.

Considerable change in speeds of sound is observed in the experiments with polycarbonate PK-ET-3,5 under shock impact.

References

1. **Pavlenko, A. V.** One-stage gas gun for investigations of dynamic properties of structural materials in range of pressures up to 40 GPa [Text] / A. V. Pavlenko, S. I. Balabin, O. E. Kozelkov, D. N. Kazakov // Equipment and technics of experiment. – 2013. – No. 4. – P. 122–124.
2. **Patent № 2638582 Russian Federation, МПК G01B 9/02 (2006.01).** Two-way interferometric system for investigations of shock-wave processes [Text] / Malyugina S. N., Pavlenko A. V.; applicant RFNC – VNIITF. – No. 2016139954; applied on October 10, 2016; published on December 14, 2017. – 2 p.: ill.
3. **Mokrushin S. S.** Interferometer with time-and-frequency packaging for investigation of material's properties in shock-wave experiments [Text] / S. S. Mokrushin, N. B. Anikin, S. N. Malyugina et al. // Equipment and technics of experiment. – 2014. – No. 4. – P. 107.
4. **Kanel, G. I.** Shock wave rise time and the viscosity of liquids and solids [Text] / G. I. Kanel, A. S. Savinykh, G. V. Garkushin et al. // In: Altenbach H., Goldstein R., Murashkin E. Mechanics for materials and Technologies. Advanced Structured Materials, vol. 46, Springer, Cham.

4-30

МНОЖЕСТВЕННЫЕ МЕТАСТАБИЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ И МЕХАНИЗМЫ ПЕРЕНОСА ИМПУЛЬСА ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

О. Б. Наймарк

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь,
Россия

Представлены экспериментальные исследования аномальных механизмов переноса импульса в конденсированных средах обнаруживающих множественные метастабильные состояния, индуцированные дефектами (defect induced gaped momentum states). Показана связь метастабильных состояний, специального типа критических явлений в средах с дефектами – структурно-скейлинговыми переходами с аномалиями вязкости в твердых телах и жидкостях при интенсивных (динамических и ударно-волновых) воздействиях. Возможность реализации данных механизмов, в том числе в процессах турбулентности, была обоснована в [1–3]. Установленные закономерности критичности в поведении конденсированных сред с мезоскопическими дефектами позволили исследовать термодинамику и кинетику распада мно-

жественных переходных «жидкость–твердое тело» метастабильных состояний, предложить объяснение аномальных механизмов переноса импульса в системах с «сильным взаимодействием». Аномальные механизмы переноса импульса связаны с подчинением динамики конденсированных сред установленным типам коллективных мод в ансамблях дефектов (брисеров, автосолитонов, диссипативных структур обострения), имеющих природу автомодельных решений. Подчинение динамики коллективным модам сопровождается резким увеличением эффективных времен релаксации и аномалиями поглощения. Теоретические результаты подтверждены экспериментальными данными по наблюдению автомодельных (квазипластических) фронтов в жидкостях и достижением асимптотики вязкости при инициированию волн разрушения при ударно-волновом нагружении плавленного кварца [4, 5].

Литература

1. **Naimark, O. B.** Defect-Induced Instabilities in Condensed Media [Text] // JETP Lett. – 1998. – Vol. 67, No. 9. – P. 751–757.
2. **Naimark, O. B.** Nonequilibrium Structure Transitions as a Mechanism of Turbulence [Text] // Pisma Zh. Tekh. Fiz. – 1997. – Vol. 23, No. 13. – P. 81–87.
3. **Naimark, O. B.** Defect Induced Transitions as Mechanisms of Plasticity and Failure in Multifield Continua [Text] / ed. G. Capriz and P. Mariano // In: Advances in Multifield Theories of Continua with Substructure, Birkhäuser, Boston. – 2004. – P. 75–114.
4. **Naimark, O. B.** Collective Properties of Defect Ensembles and Some Nonlinear Problems of Plasticity, Fracture and Turbulence [Text] // Phys. Mesomech. – 2003. – Vol. 6, No. 4. – P. 39–63.
5. **Naimark, O. B.** Structural-Scale Transitions in Solids with Defects and Symmetry Aspects of Field Theory [Text] // Phys. Mesomech. – 2010. – Vol. 13pp., No. 5–6. – P. 306–317.

MULTIPLE METASTABLE STATES IN CONDENSED MATTER AND MOMENTUM TRANSFER MECHANISMS UNDER INTENSIVE LOADING

O. B. Naimark

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS,
Perm, Russia

Experimental studies of anomalous momentum transfer mechanisms in condensed matter exhibiting multiple defect-induced gaped momentum states are presented. A connection is shown between metastable states, a special type of critical phenomena in media with defects – structural-scaling transitions with viscosity anomalies in solids and liquids under intense (dynamic and shock-wave) loading. The possibility of these mechanisms, including in turbulence, was substantiated in [1–3]. The established regularities of criticality in the behavior of condensed media with mesoscopic defects made it possible to study the thermodynamics and kinetics of the decay of multiple transition in liquid and solid metastable states, to propose an explanation of the anomalous mechanisms of momentum transfer in systems with

“strong interaction”. Anomalous momentum transfer mechanisms are associated with the subordination of the dynamics of condensed matter to the established types of collective modes in ensembles of defects (breathers, autosolitons, dissipative sharpening structures) having the nature of self-similar solutions. The subordination of dynamics to collective modes is accompanied by a sharp increase in effective relaxation times and absorption anomalies. The theoretical results are confirmed by experimental data on the observation of self-similar (quasi-plastic) fronts in liquids and the attainment of viscosity asymptotics upon initiation of fracture waves under shock-wave loading of fused quartz [4, 5].

References

1. **Naimark, O. B.** Defect-Induced Instabilities in Condensed Media [Text] // JETP Lett. – 1998. – Vol. 67, No. 9. – P. 751–757.
2. **Naimark, O. B.** Nonequilibrium Structure Transitions as a Mechanism of Turbulence [Text] // Pisma Zh. Tekh. Fiz. – 1997. – Vol. 23, No. 13. – P. 81–87.
3. **Naimark, O. B.** Defect Induced Transitions as Mechanisms of Plasticity and Failure in Multifield Continua [Text] / ed. G. Capriz and P. Mariano // In: Advances in Multifield Theories of Continua with Substructure, Birkhäuser, Boston. – 2004. – P. 75–114.
4. **Naimark, O. B.** Collective Properties of Defect Ensembles and Some Nonlinear Problems of Plasticity, Fracture and Turbulence [Text] // Phys. Mesomech. – 2003. – Vol. 6, No. 4. – P. 39–63.
5. **Naimark, O. B.** Structural-Scale Transitions in Solids with Defects and Symmetry Aspects of Field Theory [Text] // Phys. Mesomech. – 2010. – Vol. 13pp., No. 5–6. – P. 306–317.

4-31

СКОРОСТИ ЗВУКА В СВИНЦЕ ПРИ ЕГО ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Д. Г. Панкратов, А. К. Якунин,
А. Г. Попцов, В. Н. Михайлов

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: d.p.kuchko@vniitf.ru

В дополнение к уже имеющимся данным, представлены результаты измерения скоростей звука в ударно-сжатом свинце марки С1 по ГОСТ 3778-98 в диапазоне давлений 0–100 ГПа. Регистрация процессов осуществлялась при помощи фотоэлектрической (индикаторной) методики [1] или лазерно-гетеродинамической методики [2] с реализацией метода догоняющей нагрузки. В исследуемом диапазоне напряжений (давлений) согласно полученным экспериментальным данным материал претерпевает ударно-волновое плавление в диапазоне от 46 до 64 ГПа. Результаты расчетно-теоретического моделирования указывают на ударно-волновое плавление свинца в диапазоне 52–71 ГПа.

Литература

1. **McQueen, R. G.** Optical technique for determining rarefaction wave velocities at very high pressures [Text] / R. G. McQueen, J. W. Hopson, L. N. Fritz // *Rev. Sci. Instrum.* – 1982. – V. 53, No. 2. – P. 245-250.
2. **Strand, O. T.** Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques [Text] / O. T. Strand, D. R. Goosman, C. Martinez, T. L. Whitworth, W. W. Kuhlow // *Review Sci. Instrum.* – 2006. – 77, 083108.

SPEEDS OF SOUND IN LEAD UNDER DYNAMIC LOADING

D. G. Pankratov, A. K. Yakunin,
A. G. Poptsov, V. N. Mikhaylov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

E-mail: d.p.kuchko@vniitf.ru

In addition to the available data, the work presents the results of measuring speeds of sound in shock-compressed lead of C1 grade according to GOST 3778-98 within pressure ranges from 0 to 100 GPa. The processes were recorded using optical analyzer [1] or laser heterodyne [2] techniques along with overtaking unloading method. According to the experimental data obtained within the above pressure range, the material undergoes shock melting within 46 to 64 GPa. The results of theoretical simulation show lead shock melting within 52 to 71 GPa.

References

1. **McQueen, R. G.** Optical technique for determining rarefaction wave velocities at very high pressures [Text] / R. G. McQueen, J. W. Hopson, L. N. Fritz // *Rev. Sci. Instrum.* – 1982. – V. 53, No. 2. – P. 245-250.
2. **Strand, O. T.** Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques [Text] / O. T. Strand, D. R. Goosman, C. Martinez, T. L. Whitworth, W. W. Kuhlow // *Review Sci. Instrum.* – 2006. – 77, 083108.

4-32

**ПЕРВОПРИНЦИПНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ
СВОЙСТВ ЦИРКОНИЯ В ЖИДКОМ
И ОКОЛОКРИТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИЯХ**

М. А. Парамонов^{1,2}, Д. В. Минаков¹,
В. Б. Фокин¹, П. Р. Левашов¹

¹Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

²Московский физико-технический институт
(Государственный университет), Москва, Россия
E-mail: mikhail.a.paramonov@phystech.edu

Знание высокотемпературных теплофизических свойств циркония как одного из основных конструкционных материалов ядерных энергетических устано-

вок крайне необходимо для анализа ядерной безопасности и моделирования поведения атомных реакторов при критических воздействиях. Однако его свойства в жидкой фазе до сих пор известны лишь приблизительно.

В данной работе мы представляем результаты первопринципных расчетов методом квантовой молекулярной динамики (КМД), которые позволили выполнить оценку параметров критической точки циркония и положения кривой сосуществования фаз жидкость–газ. На основе табличного уравнения состояния, полученного в результате КМД расчетов, были также восстановлены зависимости от температуры и плотности вдоль нулевой и критической изобары важных термодинамических производных, в том числе теплоемкости при постоянном объеме и постоянном давлении, коэффициента Грюнаизена, а также выполнен расчет скорости звука. По результатам данной работы отмечено отличное согласие параметров критической точки с работой Мартынюка 1984 года и энтальпии плавления с последними экспериментальными данными по быстрому импульсному нагреву, а также измерениями с помощью капельной калориметрии.

В данной работе впервые на основе первопринципных расчетов с использованием формулы Кубо–Гринвуда были исследованы транспортные и оптические свойства жидкого циркония вплоть до области критической точки. Представлено сравнение полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными в окрестности плавления. Предсказан значительный рост нормальной спектральной излучательной способности Zr для температур выше 4000 К.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Грант № 20-79-10398).

**AB INITIO INVESTIGATION
OF THE HIGH-TEMPERATURE PROPERTIES OF
ZIRCONIUM IN LIQUID
AND NEAR-CRITICAL STATES**

M. A. Paramonov^{1,2}, D. V. Minakov¹,
V. B. Fokin¹, P. R. Levashov¹

¹Joint Institute for High Temperatures of RAS, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology
(State University), Moscow, Russia

E-mail: mikhail.a.paramonov@phystech.edu

Knowledge of high-temperature thermophysical properties of zirconium, as one of the main construction materials of nuclear power plants, is essential for analyzing the nuclear safety and modeling the behavior of atomic reactors under critical impacts. However, its properties in the liquid phase are still only known approximately.

In this work, we present the results of ab initio calculations by the method of quantum molecular dynamics (QMD), which allow us to estimate the critical point parameters of zirconium and the liquid-gas coexistence curve.

The dependences of important thermodynamic derivatives, including C_V and C_P , and the Grüneisen coefficient, on temperature and density along the zero and critical iso-

bars were restored. The sound speed was also calculated. As a result, an excellent agreement of the critical point parameters with estimate by Martynyuk (1984) was noted, and the calculated enthalpy of fusion agrees well with the latest experimental data on rapid pulse heating and measurements using drop calorimetry.

In this work, for the first time the transport and optical properties of liquid zirconium were investigated up to the critical point using ab initio calculations and the Kubo–Greenwood formula. The results obtained are compared with the available experimental data in the vicinity of melting. A significant increase in the normal spectral emissivity of Zr is predicted at temperatures above 4000 K.

Calculations were carried out under financial support of the Russian Science Foundation (Grant No. 20-79-10398).

4-33

ПОСТРОЕНИЕ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ НА ОСНОВАНИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО УДАРНО-ВОЛНОВОМУ НАГРУЖЕНИЮ

Е. В. Пomyкалов, Ю. М. Ковалев

Южно-Уральский государственный университет (НИУ),
Челябинск, Россия

E-mail:boxcutter245@mail.ru

Изучение поведения разнородных материалов в условиях динамической загрузки имеет большое значение для многих областей применения композитов. В настоящее время широкое распространение получили стекло-волоконные [1] и углерод-углеродные композиционные материалы [2], одним из компонентов которых является эпоксидная смола. Поэтому построение уравнений состояния на основе известных экспериментальных данных [1], позволяющих адекватно описывать поведение эпоксидной смолы ударно нагружении является актуальной задачей.

Если в качестве термодинамического потенциала использовать свободную энергию Гельмгольца, то получим уравнение состояния в форме Ми–Грюнайзена

$$P - P_C = \gamma_D(V)\rho(E - U). \quad (1)$$

Здесь P , P_C , $\gamma_D(V)$, V , ρ , E , U – давление, холодная составляющая давления, коэффициент Грюнайзена, удельный объем, плотность, внутренняя энергия, холодная составляющая внутренней энергии соответственно. Экспериментальные данные по ударно-волновому нагружению эпоксидной смолы были представлены в виде [1]

$$D = a + bu = 2,14 + 1,912u, \quad (2)$$

где D , u – скорость ударной волны и массовая скорость соответственно. Для описания холодной составляющей давления и внутренней энергии, воспользуемся выражениями, определенными в работе [3]

$$P_C = 3\rho_0 C_0^2 (x^{-(m+1)} - x^{-(n+1)}), \quad (3)$$

$$U = 3C_0^2 \left(\frac{1}{m} x^{-m} - \frac{1}{n} x^{-n} \right), \quad (4)$$

где C_0 – объемная скорость звука эпоксидной смолы, равная 2,140 км/с, $x = \rho_0/\rho$. Выражение для скорости ударной волны (2) позволяет построить экспериментальную ударную адиабату эпоксидной смолы в виде:

$$P = \rho_0 a^2 (1-x) / (1-b(1-x))^2, \quad (5)$$

а выражения (1), (3), (4) теоретическую ударную адиабату следующим образом:

$$P = (P_C + 2b\rho_0(E_0 - U)) / (1-b(1-x)). \quad (6)$$

Из равенства нулю при $x = 1$ экспериментальных (5) и расчетных (6) значений давления на ударной адиабате следует, что

$$E_0 = U_0 = 3C_0^2 \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{n} \right). \quad (7)$$

Для определения коэффициентов m и n , входящих в теоретическое уравнение состояния, потребуем равенство первой и второй производных по x на экспериментальной (5) и расчетной (6) ударных адиабатах в точке $x = 1$. В результате решения полученной системы уравнений были определены искомые значения коэффициентов: $m = 2,492667$, $n = 2,159334$. Сравнение данных эксперимента [1] с расчетом ударных адиабат (6) показал их хорошее совпадение. Это очень важно поскольку при построении уравнений состояния требуется определить минимальный набор параметров.

Литература

1. Tsai, L. Shock compression behavior of a S2-glass fiber reinforced polymer Composite [Text] / L. Tsai, F. Yuan, V. Prakash, D. P. Dandekar // J. of Applied Phys. – 2009. – Vol. 105. – P. 093526 – 1 – 093526 – 11.
2. Булыгин, М. Г. Влияние структурных неоднородностей углерод-углеродных композиционных материалов тепловой защиты гиперзвуковых летательных аппаратов на разрывы обгарных форм [Текст] / М. Г. Булыгин, Г. Ф. Костин, Н. Н. Тихонов, О. Н. Дементьев, Ю. М. Ковалев, Ш. Ш. Ягафаров // Конструкции из композиционных материалов. – 2004. – № 3. – С. 3–15.
3. Ковалев, Ю. М. Уравнения состояния для описания изотермического сжатия некоторых молекулярных кристаллов нитросоединений [Текст] // Инженерно-физический журнал. – 2020. – Т. 93, № 1. – С. 229–239.

CONSTRUCTION OF THE EQUATION OF STATE OF THE EPOXY RESIN BASED ON EXPERIMENTAL DATA ON SHOCK-WAVE LOADING

E. V. Pomykalov, Yu. M. Kovalev

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail:boxcutter245@mail.ru

The study of the behavior of dissimilar materials under dynamic loading conditions is of great importance for

many fields of application of composites. Currently, glass fiber [1] and carbon composite materials [2] are widely used, one of the components of which is epoxy resin. Therefore, the construction of equations of state on the basis of the known experimental data [1], allowing to adequately describe the behavior of epoxy resin under shock loading is an urgent task.

If we use the free Helmholtz energy as the thermodynamic potential, then we obtain the equation of state in the Mie-Gruneisen form:

$$P - P_C = \gamma_D(V)\rho(E - U). \quad (1)$$

Here P , P_C , $\gamma_D(V)$, V , ρ , E , U – pressure, cold component of pressure, Gruneisen coefficient, specific volume, density, internal energy, cold component of internal energy, respectively. Experimental data on shock-wave loading of epoxy resin were presented in the form [1]

$$D = a + bu = 2,14 + 1,912u, \quad (2)$$

where D , u are the shock wave velocity and mass velocity, respectively. To describe the cold component of pressure and internal energy, we use the expressions defined in [3]

$$P_C = 3\rho_0 C_0^2 (x^{-(m+1)} - x^{-(n+1)}), \quad (3)$$

$$U = 3C_0^2 \left(\frac{1}{m} x^{-m} - \frac{1}{n} x^{-n} \right), \quad (4)$$

where C_0 is the volumetric speed of sound of epoxy resin, equal to 2.140 km/s, $x = \rho_0/\rho$. The expression for the shock wave velocity (2) allows constructing the experimental shock adiabat of epoxy resin in the form:

$$P = \rho_0 a^2 (1-x) / (1-b(1-x))^2, \quad (5)$$

and expressions (1), (3), (4) allow constructing a theoretical shock adiabat as follows:

$$P = (P_C + 2b\rho_0(E_0 - U)) / (1-b(1-x)). \quad (6)$$

From the equality to zero at $x = 1$ of the experimental (5) and calculated (6) values of the pressure on the shock adiabat, it follows that

$$E_0 = U_0 = 3C_0^2 \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{n} \right). \quad (7)$$

To determine the coefficients m and n included in the theoretical equation of state, we require the equality of the first and second derivatives with respect to x on the experimental (5) and calculated (6) shock adiabats at the point $x = 1$. As a result of solving the resulting system of equations, the sought values of the coefficients were determined: $m = 2.492667$, $n = 2.159334$. Comparison of the experimental data [1] with the calculation of shock adiabats (6) showed their good agreement. This is very important because when constructing equations of state, it is required to determine the minimum set of parameters.

References

1. **Tsai, L.** Shock compression behavior of a S2-glass fiber reinforced polymer Composite [Text] / L. Tsai, F. Yuan, V. Prakash, D. P. Dandekar // J. of Applied Phys. – 2009. – Vol. 105. – P. 093526 – 1 – 093526 – 11.
2. **Bulygin, M. G.** Influence of structural inhomogeneities of carbon-carbon composite materials of thermal protection of

hypersonic aircraft on the scatter of obgarnyh forms [Text] / M. G. Bulygin, G. F. Kostin, N. N. Tikhonov, O. N. Demytyev, Yu. M. Kovalev, Sh. Sh. Yagafarov // Structures made of composite materials. – 2004. – No. 3. – P. 3–15.

3. **Kovalev, Yu. M.** Equations of state to describe isothermal compression of certain molecular nitro compound crystals [Text] / Yu. M. Kovalev // Journal of Engineering Physics and Thermophysics – 2020. – Vol. 93, No. 1. – P. 223–233.

4-34

СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ГАФНИЕВОЙ БРОНZE ПРИ НАГРЕВЕ ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ И ДЕФОРМАЦИИ МЕТОДАМИ ДИНАМИЧЕСКОГО КАНАЛЬНО-УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ И КРУЧЕНИЯ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

В. В. Попов¹, Р. М. Фалахутдинов¹, Е. Н. Попова¹,
А. В. Столбовский¹, К. В. Гаан², Е. В. Шорохов²

¹Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

²Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забахина,
Снежинск, Россия

E-mail: vpopov@imp.uran.ru

Исследованы структурные превращения в гафниево-бронзе (Cu-0,74%Нf) после закалки от 950°C и после закалки и последующей деформации методами динамического канально-углового прессования (ДКУП) и кручения под высоким давлением (КВД). Исследования выполнены методами оптической и электронной микроскопии и дюротрии (измерения микротвердости).

После закалки бронза имеет крупнокристаллическую структуру с размерами зерен до 1 мм, а микротвердость составляет 740 ± 20 МПа. В результате ДКУП интенсивно развиваются процессы двойникования и микротвердость увеличивается до 2000 МПа после двух проходов ДКУП. КВД приводит к формированию субмикрокристаллической структуры с размером кристаллитов 120 нм после 5 оборотов КВД, а микротвердость при этом возрастает до 2450 МПа.

При последующем отжиге структура практически не меняется вплоть до 500°C в случае закаленных образцов и образцов, подвергнутых ДКУП, и вплоть до 400°C для образцов, подвергнутых КВД. При этом происходит выделение дисперсных частиц Cu₅Hf. Высокая термическая стабильность структуры обусловлена влиянием этих частиц.

При отжиге вплоть до определенной температуры наблюдается рост микротвердости, а затем ее падение в результате перестаривания и развития процессов возврата и рекристаллизации. В закаленных образцах микротвердость достигает максимума при 500°C, возрастая на 250 МПа по сравнению с исходным закаленным состоянием. В случае образцов, подвергнутых ДКУП, максимум микротвердости достигается при 350°C, увеличиваясь при отжиге на ~400 МПа.

Для образцов, подвергнутых КВД, максимум микротвердости также достигается при $\sim 350^\circ\text{C}$, а увеличение микротвердости по сравнению с исходным состоянием после КВД составляет ~ 400 МПа. Рост микротвердости при отжиге обусловлен дисперсионным упрочнением дисперсными частицами Cu_5Hf .

Таким образом, легирование меди гафнием позволяет существенно повысить термическую стабильность, а деформация гафниевого бронзы методами ДКУП и КВД в сочетании с последующим старением позволяет получить высокий уровень прочностных свойств.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки по теме «Функция».

STRUCTURAL TRANSFORMATIONS IN HAFNIUM BRONZE UPON HEATING AFTER QUENCHING AND DEFORMATION BY DYNAMIC CHANNEL-ANGULAR PRESSING AND HIGH PRESSURE TORSION

V. V. Popov¹, R. M. Falahutdinov¹, E. N. Popova¹,
A. V. Stolbovsky¹, K. V. Gaan², E. V. Shorokhov²

¹M. N. Miheev Institute of Metal Physics Ural Branch of RAS,
Ekaterinburg, Russia

²Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

E-mail: vpopov@imp.uran.ru

Structural transformations in hafnium bronze (Cu-0.74% Hf) after quenching from 950°C and after quenching and subsequent deformation by dynamic channel-angular pressing (DCAP) and high pressure torsion (HPT) have been investigated. The studies were carried out by optical and electron microscopy and microhardness measurements.

After quenching, the bronze has coarse-crystalline structure with grain sizes up to 1 mm, and the microhardness is 740 ± 20 MPa. Under DCAP, twinning processes develop intensively and the microhardness increases to 2000 MPa after two passes of DCAP. HPT results in the formation of submicrocrystalline structure with crystallite sizes of about 120 nm after 5 revolutions of HPT, and the microhardness in this case increases to 2450 MPa.

Upon subsequent annealing, the structure practically does not change up to 500°C in case of quenched samples and samples subjected to DCAP, and up to 400°C for samples subjected to HPT. In this case, the Precipitation of dispersed particles of Cu_5Hf occurs at annealing, and high thermal stability of the structure is due to the presence of these particles.

Upon annealing up to a certain temperature, an increase in microhardness is observed, and then its decrease due to over-aging and the development of processes of recovery and recrystallization. In quenched samples, the microhardness reaches its maximum at 500°C , increasing by 250 MPa in comparison with the initial quenched state. In the case of samples subjected to DCAP, the maximum microhardness is reached at 350°C , increasing by ~ 400 MPa upon annealing. For samples subjected to HPT, the maxi-

um microhardness is also achieved at $\sim 350^\circ\text{C}$, and the increase in microhardness in comparison with the initial state after HPT is ~ 400 MPa. The increase in microhardness upon annealing is due to the precipitation hardening by dispersed Cu_5Hf particles.

Thus, doping of copper with hafnium enables to increase considerably the thermal stability of the structure and deformation of hafnium bronze by DCAP and HPT in combination with subsequent aging makes it possible to obtain a high level of strength properties.

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science on the topic “Function”.

4-35

СКОРОСТИ ЗВУКА В УДАРНО-СЖАТОМ УРАНЕ В ДИАПАЗОНЕ 20–250 ГПа

А. Г. Попцов, Д. Г. Панкратов,
А. К. Якунин, Д. Т. Юсупов

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: d.p.kuchko@vniitf.ru

Представлены результаты измерений скоростей звука в природном уране при его высокоскоростной деформации в областях α -, γ -фаз, а также – в области плавления урана на фронте ударной волны. Регистрация процессов осуществлялась методикой манганинового датчика (диапазон продольных напряжений $\sigma_{xx} = 10 \dots 100$ ГПа) и фотоэлектрической (индикаторной) методикой (диапазон продольных напряжений $\sigma_{xx} = 90 \dots 250$ ГПа). В области твердой фазы урана определены изменения вдоль его ударной адиабаты упругих модулей, таких как коэффициент Пуассона, модуль Юнга, модуль объемного сжатия и модуль сдвига.

SOUND VELOCITY IN SHOCK-LOADED URANIUM WITHIN THE RANGE FROM 20 TO 250 GPa

A. G. Poptsov, D. G. Pankratov,
A. K. Yakunin, D. T. Yusupov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

E-mail: d.p.kuchko@vniitf.ru

The paper concerns sound velocity measurements in natural uranium under high-strain rate deformation in the regions of α -, γ -phases and in the region of uranium melting at the shock-wave front. Processes were registered using magnetic sensor technique (longitudinal stress range $\sigma_{xx} = 10 \dots 100$ GPa) and photoelectric (indicator) technique (longitudinal stress range $\sigma_{xx} = 90 \dots 250$ GPa).

Elastic modulus changes (Poisson ratio, Young modulus, modulus of dilatation, and shear modulus) for the uranium solid phase were determined along the Hugoniot curve.

4-36

СОУДАРЕНИЕ ПРОФИЛИРОВАННЫХ МЕДНЫХ ЦИЛИНДРОВ С ЖЕСТКОЙ СТЕНКОЙ: ЭКСПЕРИМЕНТ И МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ

Е. С. Родионов, В. Г. Лупанов, Н. А. Грачёва,
П. Н. Майер, А. Е. Майер

Челябинский Государственный университет,
Челябинск, Россия

E-mail: zlategor@mail.ru

Модификация тестов Тейлора по соударению стержня по наковальне была реализована для случая медных профилированных цилиндров. Цилиндр диаметром 8 мм и длиной в 40 мм был вырезан из медного холоднотянутого прутка бескислородной меди М1 и обточен в головной части для получения трех различных форм: 1) уменьшенный цилиндр диаметром 3 мм и длиной 10 мм; 2) такой же уменьшенный цилиндр диаметром 4 мм; 3) усеченный конус диаметром в вершине 2 мм и длиной 20 мм. Образцы запускались с помощью газовой пушки со скоростями до 80 м/с и сталкивались с жесткой наковальней из нержавеющей стали. Для разгона образцов применялся сжатый воздух давлением 5 бар, в области перед ударником создавалось пониженное давление 0,2 бар. В экспериментах реализованы значения истинной деформации порядка 0,5–1 и скорости деформации до $2,4 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$. Форма образцов подобрана таким образом, чтобы повысить деформации и скорости деформации на ударном конце. За счет этого удается получить скорости деформации, характерные для экспериментов с не профилированными цилиндрами такого же диаметра, но запущенными со скоростью 150–200 м/с. В случае цилиндров уменьшенного диаметра в головной части деформация близка к однородной по длине головной части, что позволяет сделать прямую оценку напряженности течения и скорости деформации.

Был проведен микроструктурный анализ деформированных и недеформированных образцов. Для недеформированных образцов характерна продольная текстура с полосами локализации, образующимися при получении холоднокатаного прутка. Для деформированного образца характерно наличие трещин в месте перехода от головной части уменьшенного диаметра в основную часть цилиндра. В головной части фиксируется множество пор, а пластическая деформация при соударении меняет текстуру.

Проведено трехмерное моделирование соударения и сравнение с результатами выполненных экспериментов. Для описания пластической деформации применена модель дислокационной пластичности, ранее верифицированная для ударно-волновых задач по соударению пластин металлов. Модель реализована в трехмерном случае с использованием численной

схемы гидродинамики сглаженных частиц (SPH). Также модель включает уравнение состояния, реализованное в виде искусственной нейронной сети (ИНС) и обученное по данным молекулярно-динамического (МД) моделирования равномерного изотермического растяжения и сжатия меди. Окончательный вид образцов полученных в эксперименте и рассчитанных по модели совпадает с хорошей точностью.

Экспериментальная часть работы поддержана Российским научным фондом (проект № 20-79-10229), Разработка численного кода и уравнения состояния на основе ИНС поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (гос. задание № 075-00992-21-00).

IMPACT TESTS WITH PROFILED COPPER CYLINDERS WITH A RIGID WALL: EXPERIMENT AND MICROSTRUCTURAL ANALYSIS

E. S. Rodionov, V. G. Lupanov, N. A. Grachyova,
P. N. Mayer, A. E. Mayer

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: zlategor@mail.ru

A modification of Taylor's tests for the impact of a rod on an anvil was realized for the case of copper profiled cylinders. A cylinder with a diameter of 8 mm and a length of 40 mm was cut from a cold-drawn copper rod of oxygen-free copper M1 and turned at the head to obtain three different shapes: 1) a reduced cylinder with a diameter of 3 mm and a length of 10 mm; 2) the same reduced cylinder with a diameter of 4 mm; 3) a truncated cone with a top diameter of 2 mm and a length of 20 mm. The samples were launched with a gas cannon at speeds up to 80 m/s and collided with a rigid stainless steel anvil. Compressed air with a pressure of 5 bar was used to disperse the samples; a reduced pressure of 0.2 bar was created in the region in front of the striker. In the experiments, the values of the true strain of the order of 0.5–1 and the strain rate up to $2.4 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ were realized. The shape of the samples is selected in such a way as to increase the deformations and strain rates at the impact end. Due to this, it is possible to obtain deformation rates typical for experiments with non-profiled cylinders of the same diameter, but launched at a speed of 150–200 m/s. In the case of cylinders with a reduced diameter at the head, the deformation is close to uniform along the length of the head, which makes it possible to directly estimate the flow stress and strain rate.

Microstructural analysis of deformed and non-deformed samples was carried out. Undeformed specimens are characterized by a longitudinal texture with localization bands formed during the production of a cold-rolled bar. A deformed specimen is characterized by the presence of cracks at the transition from the head of a reduced diameter to the main part of the cylinder. Many pores are fixed in the head, and plastic deformation upon impact changes the texture.

A 3D-simulation of the collision was carried out and compared with the results of the performed experiments.

To describe plastic deformation, we used the dislocation plasticity model, previously verified for shock-wave problems on the collision of metal plates. The model is implemented in a three-dimensional case using the numerical scheme of smoothed particle hydrodynamics (SPH). The model also includes an equation of state implemented in the form of an artificial neural network (ANN) and trained on the basis of molecular dynamics (MD) modeling of uniform isothermal tension and compression of copper. The final form of the samples obtained in the experiment and calculated by the model coincides with good accuracy.

Experimental part of this work is supported by the Russian Science Foundation (project No. 20-79-10229); development of numerical code and ANN-based equation of state is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state assignment No. 075-00992-21-00).

4-37

ВЛИЯНИЕ ГРАФЕНА НА СТОЙКОСТЬ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ К ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМ И ДИНАМИЧЕСКИМ МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Г. Г. Савенков^{2,3}, А. Ю. Константинов¹,
А. В. Кузнецов², В. В. Столяров⁴

¹НИИ Механики Нижегородского государственного
университета им. Н. А. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия

²АО «Машиностроительный завод «Армалит»,
Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский государственный технологический
институт (технический университет),
Санкт-Петербург, Россия

⁴Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН,
Москва, Россия

E-mail: sav-georgij@yandex.ru

Приводятся результаты исследования динамической прочности нанокерамики Al_2O_3 с содержанием пятислойного графена от 0,5 до 2,0% (масс.) под действием сильнотоочного электронного пучка наносекундной длительности, высоковольтного электрического разряда также наносекундной длительности и динамического механического удара. Установлено, что при импульсной электрофизической нагрузке увеличение в композите содержания графена приводит к охрупчиванию нанокompозита (количество фрагментов на которые разрушались образцы резко увеличилось с увеличением процентного содержания графена).

При механических исследованиях применялась модификация методики Кольского – «бразильский тест» (испытание на раскалывание). В экспериментах на раскалывание образец в виде диска устанавливается на ребро между двумя стержнями и прикладывается нагрузка. В результате определяются максималь-

ные растягивающие напряжения. Установлено, что при механических нагрузках при увеличении содержания графена 1,5% (масс) происходит пластификация образцов (количество фрагментов и максимальные растягивающие напряжения имеют минимальные значения). Так, если значения максимальных растягивающих напряжений для всех образцов находятся в диапазоне 190–245 МПа, то в случае образцов с 1,5% содержанием графена, эти значения составляют 95–100 МПа.

Такие различия в поведении оксида алюминия при электрофизических и механических воздействиях могут объясняться тем, что графен является проводящим материалом. Поэтому его разрушение при электрофизических воздействиях происходит по проводящим «затравочным» точкам, играющих роль своеобразных концентраторов напряжений. В то же время при механических воздействиях графен играет роль пластификатора.

EFFECT OF GRAPHENE ON THE RESISTANCE OF ALUMINUM OXIDE TO ELECTROPHYSICAL AND DYNAMIC MECHANICAL ACTIONS

G. G. Savenkov^{2,3}, A. Yu. Konstantinov¹,
A. V. Kuznetsov², V. V. Stolyarov⁴

¹Research Institute of Mechanics, Lobachevsky State University
Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

²Armalit Machine-building plant, St. Petersburg, Russia

³St. Petersburg State Technological Institute (Technical
University), St. Petersburg, Russia

⁴Blagonravov Institute of Engineering Science, Russian
Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: sav-georgij@yandex.ru

The results of a study of the dynamic strength of Al_2O_3 nanoceramics with a five-layer graphene content from 0.5 to 2.0 wt.% under the action of a high-current electron beam of nanosecond duration, a high-voltage electric discharge of nanosecond duration, and dynamic mechanical shock are presented. It was found that, under a pulsed electrophysical load, an increase in the graphene content in the composite leads to embrittlement of the nanocomposite (the number of fragments into which the samples were destroyed sharply increased with an increase in the percentage of graphene).

In mechanical studies, a modification of the Kolsky method was used – the “Brazilian test” (splitting test). In splitting experiments, a disc-shaped specimen is placed on an edge between two rods and a load is applied. As a result, the maximum tensile stresses are determined. It was found that under mechanical loads with an increase in the graphene content of 1.5wt.%, plasticization of the samples occurs (the number of fragments and the maximum tensile stresses have minimum values). So, if the values of the maximum tensile stresses for all samples are in the range of 190–245 MPa, then in the case of samples with 1.5% graphene content, these values are 95–100 MPa.

Such differences in the behavior of aluminum oxide under electrophysical and mechanical influences can be

explained by the fact that graphene is a conductive material. Therefore, its destruction under electrophysical influences occurs along conducting “seed” points, which play the role of a kind of stress concentrators. At the same time, graphene plays the role of a plasticizer under mechanical action.

4-38

РАСЧЕТ УДАРНЫХ АДИАБАТ СПЛАВОВ ПРИ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЯХ ЭНЕРГИИ

Н. Н. Середкин^{1,2,3}, К. В. Хищенко^{1,3,4,5}

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

³Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

⁴Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

⁵Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

E-mail: nikser12@yandex.ru

В настоящей работе мы рассчитываем ударные адиабаты для смесей и сплавов различных материалов на основе принципа аддитивности ударных адиабат компонентов. Согласно этому принципу при заданном давлении ударного сжатия удельный объем ударно-сжатой смеси полагается равным сумме удельных объемов ударно-сжатых компонентов смеси с учетом их массовой доли. Результаты такого расчета ударных адиабат сравниваются с имеющимися данными ударно-волновых экспериментов для сплавов рения с молибденом, железа с ванадием и урана с ниобием и родием при высоких плотностях энергии. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-19-00713).

CALCULATION OF SHOCK ADIABATS OF ALLOYS AT HIGH ENERGY DENSITIES

N. N. Seredkin^{1,2,3}, K. V. Khishchenko^{1,3,4,5}

¹Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

³Institute of Problems of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia

⁴Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

⁵South Ural State University, Chelyabinsk, Russia
E-mail: nikser12@yandex.ru

In this work, we calculate the shock adiabats for mixtures and alloys of various materials based on the principle of additivity of the shock adiabats of the components. According to this principle, at a given shock compression

pressure, the specific volume of the shock-compressed mixture is assumed to be equal to the sum of the specific volumes of the shock-compressed components of the mixture, taking into account their mass fraction. The results of such a calculation of shock adiabats are compared with the available data of shock-wave experiments for alloys of rhenium with molybdenum, iron with vanadium, and uranium with niobium and rhodium at high energy densities. This work was financially supported by the Russian Science Foundation (grant No. 19-19-00713).

4-39

ПЕРВОПРИНЦИПНЫЕ РАСЧЕТЫ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ Cu, Ag И Pt ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

Н. А. Смирнов

Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия

E-mail: nasmirnov@vniitf.ru

В работе представлены результаты расчетов из первых принципов относительной стабильности различных кристаллических структур меди, серебра и платины до высоких давлений при $T \geq 0$ К. Расчеты с использованием квазигармонического приближения показали, что в случае Cu и Ag при $P \geq 100$ ГПа и $T > 3$ кК термодинамически наиболее выгодной является объемноцентрированная кубическая структура (bcc), а не гранецентрированная (fcc). Ударная адиабата для Cu и Ag пересекает границу раздела fcc-bcc фаз, а вычисленные давления переходов хорошо согласуются с результатами недавних ударных экспериментов S. M. Sharma et al. (2020). Выгодность bcc структуры обусловлена более мягкими низкочастотными фоновыми модами и меньшим вкладом колебаний ядер в свободную энергию кристалла при высоких T по сравнению с плотноупакованными фазами. Сжатие кристалла платины также приводит к fcc \rightarrow bcc переходу, однако, это происходит при гораздо более высоких давлениях, $P > 1,4$ ТПа.

RELATIVE STABILITY OF Cu, Ag AND Pt AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES FROM AB INITIO CALCULATIONS

N. A. Smirnov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: nasmirnov@vniitf.ru

The paper presents ab initio studies into the relative stability of the crystalline structures of copper, silver and platinum up to high pressures at $T \geq 0$ K. Our calculations in quasiharmonic approximation suggest that not the

fcc structure of Cu and Ag, but the body-centered cubic one is thermodynamically most favorable at $P \geq 100$ GPa and $T > 3$ kK. The shock Hugoniot of Cu and Ag crosses the fcc-bcc phase boundary and the calculated transition pressures agree well with the result of recent laser shock experiments by Sharma et al (2020). The advantage of the bcc structure comes from its softer low-frequency phonon modes and the smaller contribution of lattice vibrations to free energy at high temperatures, as compared to the close-packed structures. The compression of platinum crystal also causes the fcc \rightarrow bcc transition but at much higher pressures, $P > 1.4$ TPa.

A hydrodynamic model of shock-wave processes in a material under the action of a short high-intensity laser pulse is considered. The simulation was carried out for the case of an aluminum target 90 μm thick, irradiated with a 70 ps laser pulse with a maximum intensity of 14.7 TW/cm². In a corresponding laboratory experiment, on the rear side of the target after irradiation, a spall of a part of the material is recorded at a depth of 10 ± 1 μm . Calculation of the dependence of pressure and density of aluminum on time in the spall plane makes it possible to determine the ultimate tensile strength of aluminum at a high strain rate. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 20-02-00683).

4-40

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
И РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ
ОТКОЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ АЛЮМИНИЯ
ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ИМПУЛЬСНОМ
ВОЗДЕЙСТВИИ**

И. А. Стучебрюхов¹, А. Ю. Семёнов¹, К. В. Хищенко²

¹Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН,
Москва, Россия

²Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

E-mail: konst@ihed.ras.ru

Рассмотрена гидродинамическая модель ударно-волновых процессов в материале под действием короткого высокоинтенсивного лазерного импульса. Моделирование проведено для случая алюминиевой мишени толщиной 90 мкм, облученной лазерным импульсом длительностью 70 пс с максимальной интенсивностью 14,7 ТВт/см². В соответствующем лабораторном эксперименте на тыльной стороне мишени после облучения регистрируется откол части материала на глубине 10 ± 1 мкм. Расчет зависимости давления и плотности алюминия от времени в плоскости откола позволяет определить предел прочности алюминия при растяжении при высокой скорости деформации. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-02-00683).

**EXPERIMENTAL
AND COMPUTATIONAL-THEORETICAL STUDY
OF THE SPALL STRENGTH
OF ALUMINUM UNDER INTENSE IMPULSE
ACTION**

I. A. Stuchebryukhov¹, A. Yu. Semyonov¹,
K. V. Khishchenko²

¹Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia

²Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: konst@ihed.ras.ru

4-41

**ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ
МЕТОДАМИ ДИНАМИЧЕСКОГО
КАНАЛЬНО-УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ
И КРУЧЕНИЯ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ
НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА
ГАФНИЕВОЙ БРОНЗЫ**

Р. М. Фалахутдинов¹, В. В. Попов¹, Е. Н. Попова¹,
А. В. Столбовский¹, К. В. Гаан², Е. В. Шорохов²

¹Институт физики металлов УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

²Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забахина,
Снежинск, Россия

E-mail: falahutdinov@imp.uran.ru

Выполнены исследования влияния пластической деформации методами динамического канально-углового прессования (ДКУП) и кручения под высоким давлением (КВД) на структуру и свойства гафниевой бронзы, подвергнутой закалке.

После ДКУП в структуре закаленных образцов появляются многочисленных двойники, что, по-видимому, обусловлено тем, что гафний понижает энергию дефектов упаковки. После 1 прохода в структуре преобладают крупные пластины двойников. После 2 проходов ДКУП структура заметно меняется. В одних участках по-прежнему присутствуют крупные пластины двойников, но в других наблюдается значительное измельчение структуры. В результате деформации ДКУП происходит значительное упрочнение: после 2 проходов ДКУП микротвердость достигает 2000 МПа. Увеличение степени деформации до 3 проходов приводит к разрушению образцов. Образование интерметаллидов в процессе ДКУП закаленных образцов обнаружено не было.

После КВД на 5 оборотов в закаленной гафниевой бронзе формируется однородная субмикроструктурная структура. При этом в отличие от образцов, подвергнутых ДКУП, в данном случае не было зафиксировано существенного развития двойникования. Образование интерметаллидов в процессе КВД обнаружено не было. Дисперсность структуры и

микротвердость образцов, подвергнутых КВД, заметно выше, чем после ДКУП. После деформации КВД на 5 оборотов микротвердость достигает значения 2450 МПа.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки по теме «Функция».

**EFFECT OF DEFORMATION
BY DYNAMIC CHANNEL-ANGULAR PRESSING
AND HIGH PRESSURE TORSION ON THE
STRUCTURE AND PROPERTIES
OF HAFNIUM BRONZE**

R. M. Falahutdinov¹, V. V. Popov¹, E. N. Popova¹,
A. V. Stolbovsky¹, K. V. Gaan², E. V. Shorokhov²

¹M. N. Miheev Institute of Metal Physics Ural Branch of RAS,
Ekaterinburg, Russia

²Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

E-mail: falahutdinov@imp.uran.ru

The effect of plastic deformation by dynamic channel-angular pressing (DCAP) and high-pressure torsion (HPT) on the structure and properties of quenched hafnium bronze has been investigated.

After DCAP, numerous twins appear in the structure of quenched samples, which is, apparently, because hafnium lowers the energy of stacking faults. After one pass of DCAP, coarse plates of twins dominate in the structure. After two DCAP passes, the structure changes noticeably. In some areas, large plates of twins are still present, but in others, a significant refinement of the structure is observed. The deformation by DCAP results in significant hardening, and after 2 passes of DCAP, the microhardness reaches 2000 MPa. An increase in the degree of deformation up to 3 passes leads to the fracture of samples. The formation of intermetallic compounds during DCAP of quenched samples was not detected.

After HPT by 5 turns, a homogeneous submicrocrystalline structure is formed in the quenched hafnium bronze. In this case, in contrast to the samples subjected to DCAP, there was no significant development of twinning. The formation of intermetallic compounds in the process of HPT was not observed as well. The structure dispersion and microhardness of the samples subjected to HPT are noticeably higher than those after DCAP. After the HPT by 5 revolutions, the microhardness reaches 2450 MPa.

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science on the topic “Function”.

4-42

**ДВИЖЕНИЕ МАЛОУГЛОВЫХ
СИММЕТРИЧНЫХ ГРАНИЦ
ЗЕРЕН НАКЛОНА В ЧИСТЫХ
ГЦК МЕТАЛЛАХ И Al-Cu СПЛАВАХ**

Е. В. Фомин¹, А. Е. Майер^{1,2}, В. С. Красников^{1,2}

¹Челябинский государственный университет,
Челябинск, Россия

²Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

E-mail: fomin33312@gmail.com

В данной работе изучается зернограницной скольжение малоугловых симметричных границ зерен (ГЗ) наклона как часть процесса пластичности металлов и сплавов. Для этого предлагается исследование на атомном уровне методом молекулярной динамики (МД) [1, 2] и с помощью континуального моделирования. Движение ГЗ в атомистическом моделировании возникает в процессе сдвиговой деформации – результаты показывают, что движение таких границ можно представить как движение стенки полных краевых дислокаций как для чистых ГЦК металлов, так и для кристалла алюминия с твердым раствором атомов меди (исследовались концентрации до 5%). Далее по полученным представлениям разрабатывается континуальная модель движения ГЗ, на основе модели движения уединенной краевой дислокации [3], где параметры модели подбираются по данным МД моделирования.

Работа поддержана Минобрнауки РФ (гос. задание № 075-00992-21-00 от 23 декабря 2020 г.) в части движения границ зерен в чистых ГЦК металлах и грантом РФФИ, проект № 18-71-10038 в части разработки модели движения границ зерен в алюминиево-медном сплаве.

Литература

1. **Plimpton, S.** Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics [Text] // J. Comp. Phys. – 1995. – Vol. 117. – P. 1–19.
2. **Hire, I. P.** Atomsk: A tool for manipulating and converting atomic data files [Text] // Comput. Phys. Comm. – 2015. – Vol. 197. – P. 212–219.
3. **Krasnikov, V. S.** Influence of local stresses on motion of edge dislocation in aluminum [Text] / V. S. Krasnikov, A. E. Mayer // Int. J. Plast. – 2018. – Vol. 101. – P. 170–187.

**MOTION OF LOW-ANGLE SYMMETRIC TILT
GRAIN BOUNDARIES IN PURE FCC METALS
AND Al-Cu ALLOYS**

E. V. Fomin¹, A. E. Mayer^{1,2}, V. S. Krasnikov^{1,2}

¹Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

²South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: fomin33312@gmail.com

In this work, we study the grain boundary sliding of low-angle symmetric tilt grain boundaries (GBs) as part

of the plasticity process of metals and alloys. For this purposes, studies at the atomic level by the molecular dynamics (MD) method [1, 2] and with the help of continual modeling are proposed. The motion of GBs in atomistic modeling arises in the process of shear deformation: the results show that the motion of such boundaries can be represented as the motion of the wall of full edge dislocations both for pure FCC metals and for an aluminum crystal with a solid solution of copper atoms (concentrations up to 5% are studied). Further, according to the obtained ideas, a continual model of the motion of the GB is developed, based on the model of the motion of a solitary edge dislocation [3], where the parameters of the model are selected according to the data of MD simulation.

This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (state assignment No. 075-00992-21-00 dated December 23, 2020) in terms of the motion of grain boundaries in pure FCC metals and a grant from the Russian Science Foundation, project No. 18-71-10038 in terms of developing a model of motion of grain boundaries in aluminum-copper alloy.

References

1. **Plimpton, S.** Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics [Text] // *J. Comp. Phys.* – 1995. – Vol. 117. – P. 1–19.
2. **Hire, I. P.** AtomsK: A tool for manipulating and converting atomic data files [Text] // *Comput. Phys. Comm.* – 2015. – Vol. 197. – P. 212–219.
3. **Krasnikov, V. S.** Influence of local stresses on motion of edge dislocation in aluminum [Text] / V. S. Krasnikov, A. E. Mayer // *Int. J. Plast.* – 2018. – Vol. 101. – P. 170–187.

4-43

МОБИЛЬНАЯ СИСТЕМА ПИТАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА БЕТАТРОНА ТИПА БИМ

В. А. Фомичёв, К. В. Савченко, Ю. П. Куропаткин,
В. И. Нижегородцев, И. Н. Романов, В. Д. Селемир,
Е. В. Урлин, А. А. Чинин, О. А. Шамро

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия
E-mail: mailbox@ntc.vniief.ru

Описана мобильная система питания для электромагнита безжелезного импульсного малогабаритного бетатрона (бетатрон типа БИМ), позволяющая создавать в обмотках электромагнита импульс тока амплитудой $I \approx 130$ кА и длительностью $t \approx 2$ мс, разброс времени срабатывания системы $\Delta t \leq 0,1$ мкс. Она содержит высоковольтное зарядное устройство ЗУ 25-15М, элементы управления и синхронизации, расположенные в стойке коммутации, батарею емкостных накопителей из конденсаторов ИЭПС-24-290 общей емкостью $C \approx 2400$ мкФ. Приведены принципиальная электрическая схема, конструкция и осциллограммы сигналов с датчиков контроля параметров системы.

Система входит в состав мобильного рентгенографического комплекса, предназначенного для радиографирования динамических объектов с большими оптическими толщинами.

MOBILE POWER SUPPLY SYSTEM FOR ELECTROMAGNET OF A BIM TYPE BETATRON

V. A. Fomichyov, K. V. Savchenko, Yu. P. Kuropatkin,
V. I. Nizhegorodtsev, I. N. Romanov, V. D. Selemir,
E. V. Urlin, A. A. Chinin, O. A. Shamro

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific
Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

E-mail: mailbox@ntc.vniief.ru

The authors describe a mobile power supply system for the electromagnet of the ironless pulsed compact betatron (the betatron of a BIM type). It allows producing a current pulse with the amplitude of 130 kA and the length of 2 ms in the magnetic coils. The time spread of the system triggering is less than 0.1 μ s. The system contains a high-voltage charger, a battery of a capacitive storage of 2400 μ F, controls and synchronization elements located in the switching rack. The electrical scheme, the construction and oscillograms of the betatron output parameters are provided. The system is a part of the mobile radiographic complex and is aimed to radiograph dynamic objects with the large optical thickness.

4-44

УДАРНАЯ СЖИМАЕМОСТЬ И УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ОКСИДА БЕРИЛЛИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

К. В. Хищенко^{1,2,3,4}, К. К. Крупников⁵, Ю. Н. Жугин⁵,
А. Ю. Николаев⁵, Е. Б. Смирнов^{5,3}, Д. В. Петров⁵

¹Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

²Московский физико-технический институт,
Долгопрудный, Россия

³Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

⁴Институт проблем химической физики РАН,
Черноголовка, Россия

⁵Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: konst@ihed.ras.ru

Экспериментально исследована ударная сжимаемость керамических образцов оксида бериллия в интервале давлений до 130 ГПа. Нагружение образцов проводилось стальными ударниками, разогнанными продуктами детонации конденсированного взрывчатого вещества. Регистрация скорости ударной волны в образцах осуществлялась с помощью манганиновых

или электроконтактных датчиков. Обобщение новых и имевшихся ранее данных по ударной сжимаемости образцов оксида бериллия различной начальной плотности проведено в рамках полуэмпирического уравнения состояния в широком диапазоне давлений и степеней сжатия.

SHOCK COMPRESSIBILITY AND EQUATION OF STATE FOR BERYLLIUM OXIDE AT HIGH PRESSURES

K. V. Khishchenko^{1,2,3,4}, K. K. Krupnikov⁵, Yu. N. Zhugin⁵,
A. Yu. Nikolaev⁵, E. B. Smirnov^{5,3}, D. V. Petrov⁵

¹Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology,
Dolgoprudny, Russia

³South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

⁴Institute of Problems of Chemical Physics RAS,
Chernogolovka, Russia

⁵Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: konst@ihed.ras.ru

The shock compressibility of ceramic samples of beryllium oxide was experimentally investigated in the pressure range up to 130 GPa. The samples were loaded with steel impactors accelerated by the detonation products of a condensed explosive. The shock wave velocity in the samples was recorded using manganin or electrocontact sensors. A generalization of new and previously available data on the shock compressibility of beryllium oxide samples with different initial densities was carried out within the framework of the semiempirical equation of state in a wide range of pressures and compression ratios.

4-45

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ХРОМА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

К. В. Хищенко^{1, 2, 3, 4}

¹Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

²Московский физико-технический институт,
Долгопрудный, Россия

³Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

⁴Институт проблем химической физики РАН,
Черноголовка, Россия

E-mail: konst@ihed.ras.ru

Разработано полуэмпирическое уравнение состояния хрома с учетом плавления и испарения. Представлены результаты расчетов термодинамических характеристик жидкой и газовой фаз в широком диапазоне давлений и температур. Проведено сопоставление расчетных результатов с имеющимися ударно-волновыми данными для этого металла. Полученное многофазное уравнение состояния хрома может быть

эффективно использовано в численном моделировании различных высокоинтенсивных процессов. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-19-00713).

PHASE TRANSFORMATIONS OF CHROMIUM AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES

K. V. Khishchenko^{1, 2, 3, 4}

¹Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology,
Dolgoprudny, Russia

³South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

⁴Institute of Problems of Chemical Physics RAS,
Chernogolovka, Russia

E-mail: konst@ihed.ras.ru

A semiempirical equation of state for chromium has been developed, taking into account melting and evaporation. The results of calculations of the thermodynamic characteristics of the liquid and gas phases in a wide range of pressures and temperatures are presented. The calculated results are compared with the available shock-wave data for this metal. The obtained multiphase equation of state for chromium can be effectively used in the numerical simulation of various high-intensity processes. This work is supported by the Russian Science Foundation (grant No. 19-19-00713).

4-46

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И СВОЙСТВА СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ МЕДИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

И. В. Хомская¹, В. И. Зельдович¹, Е. В. Шорохов²,
С. В. Разорёнов³, Д. Н. Абдуллина¹,
Н. Ю. Фролова¹, А. Э. Хейфец¹

¹Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

²Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

³Институт проблем химической физики РАН,
Черноголовка, Россия

E-mail: khomskaya@imp.uran.ru

Изучены структурно-фазовые превращения и свойства сплавов на основе меди, легированных микродобавками (0,03–0,2) мас. % хрома и (0,03–0,08) мас. % циркония с субмикроструктурной (СМК) структурой, полученной методом динамического канально-углового прессования (ДКУП). Показано, что формирование неравновесной СМК структуры в дисперсионно-твердеющих сплавах меди, при ДКУП происходит в результате высокоскоростных процессов фрагментации, динамической полигонизации и деформационного старения с выделением нано-

размерных (5–10 нм) частиц упрочняющих фаз Cr и Cu₅Zr. Исследовано влияние ДКУП и старения на прочностные свойства, износостойкость и электропроводность сплавов. Показано, что оптимальное сочетание микротвердости (HV = 1880 МПа), электропроводности (80% IACS), прочности ($\sigma_{0.2} = 464$ МПа, $\sigma_u = 542$ МПа) и пластичности ($\delta = 11$ %), было получено в сплаве Cu-Cr-Zr при обработке: ДКУП+400°C, 1 ч. Установлено, что экономно-легированные сплавы меди обладают высокой способностью к упрочнению методами ДКУП и ИПД трением скольжения. Определено, что интенсивность изнашивания образцов с СМК структурой, понижается в 1,4 раза по сравнению с КК состоянием. Показано, что комбинированная обработка ДКУП+400°C+ИПД трением приводит к формированию в материале поверхностного слоя НК структуры трения с размером кристаллитов 15–60 нм, что обеспечивает высокий уровень твердости (3350 МПа) и низкий коэффициент трения (0,35). Динамические свойства СМК сплавов исследованы при ударно-волновом нагружении с давлением до 7.0 ГПа и скоростью деформации 10^5 с⁻¹. Показано, что однократное ДКУП прессование сплавов Cu-Zr и Cu-Cr, приводящее к измельчению кристаллитов от 300 до 1 мкм, увеличивает в 1,9–2,8 раза динамический предел упругости Гюгонио (σ_{HEL}) и динамический предел текучести (Y). Дальнейшее измельчение кристаллитов до 0,2–0,4 мкм при трехкратном прессовании увеличивает динамические характеристики сплавов в 1,5–4,0 раза. Таким образом, упрочняющий эффект сплавов с СМК структурой, полученной методом ДКУП, сохраняется при скоростях деформации 10^5 с⁻¹. Можно отметить следующие особенности деформационного поведения СМК сплавов меди при субмикросекундных длительностях нагрузки: возрастание характеристик упруго-пластического перехода, увеличение критического разрушающего напряжения при отколе и затягивание процесса откольного разрушения, по сравнению с исходным КК состоянием.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Структура» № АААА-А18-118020190116-6 и при частичной поддержке РФФИ (проект № 20-43-660034).

**THE STRUCTURAL-PHASE
TRANSFORMATIONS AND PROPERTIES
OF SUBMICROCRYSTALLINE
COPPER ALLOYS UNDER DYNAMIC LOADING**

I. V. Khomskaya¹, V. I. Zeldovich¹, E. V. Shorokhov²,
S. V. Razorenov³, D. N. Abdullina¹,
N. Yu. Frolova¹, A. E. Kheifets¹

¹M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

²Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

³Institute of Problems of Chemical Physics of RAS, Chernogolovka, Russia

E-mail: khomskaya@imp.uran.ru

The structural-phase transformations and properties of copper-based alloys doped with micro additives (0.03–0.2) wt. % chromium and (0.03–0.08) wt. % of zirconium with a submicrocrystalline (SMC) structure formed by the dynamic channel-angular pressing (DCAP) method were studied. It was shown that the formation of a non-equilibrium SMC structure to DCAP in dispersion-hardened copper alloys occurs as a result of high-speed processes of fragmentation, dynamic polygonization and partial strain aging with the precipitation of Cr and nanoparticles (5–10 nm). The effect of DCAP and aging on strength properties, wear resistance and electrical conductivity of the alloys has been investigated. It was shown that the optimal combination of microhardness (HV = 1880 MPa), electrical conductivity (80% IACS), strength ($\sigma_{0.2} = 464$ MPa, $\sigma_u = 542$ MPa) and ductility ($\delta = 11$ %) in Cu–Cr–Zr alloy can be obtained by DCAP and aging at 400°C for 1 h. It was established that low-alloyed of copper-based alloys possessed a high work-hardening ability due to the methods of DCAP and SPD under sliding friction. It was established that the wear rate of samples with SMC structure decreased by a factor of 1.4 as compared to the coarse-crystalline (CC) state. It was shown that the combination of the treatment by DCAP, aging at 400°C, and SPD under friction of the alloy resulted in the formation of the friction-induced nanocrystalline structure with the grain size of 15–60 nm in the surface-layer material, which provided a high level of microhardness (3350 MPa) and low values of the friction coefficient (0.35). The dynamic properties of SMC alloys were studied under shock-wave loading with pressures up to 7.0 GPa and a strain rate of 10^5 s⁻¹. It is shown that a single pressing of Cu–Zr and Cu–Cr alloys, which leads to the refinement of crystallites from 300 to 1 μm, increases the dynamic Hugoniot elastic limit (σ_{HEL}) and the dynamic yield stress (Y) by 1.9–2.8 times. Further refinement of crystallites to 0.2–0.4 μm with triple pressing increases the dynamic characteristics of the alloys by 1.5–4.0 times. Thus, the strengthening effect of alloys with a SMC structure obtained by the DCAP method is preserved at strain rates of 10^5 s⁻¹. The following features of the deformation behavior of SMC copper alloys upon submicrosecond durations of loading can be noted: an increase in the characteristics of the elastic–plastic transition; an increase in the critical fracture stress during the spalling; and a delay of the process of the spall fracture as compared to CC state.

The work was accomplished according to the State Assignment theme “Structure” (No. АААА-А18 118020190116 6) and partially supported by the RFBR (project No. 20-43-660034).

4-47

**МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
ПРОТЯЖЕННЫХ ВНУТРИЗЕРЕННЫХ
ДЕФЕКТОВ НА КИНЕТИКУ РОСТА ЗЕРЕН
В НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МЕДИ**

П. В. Чирков¹, Р. М. Кичигин^{1,2},
А. В. Караваев^{1,2}, В. В. Дрёмов¹

¹Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²Снежинский физико-технический институт
Национального исследовательского ядерного университета
«МИФИ», Снежинск, Россия
E-mail: p.v.chirkov@vniitf.ru

В настоящей работе представлены результаты крупномасштабных молекулярно-динамических расчетов влияния внутривзеренных дефектов на скорость отжига нанокристаллической ГЦК-меди. Было рассмотрено два типа моделируемых систем, в первом типе образцов зеренная структура задавалась с помощью заполнения ГЦК-решетки произвольной ориентации многогранников Вороного, получаемая таким образом структура не содержит внутривзеренных дефектов. Второй тип образцов был получен «естественным образом» – путем кристаллизации системы из расплава, при этом прорастающие зерна содержат значительное количество внутривзеренных дефектов (нанодвойники и плоскости дефектов упаковки). Оба типа полученных образцов далее подвергались длительному (до 50 нс) изотермическому отжигу при $T \approx 0,9T_{пл}$, что способствовало началу перекристаллизации и уменьшению числа зерен. Результаты прямого молекулярно-динамического моделирования показывают, что присутствие дефектов в зернах оказывает значительное влияние на скорость перекристаллизации, количество зерен в бездефектном образце сокращается примерно в два раза медленнее. То есть, термическая стабильность нанокристаллических структур может быть повышена с помощью оптимизации технологий производства материала путем избегания режимов термомеханической обработки, при которых увеличивается количество внутривзеренных протяженных дефектов.

**MOLECULAR DYNAMICS STUDY
OF THE EFFECT OF EXTENDED INGRAIN
DEFECTS ON GRAIN GROWTH KINETICS
IN NANOCRYSTALLINE COPPER**

P. V. Chirkov¹, R. M. Kichigin^{1,2},
A. V. Karavaev^{1,2}, V. V. Dryomov¹

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

²Snezhinsk Institute of Physics and Technology National
Research Nuclear University «MEPhI», Snezhinsk, Russia
E-mail: p.v.chirkov@vniitf.ru

The paper presents results of a large-scale classical molecular dynamics (MD) study into the effect of ingrain defects on the grain growth rate of face centered cubic nanocrystalline copper under thermal annealing. To do this, two types of virtual MD samples are used. The samples of the first type are constructed artificially by filling Voronoi cells with atoms arranged in fcc lattice essentially with no ingrain defects. The other samples are obtained by natural crystallization from melted material and contain numerous extended ingrain defects (nanotwins and stacking faults). These samples with a high concentration of ingrain defects imitate nanocrystalline material produced by severe plastic deformation via high pressure torsion or equal channel angular extrusion. The samples of both types are subjected to long-time zero pressure isothermal annealing at $T \approx 0.9T_m$ which leads to grain coarsening due to recrystallization. Direct molecular dynamics simulations of the annealing of different samples show that at the same conditions recrystallization goes two times faster in the samples with a high concentration of extended ingrain defects than in the defect-free samples. That is, to increase the thermal stability of nanostructured material the technologies used for forming nanocrystalline structures should be developed so as to avoid the thermomechanical treatment regimes leading to the formation of structures with high concentration of ingrain extended defects.

4-48

**МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ МОБИЛЬНЫЙ
УСКОРИТЕЛЬ НА БАЗЕ БЕТАТРОНА
ТИПА БИМ**

О. А. Шамро, Ю. П. Куропаткин, В. И. Нижегородцев,
И. Н. Романов, К. В. Савченко, В. Д. Селемир,
Е. В. Урлин, В. А. Фомичёв, А. А. Чинин

Российский Федеральный Ядерный Центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики, Саров, Россия

E-mail: mailbox@ntc.vniief.ru

Описан модернизированный мобильный ускоритель на базе бетатрона типа БИМ. Приведены конструкция ускорителя, временная диаграмма срабатывания его отдельных систем в рабочем цикле, осциллограммы с датчиков контроля выходных параметров. В 2021 году проведены тестовые включения ускорителя в одноимпульсном и трехимпульсном режимах. Тестовые включения дали следующие результаты: оцененная граничная энергия электронного пучка $E_{тр} \approx 70$ МэВ; толщина просвеченного свинцового тест-объекта на расстоянии 4 м от танталовой мишени – 160 мм; длительность выходных гамма-импульсов на полувысоте в одноимпульсном режиме – 120 нс, в трехимпульсном режиме – 200, 150 и 120 нс. Размеры источника излучения – 6×3 мм (размеры танталовой мишени – 6×6 мм). Применение модернизированных мобильных ускорителей в составе рентгенографи-

ческого комплекса [1] позволит повысить эффективность исследований за счет улучшения его выходных характеристик и оптимизации геометрии гидродинамических опытов.

Литература

1. Пат. 2548585 С1 RU МПК G03В 42/02. «Мобильный радиографический комплекс и источник излучения бетатронного типа для радиографического комплекса». Д. И. Зенков, Ю. П. Куропаткин, В. И. Нижегородцев, В. Д. Селемир, О. А. Шамро, БИ. 2015, № 11.

REVISED MOBILE ACCELERATOR BASED ON BETATRON OF BIM TYPE

O. A. Shamro, Yu. P. Kuropatkin, V. I. Nizhegorodtsev, I. N. Romanov, K. V. Savchenko, V. D. Selemir, E. V. Urlin, V. A. Fomichev, A. A. Chinin
Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia
E-mail: mailbox@ntc.vniief.ru

The paper concerns a revised mobile accelerator based on the betatron of a BIM type. The accelerator construction, time diagram of its separate system operation and oscillograms of the betatron output parameters are provided. The testing powering of the accelerator in a single frame and three-frame modes was carried out in 2021. The following test results have been obtained. The estimated boundary energy of an electron beam was 70 MeV. The current of an electron beam delivered to the betatron target was 80 A. The thickness of the lead test object examined with X-rays was 160 mm at 4 m from the tantalum target. The full width of the output gamma pulse at half maximum in a single-frame mode was equal to 120 ns. In a three-frame mode it was 200, 150 and 120 ns. The dimension of the radiation source was 6×3 mm. The dimension of the tantalum target was 6×6 mm. The application of the revised mobile accelerators within the radiographic complex [1] will allow increasing the investigation efficiency due to its output characteristics improvement and the optimization of the hydrodynamic experiments geometry.

References

1. Pat. 2548585 С1 RU МПК G03В 42/02. D. I. Zenkov, Yu. P. Kuropatkin, V. I. Nizhegorodtsev, V. D. Selemir, O. A. Shamro. "Mobile radiographic complex and radiation source of betatron type for radiographic complex". Bulletin of Inventions, vol. 11, 2015 (in Russian).

4-49

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ В УСЛОВИЯХ ПРОТЕКАНИЯ ЛАЗЕРНОИНИЦИИРУЕМЫХ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ

В. Г. Шевченко, Д. А. Еселевич, А. В. Конюкова
Институт химии твердого тела УрО РАН,
Екатеринбург, Россия
E-mail: shevchenko@ihim.uran.ru

Ранее нами показано, что использование формиатов переходных металлов (Mn, Fe, Co, Ni, Cu), а также гелей на основе пентоксида V, нанесенных на поверхность алюминиевых частиц, позволяет не только изменять реакционную активность Al, но и формировать на поверхности порошков металлическое или оксидное покрытие соответствующего металла. При последующем лазерном нагреве в этом случае протекают лазерно-иницированные химические реакции *in situ*. Термитная реакция, лежащая в основе процесса, дает дополнительную тепловую энергию. Лазерный нагрев резко увеличивает реакционную активность. При мощности лазера 400 Вт и площади пятна $0,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ плотность потока излучения составляет $5 \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2$. При такой плотности потока скорость нагрева может достигать величины более 10^7 К/сек .

В работе обсуждаются процессы и возможные механизмы их протекания в ходе селективного лазерного сплавления порошков на основе алюминия.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием Института химии твердого тела УрО РАН № АААА-А19-119031890028-0 (Структурное подразделение № 2)

Литература

1. Шевченко, В. Г. Окисление порошка АСД-4, модифицированного формиатами Mn, Fe, Co и Cu [Текст] / В. Г. Шевченко, В. Н. Красильников, Д. А. Еселевич, А. В. Конюкова // «Забабахинские научные чтения», сборник материалов XIV международной конференции. – Снежинск, 18–22 марта 2019 г. – С. 81.

SOME FEATURES OF SELECTIVE LASER ALLOYING OF ALUMINUM-BASED POWDER UNDER CONDITIONS OF LASER-INITIATED CHEMICAL REACTIONS

V. G. Shevchenko, D. A. Eselevich, A. V. Konyukova
Institute of Solid State Chemistry UB RAS,
Ekaterinburg, Russia
E-mail: shevchenko@ihim.uran.ru

We have previously shown that the use of transition metal formates (Mn, Fe, Co, Ni, Cu), as well as gels based on V pentoxide deposited on the surface of aluminum particles, makes it possible not only to change the reactivity of Al, but also to form a metallic or an oxide coating of

the corresponding metal. With subsequent laser heating, in this case, laser-initiated chemical reactions occur in situ. The thermite reaction underlying the process provides additional heat energy. Laser heating dramatically increases the reactivity. With a laser power of 400 W and a spot area of $0.8 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$, the radiation flux density is $5 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$. With such a flux density, the heating rate can reach more than 10^7 K/s .

This work discusses the processes and possible mechanisms of their occurrence in the course of selective laser alloying of powders based on aluminum.

The present work was performed in accordance with a state order to the Institute of Solid State Chemistry, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, № АААА-А19-119031890028-0 (structural unit no. 2).

References

1. Shevchenko, V. G. Oxidation of ASD-4 powder modified by Formate Mn, Fe, Co and Ni [Text] / V. G. Shevchenko, V. N. Krasilnikov, D. A. Eselevich, A. V. Koyukova // "Zababakhin Scientific Talks", Abstracts of XIV international conference. – Snezhinsk, 18–22 march 2019. – P. 81.

4-50

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СПЛАВА АК6, ПОЛУЧЕННОГО СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ СПЛАВЛЕНИЕМ

И. Г. Ширинкина¹, И. Г. Бродова¹, А. Н. Клёнов²,
Е. Б. Смирнов², Н. Ю. Орлова²,
В. В. Астафьев¹, Т. И. Яблонских¹

¹Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия

³Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Снежинск, Россия
E-mail: brodova@imp.uran.ru

Рассмотрено влияние физических и технологических характеристик 3D-печати на структуру и твердость СЛС образцов из сплава АК6. Сравнивали структуру и твердость сплошных образцов, синтезированных при мощности лазера ($P = 100$ и 200 Вт) и скорости сканирования ($V = 400$ – 950 мм/с) при постоянных диаметре пучка лазера (60 мкм) и толщине слоя порошка ($0,05 \text{ мм}$). Установлено, что $\text{HB} > 50$ имели образцы, синтезированные при $P = 200 \text{ Вт}$ и $V = 750$ – 900 мм/с , а наименьшая твердость ($\text{HB} = 23,7$) соответствовала образцам, полученным при $V = 400 \text{ мм/с}$ и $P = 100 \text{ Вт}$. Металлографические исследования структуры образцов выявили наличие дефектов, таких, как усадочные пустоты, горячие трещины и нерасплавленные частицы порошка. Получены экспериментальные данные, показывающие взаимосвязь геометрии построения не сплошных образцов с разным уровнем заполнения

(конфигурации пор) с их динамическими свойствами, измеренными при сжатии методом Гопкинсона–Кольского. С помощью программы ImageJ, построены гистограммы распределения количества пор по размерам в образцах с разным уровнем заполнения (разной плотности) и подсчитана их пористость. Установлено, что уменьшение плотности ($\rho = 2,44 \pm 1,18, \text{ г/см}^3$) соответствует повышению пористости от 3,4 до 32,1 % и снижению механических свойств: предела текучести в 3 раза, а предела прочности в 5 раз.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Структура», № АААА-А18-118020190116-6).

STRUCTURE AND PROPERTIES OF AK6 ALLOY PRODUCED BY SELECTIVE LASER MELTING

I. G. Shirinkina¹, I. G. Brodova¹, A. N. Klyonov²,
E. B. Smirnov², N. Yu. Orlova²,
V. V. Astaf'ev¹, T. I. Yablonskikh¹

¹M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

²Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

³Snezhinsk Institute of Physics and Technology National Research Nuclear University "MEPhI", Snezhinsk, Russia

E-mail: brodova@imp.uran.ru

The influence of the physical and technological characteristics of 3D–printing on the structure and hardness of the SLS samples from the AK6 alloy is considered. We compared the structure and hardness of compact samples synthesized at a laser power ($P = 100$ and 200 W) and a scanning speed ($V = 400$ – 950 mm/s) at a constant laser beam diameter ($60 \text{ }\mu\text{m}$) and a powder layer thickness (0.05 mm). It was found that $\text{HB} > 50$ had samples synthesized at $P = 200 \text{ W}$ and $V = 750$ – 900 mm/s , and the lowest hardness ($\text{HB} = 23.7$) corresponded to the samples obtained at $V = 400 \text{ mm/s}$ and $P = 100 \text{ W}$. Metallographic studies of the structure of the samples revealed the presence of defects, such as shrinkage voids, hot cracks, and unmelted powder particles. Experimental data have been obtained showing the relationship between the geometry of constructing of discontinuous samples with different filling levels (pore configurations) and their dynamic properties measured under compression by the Hopkinson–Kolsky method. Using the ImageJ program, histograms of pore size distribution were constructed in samples with different filling levels (different densities), and their porosity was calculated. It was found that a decrease in density ($\rho = 2.44$ – 1.18 g/cm^3) corresponds to an increase in porosity from 3.4 to 32.1% and a decrease in mechanical properties: the yield point is 3 times, and the ultimate strength is 5 times.

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme "Structure" No. АААА-А18-118020190116-6).

4-51

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИНХРОТРОННОЙ ДИАГНОСТИКИ

А. П. Яловец, Е. С. Шестаковская, Н. Л. Клиначева

Южно-Уральский государственный университет
(Национальный исследовательский университет),
Челябинск, Россия

E-mail: ialovetcap@susu.ru

Эксперименты с однократным и двукратным ударным сжатием вещества являются основой для построения уравнений состояния материалов при высоких давлениях. Появление методики регистрации явлений при помощи синхротронного излучения существенно расширили информативность о протекающих в экспериментах процессах.

Математическое моделирование ударно-волновых процессов с использованием результатов синхротронной регистрации открывает широкие возможности для построения или уточнения уравнений состояния конструкционных материалов. В данной работе построена математическая модель упругопластических течений среды на основе модели пластичности Прандтля–Рейса [1, 2]. Для численного решения предложенной математической модели использовался полуаналитический метод [3]. Восстановление плотности вещества вдоль луча синхротронного излучения и относительного поглощения проводилось с использованием методики [4]. Для апробации разработанного численного алгоритма проведено численное моделирование задачи в постановке, соответствующей экспериментам по одно- и двукратному сжатию полиметакрилата [5].

Литература

1. **Prandtl, L.** Spannungsverteilung in plastischen korper [Text] // Proc. 1st Int. Congr. Appl. Mech. Delft. – 1924. – P. 43.
2. **Рейс, А.** Учет упругой деформации в теории пластичности. Теория пластичности [Текст]. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1948. – 260 с.
3. **Яловец, А. П.** Расчет течений среды при воздействии интенсивных потоков заряженных частиц [Текст] // Прикладная механика и техническая физика. – 1997. – Т. 38, № 1. – С. 151–166.
4. Невозмущающие методы диагностики быстротекающих процессов [Текст] / Под. ред. д. т. н. А. Л. Михайлова. – Саров : ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ», 2015. – 322 с.
5. **Смирнов, Е. Б.** Исследование однократного и двукратного сжатия плексигласа и поликарбоната с применением синхротронного излучения [Текст] / Е. Б. Смирнов, Д. В. Петров, А. Ю. Гармашев, А. К. Музыря, С. М. Долгих // Физика взрыва: теория, эксперимент, приложения: Всеросс. конф., 2018.

NUMERICAL SIMULATION OF SHOCK-WAVE EXPERIMENTS USING SYNCHROTRONIC DIAGNOSTICS

A. P. Yalovets, E. S. Shestakovskaya, N. L. Klinacheva

South Ural State University (National research university),
Chelyabinsk, Russia

E-mail: ialovetcap@susu.ru

Experiments with single and double shock compression of matter are the basis for constructing equations of state for materials at high pressures. The emergence of a technique for registering phenomena using synchrotron radiation has significantly expanded the information content about the processes occurring in experiments.

Mathematical modeling of shock-wave processes using the results of synchrotron registration opens up wide opportunities for constructing or refining the equations of state for structural materials. In this work, a mathematical model of elastoplastic flows of a medium is built on the basis of the Prandtl–Reis plasticity model [1, 2]. For the numerical solution of the proposed mathematical model, a semi-analytical method was used [3]. Reconstruction of the density of matter along the synchrotron radiation beam and relative absorption was carried out using the technique [4]. To test the developed numerical algorithm, a numerical simulation of the problem was carried out in the formulation corresponding to experiments on one- and two-fold compression of polymethylmethacrylate [5].

References

1. **Prandtl, L.** Spannungsverteilung in plastischen korper [Text] // Proc. 1st Int. Congr. Appl. Mech. Delft. – 1924. – P. 43.
2. **Reis, A.** Accounting for elastic deformation in the theory of plasticity. The theory of plasticity [Text]. – M. : Foreign Literature Publishing House, 1948. – 260 p.
3. **Yalovets, A. P.** Calculation of medium flows under the influence of intense flows of charged particles [Text] // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 1997. – Vol. 38, No. 1. – P. 151–166.
4. Non-disturbing methods of diagnostics of fast-flowing processes [Text] / Under. ed. Doctor of Technical Sciences A. L. Mikhailov. – Sarov : FSUE RFNC – VNIIEF, 2015. – 322 p.
5. **Smirnov, E. B.** Investigation of single and double compression of plexiglass and polycarbonate using synchrotron radiation [Text] / E. B. Smirnov, D. V. Petrov, A. Yu. Garmashev, A. K. Muzyrya, S. M. Dolgikh // Physics of explosion: theory, experiment, applications: All-Russian. Conf., 2018.

Секция 5
НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ
И ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Section 5
SCIENTIFIC BASES OF NUCLEAR POWER
ENGINEERING AND NUCLEAR MATERIALS

5-1

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ УРАНИЛ(VI)-ПЕПТИДНЫХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ ПОМОЩИ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ И РАСЧЕТА ТФП

С. Ши, З. Цинь, Й. Рен, С. Ван, С. Ван

Институт материалов, Китайская академия инженерной физики, Китайская народная республика

E-mail: shisiwei@caep.cn

Понимание и оценка урана, являющегося наиболее важным материалом в военной и энергетической отраслях, имеет первостепенное значение с точки зрения безопасности. В недавнее время протеомические исследования показали, что связывание уранила (VI) с протеинами является ключевой ступенью в токсичности урана. Однако исследования структур уранил-протеиновых комплексов – немногочисленны. Вы этой работе мы мы проводим скрининг специфические уранил-пептидные комплексы при помощи масс-спектрометрии с ионизацией электрораспылением (ESI-MS) и расчетов по методике теории функционала плотности (ТФП), поскольку пептиды имеют аналогичную склонность к связыванию, но более простую структуру по сравнению с протеинами. Тандемная масс-спектрометрия демонстрирует структуру, реакции в газовой фазе и специфические нековалентные взаимодействия уранил-пептидных комплексов. Далее, квантовые расчеты подтверждают экспериментальные результаты. Результаты этого исследования отчасти иллюстрируют токсичность урана на молекулярном уровне и дают структурное объяснение взаимодействия уранила и пептидов/протеинов.

THE STRUCTURAL STUDY OF URANYL(VI) AND PEPTIDE COMPLEXES BY MASS SPECTROMETRY AND DFT CALCULATION

S. Shi, Z. Qin, Y. Ren, S. Wang, X. Wang

Institute of Materials, China Academy of Engineering Physics, P. R. China

E-mail: shisiwei@caep.cn

The understanding and assessment of uranium, which is the most significant material in military and energy industry, is of crucial importance for the safe consideration. Recently, the toxicity of uranium on organisms, and the proteomic studies have proven the binding of linear uranyl (VI) with proteins is the key step for the toxicity of uranium. However, there are limited studies regarding the structures of uranyl – protein complexes. In this work, we screens specific uranyl – peptide complexes by electrospray ionization mass spectrometry (ESI-MS) and density functional theory (DFT) calculations, since the peptides have similar binding affinity but simplified structure relative to proteins. The tandem mass spectrometry reveals the structure, gas-phase reactions and specific non-covalent interactions of uranyl – peptide complexes. Furthermore, the quantum calculation verifies the experimental results. The results of this research

partly illustrate the toxicity of uranium at the molecular level, and help to reveal the structural explanations of the recognition between uranyl and peptides/proteins.

5-2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОНОКЛОНАЛЬНЫХ АНТИТЕЛ, МАРКИРОВАННЫХ ^{89}Zr И ^{177}Lu , ДЛЯ ПЭТ-ДИАГНОСТИКИ И РАДИОТЕРАПИИ РАКА

Ся Ян^{1,2,3}, Цзин Ван^{1,2,3}, Пен Чжао¹, Лянан Чжо¹, Вэй Ляо¹, Янь Чжао³, Ючуань Ян¹, Шумин Пен¹¹Институт ядерной физики и химии, Китайская академия инженерной физики, Китайская академия инженерной физики, 621900, Мянъян, Китайская народная республика²Коллаборативный инновационный центр радиационной медицины Цзянсу, Высшие учебные заведения, 2151236 Сучжоу, Китайская народная республика³Ведущая лаборатория ядерной медицины и молекулярной визуализации провинции Сычуань, 621999, Мянъян, Китайская народная республика

E-mail: yangxia.youka@caep.cn

Введение. Моноклональные антитела в течение долгого времени использовались для терапии различных опухолей, таких как рак простаты, рак молочной железы, рак толстой кишки и др. Терапевтические антитела могут вызывать апоптоз раковых клеток или ингибировать их рост. Однако клиническая эффективность при использовании только антител была неудовлетворительной. Сочетание антител с другими терапевтическими препаратами, такими как радионуклиды, привлекает всё большее внимание. Антитела с радиоактивной меткой могут повреждать двойную спираль ДНК раковых клеток, что вызывает апоптоз и снижает возможность возникновения устойчивости к лекарствам. В силу подходящего периода полураспада и надлежащей величины выделения энергии, антитела, маркированные цирконием-89 (^{89}Zr) и лютецием-177 (^{177}Lu) широко использовались для ПЭТ-диагностики (съемки) и радиотерапии.

Методы. В этой работе моноклональные антитела, которые могли быть направлены на DR5, CA19-9 или EGFR были модифицированы при помощи p-SCN-Bn-DFO или p-SCN-Bn-DOTA. Далее антитела были маркированы при помощи ^{89}Zr и ^{177}Lu для улучшения эффективности диагностики и терапии колоректального рака и рака легких. Антитела с радиоактивной маркировкой были тщательно исследованы *in vitro* с точки зрения радиохимической чистоты и склонности к связыванию. Исследования *in vivo* были проведены с использованием ксенотрансплантатов опухолей и включали получение изображений ПЭТ/КТ, биораспределения и терапевтические исследования.

Результаты и обсуждение. Антитела ^{89}Zr -DFO и ^{177}Lu -DOTA продемонстрировали высокую усвояемость в соответствующих ксенотрансплантантах опухолей в соответствии с результатами микро-ПЭТ

съемки и биораспределения *in vivo*. Исследование терапевтического эффекта показало, что антитела ^{177}Lu -DOTA могут существенно ингибировать рост опухоли.

Выводы: Мы успешно подготовили антитела, маркированные ^{89}Zr и ^{177}Lu . Радио-антитела продемонстрировали высокий потенциал в диагностике рака и радиотерапии благодаря своим свойствам, таким как избирательная направленность и радиотоксичность.

^{89}Zr AND ^{177}Lu LABELED MONOCLONAL ANTIBODIES FOR CANCER TARGETING PET IMAGING AND RADIOTHERAPY

Xia Yang^{1,2,3}, Jing Wang^{1,2,3}, Peng Zhao¹, Liangang Zhuo¹, Wei Liao¹, Yan Zhao³, Yuchuan Yang¹, Shuming Peng¹

¹Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, 621900 Mianyang, PR China.

²Collaborative Innovation Center of Radiation Medicine of Jiangsu, Higher Education Institutions, 215123 Suzhou, PR China

³Key Laboratory of Nuclear Medicine and Molecular Imaging of Sichuan Province, 621999 Mianyang, PR China

E-mail: yangxia.youka@caep.cn

Introduction. Monoclonal antibodies have been used for the treatment of many tumors such as prostate cancer, breast cancer and colon cancer, et al., for a long time. The therapeutic antibodies could induce apoptosis in the tumor cells or inhibit the growth of tumor cells. However, the clinical efficacy was not satisfactory enough with the single used antibodies. The combination of antibodies with other therapeutic agents, such as radionuclides, attracted more and more attentions. Radio-labeled antibodies could damage the DNA double strain of the tumor cells to cause apoptosis and decrease the possibility of drug-induced resistance. Due to the suitable half-life and proper emission energy, antibodies labeled with zirconium-89 (^{89}Zr) and lutetium-177 (^{177}Lu) were widely used for PET imaging and radiotherapy, respectively.

Methods. In this study, a series of monoclonal antibodies that could target DR5, CA19-9, or EGFR were modified with p-SCN-Bn-DFO or p-SCN-Bn-DOTA. The antibodies were further labeled with ^{89}Zr and ^{177}Lu to improve the efficiency for diagnosis and treatment against colorectal cancer and lung cancer. The radio-labeled antibodies were thoroughly characterized in terms of radiochemical purity and binding affinity *in vitro*. *In vivo* PET/CT imaging, biodistribution and therapeutic effect studies were investigated using tumor xenografts.

Results and discussion: The ^{89}Zr -DFO-antibodies and ^{177}Lu -DOTA-antibodies showed high uptake in corresponding tumor xenografts according to the *in vivo* micro-PET imaging and biodistribution results. The therapeutic effect study proved that ^{177}Lu -DOTA-antibodies could inhibit tumor growth significantly.

Conclusions. We have successfully prepared the ^{89}Zr and ^{177}Lu labeled antibodies. The radio-antibodies showed high potential to be used for cancer diagnosis and radiotherapy for their specific targeting property and radiotoxicity.

5-3

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ СО СФЕРИЧЕСКИМИ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ РАЗМНОЖАЮЩИМИ СИСТЕМАМИ ИЗ ПЛУТОНИЯ

V. A. Adarchenko, D. V. Khmel'nitskiy, S. V. Samarina, L. S. Ershova, O. O. Rubtsova

Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия

E-mail: v.a.adarchenko@vniitf.ru, d.v.khmel'nitskiy@vniitf.ru, s.v.samarina@vniitf.ru, l.s.ershova@vniitf.ru, o.o.rubtsova@vniitf.ru

Работа посвящена решению одной из актуальных задач ядерной энергетики – созданию базы данных прецизионных интегральных экспериментов с плутониевыми системами. В докладе представлен расчетный анализ серии критмассовых и корреляционных интегральных экспериментов со сферическими и цилиндрическими системами из плутония. Дано краткое описание постановки опытов и расчетных моделей размножающих систем. Приведены результаты расчетного анализа экспериментов по определению критического на запаздывающих нейтронах состояния систем и опытов по измерению углов наклона постоянной спада, как функции параметра, определяющего критичность систем.

COMPUTATIONAL ANALYSIS OF INTEGRAL EXPERIMENTS WITH SPHERICAL AND CYLINDRICAL PLUTONIUM ASSEMBLIES

V. A. Adarchenko, D. V. Khmel'nitskiy, S. V. Samarina, L. S. Ershova, O. O. Rubtsova

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: v.a.adarchenko@vniitf.ru, d.v.khmel'nitskiy@vniitf.ru, s.v.samarina@vniitf.ru, l.s.ershova@vniitf.ru, o.o.rubtsova@vniitf.ru

This work is devoted to solving one of the important problems of nuclear power engineering - the creation of a database of precision integral experiments with plutonium assemblies. The report presents a computational analysis of a series of new critical mass and correlation integral experiments with spherical and cylindrical plutonium systems. A brief description of the setting up of experiments and computational models of critical assemblies is given. The results of a computational analysis of experiments to determine the critical state of assemblies on delayed neutrons and experiments on measuring the slope angles of the decay constant as a function of a parameter that determines the assemblies' criticality are presented.

5-4

РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ИСПЫТАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК ПАССИВНЫХ КАТАЛИТИЧЕСКИХ РЕКОМБИНАТОРОВ ВОДОРОДА

Е. В. Безгодов^{1,2}, В. М. Крюков¹, С. Д. Пасюков¹,
М. В. Никифоров¹, А. А. Тараканов¹,
И. А. Попов¹, Д. Л. Мошкин¹,
Ю. Ф. Давлетчин¹, В. А. Симоненко^{1,2}

¹Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²Снежинский физико-технический институт
Национального исследовательского ядерного университета
«МИФИ», Снежинск, Россия
E-mail: e.v.bezgodov@vniitf.ru

Одним из главных недостатков наиболее распространенных энергетических ядерных реакторов с легководным теплоносителем является опасность тяжелых аварий с осушением активной зоны, которое сопровождается выходом больших количеств водорода в помещения защитной оболочки. С целью уменьшения опасности взрыва в настоящее время применяются пассивные каталитические рекомбинаторы водорода (ПКРВ). Они предназначены для беспламенного окисления водорода до безопасных концентраций.

В настоящее время в России отсутствуют аттестованные методики испытаний, необходимые для проверки проектных характеристик установленных на российских АЭС рекомбинаторов водорода. Для разработки методики целесообразно применить зарубежный опыт, однако до сих пор не выработано единого и воспроизводимого на разных установках подхода к тестированию рекомбинатора.

Основная цель работы – разработка универсальных методик испытаний, которые позволяли бы испытывать в одной установке рекомбинаторы различных типов (размер корпуса, тип катализатора, массовое содержание катализатора и т. д.). Одновременно с этим методика испытаний должна быть применима на различных установках (по масштабу, по геометрической форме и др.), а результаты испытаний воспроизводимы (чтобы независимые исследователи могли проверить результаты).

Для этих целей в РФЯЦ – ВНИИТФ адаптируется установка БМ-П, состоящая из двух соединенных между собой камер объемом 15 м³ каждая. Поскольку требуется имитировать различные сценарии взаимодействия атмосферы с рекомбинатором – «покоящаяся» среда, опускные и подъемные потоки газа, то в установку были установлены специальные устройства, позволяющие циркулировать смесь в нужном режиме. В докладе приводится описание постановок испытаний и методов определения характеристик рекомбинаторов.

PAR CHARACTERISTICS ASSESSMENT TECHNIQUE DEVELOPMENT

E. V. Bezgodov^{1,2}, V. M. Kryukov¹, S. D. Pasyukov¹,
M. V. Nikiforov¹, A. A. Tarakanov¹, I. A. Popov¹,
D. L. Moshkin¹, Yu. F. Davletchin¹, V. A. Simonenko^{1,2}

¹Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear
Center – Zababakhin All-Russia Research Institute
of Technical Physics”

²Federal State Independent Educational Institution
“Snezhinsk Physics and Technology Institute
of the National Research Nuclear University MEPhI”

E-mail: e.v.bezgodov@vniitf.ru

One of the main drawbacks of the most common nuclear light-water reactors is the hazard of severe accident with reactor core dewatering, with the great amount of hydrogen released within the containment rooms. Passive Autocatalytic Recombiners (PARs) are used nowadays to decrease explosion hazard. They are intended to oxidize hydrogen without ignition, thus reducing its concentration to safe values.

At the moment there are no certified techniques in Russia needed to validate design characteristics of PARs installed at Russia's NPPs. In order to develop these techniques, it is reasonable to use foreign experience, but there is still no unified approach to PAR testing reproducible at various facilities.

The core objective of the work is to develop common techniques for PAR testing, that allowed PARs of various types (vessel size, catalyst type, catalyst weight content etc.) be tested within one facility. At the same time the method must be applicable for various facilities (with respect to the scale, geometry etc.) and the results must be reproducible (for independent researchers could verify the result).

For these purposes BM-D facility (Big mockup - durable) is customized in RFNC-VNIITF. It consists of the two chambers 15 m³ each. Special circulation devices were installed in the facility to provide opportunity to simulate various scenarios of interaction between the atmosphere and PARs (still environment, descending and ascending gas flows). Thus the fluid can circulate as intended. The work provides the description of the tests set-up and PAR characteristics assessment techniques.

5-5

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ «ПЛАВУЧИХ» И «ЯЧЕЙСТЫХ» ПЛАМЕН

И. В. Глазырин¹, Н. Б. Аникин¹, И. А. Кириллов²,
О. Г. Котова¹, Н. А. Михайлов¹, А. В. Павленко¹,
В. А. Симоненко¹, А. А. Тяктев¹, М. Н. Чижков¹

¹Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский
институт», Москва, Россия

Для решения задач водородной энергетики применяются методы вычислительной гидродинамики,

позволяющие как анализировать существующие экспериментальные данные, так и оценивать факторы риска водородных технологий, такие как тепловые нагрузки, избыточное давление при водородо-воздушном взрыве, длину воспламененной струи и подобное. Для применения численных методов необходимо подтверждать корректность расчетов сравнением с экспериментальными данными. Слабо исследованной областью является поведение водородовоздушной смеси вблизи нижнего концентрационного предела воспламенения водорода. Соответствующие эксперименты проводятся на установке МУТ [1] РФЯЦ – ВНИИТФ. Для численного моделирования используется программа Фокус [2], в которой учитывается вязкость, теплопроводность, гетерогенная модель горения, химические реакции. Транспортные коэффициенты рассчитаны НИЦ «Курчатовский институт». Трехмерное моделирование выполнено на динамически адаптируемой сетке, позволяющей разрешить мелкомасштабные структуры течения. Рассматривались обедненные смеси с объемным содержанием водорода от 6 до 16%. При низких концентрациях горение определяется диффузией недостающего водорода в зону реакции, и форма пламени близка к шарообразной. С течением времени пламя расширяется и всплывает в поле тяжести Земли, отчего за восходящими частями такого «плавающего» термика формируются нелинейные вихревые структуры с пульсациями скорости и давления. Структуры взаимодействуют с акустическими волнами, расходящимися от каждого элемента поверхности горения и отраженными от границ камеры. В результате взаимодействия трехмерной картины акустических волн с вихревыми структурами появляются вторичные термики. Расчеты скорости всплывания от времени и размер области горения удовлетворительно согласуются с экспериментом. При горении смесей с объемной долей водорода более 9% возникают пузыри (ячейки), характерные для дефлаграционного горения. В случае «ячеистого» пламени численная модель воспроизводит как скорость распространения, так и средний линейный размер ячеек на фронте пламени. Обсуждается влияние химических процессов в рамках модели так называемых «шаров Зельдовича», а также развитие различных неустойчивостей фронта пламени: диффузионно-тепловой, Рэлея–Тейлора и Дарье–Ландау.

Литература

1. **Аникин, Н. Б.** Плавающие и ячеистые пламена в смесях от 4 до 16% H₂ с воздухом [Текст] / Н. Б. Аникин, А. А. Тяктев, Ю. А. Пискунов, И. Л. Бугаенко, А. В. Павленко // Научная сессия НИЯУ МИФИ по направлению «Моделирование физических и технологических процессов» 22–24 декабря. – Снежинск, 2020.
2. **Глазырин, И. В.** Конечно-объемная схема для многокомпонентных течений на неструктурированной сетке в трехмерной программе Фокус [Текст] / И. В. Глазырин, Н. А. Михайлов // ЖВМиМФ. – 2021. – Т. 61, № 6. – С. 135–149.

MODELING THE PROPAGATION OF “FLOATING” AND “CELLULAR” FLAMES

I. V. Glazyrin¹, N. B. Anikin¹, I. A. Kirillov²,
O. G. Kotova¹, N. A. Mikhailov¹, A. V. Pavlenko¹,
V. A. Simonenko¹, A. A. Tyaktev¹, M. N. Chizhkov¹

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

²National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, Russia

To solve the problems of hydrogen energy, computational fluid dynamics methods are used, which allow both analyzing existing experimental data and evaluating the risk factors of hydrogen technologies, such as thermal loads, overpressure during a hydrogen-air explosion, the length of the ignited jet, and the like. To apply numerical methods, it is necessary to confirm the correctness of calculations by comparing them with experimental data. A poorly studied area is the behavior of the hydrogen-air mixture near the lower concentration limit of hydrogen ignition. The corresponding experiments are carried out at the MUT facility [1] of the RFNC – VNIITF. For numerical modeling, the Focus code [2] is used, which takes into account viscosity, thermal conductivity, heterogeneous combustion model, and chemical reactions. Transport coefficients have been calculated at the National Research Center “Kurchatov Institute”. Three-dimensional modeling is performed on a dynamically adaptable grid that allows resolving small-scale flow structures. Depleted mixtures with a volumetric hydrogen content of 6 to 16% were considered. At low concentrations, combustion is determined by the diffusion of the missing hydrogen into the reaction zone, and the flame shape is close to spherical. Over time, the flame expands and floats up in the Earth gravity field, which is why a nonlinear vortex structures with velocity and pressure pulsation are formed behind the ascending parts of such a “floating” termic. The structures interact with acoustic waves formed on every elements of combustion surface and reflected from the chamber boundary. As a result of the 3D zone of acoustic waves interaction with the vortex structures secondary termics appear. Calculations of the ascent rate versus time and the size of the combustion region are in satisfactory agreement with experiment. When burning mixtures with a hydrogen volume fraction of more than 9%, bubbles (cells) appear, which are characteristic of deflagration combustion. In the case of a “cellular” flame, the numerical model reproduces both the propagation velocity and the average linear size of the cells at the flame front. The influence of chemical processes within the framework of the so-called “Zeldovich balls” model as well as the development of various instabilities of the flame front: diffusion-thermal, Rayleigh–Taylor, Darier–Landau, are discussed.

References

1. **Anikin, N. B.** Floating and cellular flames in mixtures from 4 to 16% H₂ with air [Text] / N. B. Anikin, A. A. Tyaktev, Yu. A. Piskunov, I. L. Bugaenko, A. V. Pavlenko // Scientific session of the MEPhI Research Institute in the direction of “Model-

ing of physical and technological processes”, December 22–24. – Snezhinsk, 2020.

2. **Glazyrin, I. V.** Finite-Volume Scheme for Multicomponent Compressible Flow on Unstructured Meshes in the Focus 3D Code [Text] / I. V. Glazyrin, N. A. Mikhailov // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2021. – Vol. 61, No. 6. – P. 1015–1029.

5-6

ОБНАРУЖЕНИЕ ПРИЗНАКОВ НАРУШЕНИЙ ГОСУДАРСТВОМ-ИМПОРТЕРОМ БЫСТРОГО РЕАКТОРА С ЗАМКНУТЫМ ЯТЦ СВОИХ ОБЯЗАТЕЛЬСТВ ПО ЯДЕРНОМУ НЕРАСПРОСТРАНЕНИЮ

Н. В. Горин¹, А. Л. Карманов¹, В. Н. Первиненко¹,
В. В. Власов¹, Н. А. Теплых¹, В. П. Кучинов²,
А. Н. Чебесков³, В. В. Шидловский⁴

¹Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия

³ГНЦ РФ-ФЭИ им. А. И. Лейпунского, Обнинск, Россия

⁴АО «Прорыв», Москва, Россия

Показана неизбежность развития атомной энергетики на быстрых нейтронах с замкнутым ЯТЦ [1] и связанные проблемы ядерного нераспространения [2, 3]. Отмечено, что отработаны механизмы обнаружения тайных ядерных испытаний [4, 5]. Обсуждена возможность государства, импортировавшего реактор на быстрых нейтронах с предприятиями замкнутого топливного цикла, нарушить режим ядерного нераспространения и втайне использовать полученное оборудование, технологии и ядерные материалы для создания ядерного оружия. Предполагается, что наиболее вероятным развитием событий может стать сочетание государством-импортером тайного и явного сценария. Тайного – для подготовительного периода создания неядерных компонентов ядерного устройства, накопления нужного опыта и знаний и получение нужного количества ядерного материала оружейного качества. Явного – для проведения испытаний созданного устройства и его тиражирования. Рассмотрены возможные инструменты обнаружения признаков нарушения режима ядерного нераспространения, включающие применение в государстве-импортере гарантий МАГАТЭ, а также использование Россией информационных технологий. Для реализации последнего предложен инструментарий сбора, технологии хранения и обработки открытой информации, подходы к автоматизированному анализу неструктурированных и аудиовизуальных данных с использованием современных технологий искусственного интеллекта. Показана возможность использования этого инструментария для обнаружения признаков нарушений режима ядерного нераспространения государством-импортером реактора на быстрых нейтронах с установками ЗЯТЦ.

Литература

1. **Горин, Н. В.** Атомная энергетика в национальных проектах России [Текст] / Н. В. Горин, А. А. Екидин, О. С. Головихина // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2021. – № 1. – С. 5–15. DOI 10.26583/npe.2021.1.01
2. **Аврорин, Е. Н.** Режим нераспространения и экспортный контроль [Текст] / Е. Н. Аврорин, Ю. И. Чуриков // Атомная энергия. – 2018. – Т. 124, вып. 1. – С. 42–46.
3. **Горин, Н. В.** Обеспечение режима ядерного нераспространения при экспорте реакторов на быстрых нейтронах с замкнутым топливным циклом [Текст] / Н. В. Горин, Н. П. Волошин, Ю. И. Чуриков, А. Н. Чебесков, В. П. Кучинов, А. П. Васильев, А. В. Моисеев, С. Ф. Шепелев, Д. А. Скворцов, С. И. Журин, В. В. Шидловский, А. В. Кривцов // Атомная энергия. – 2021. – Т. 130, вып. 1. – С. 48–51.
4. **Горин, Н. В.** Компьютерный тренажер для обучения международных инспекторов поиску следов скрытых ядерных испытаний [Текст] / Н. В. Горин, Н. П. Волошин, Ю. И. Чуриков, А. В. Климов, А. А. Корнеев // Атомная энергия. – 2016. – Т. 120, вып. 4. – С. 237–240.
5. **Беляев, С. Т.** Использование вертолетного нейтронного детектора для обнаружения ядерных боеголовок в советско-американском эксперименте на Черном море [Текст] / С. Т. Беляев, В. И. Лебедев, Б. А. Обиняков и др. // Наука и всеобщая безопасность. – 2009. – 17:186–193.

DETECTION OF VIOLATIONS OF NUCLEAR NONPROLIFERATION OBLIGATIONS BY STATE IMPORTER OF CLOSED FUEL CYCLE FAST REACTOR

N. V. Gorin¹, A. L. Karmanov¹, V. N. Pervinenko¹,
V. V. Vlasov¹, N. A. Teplykh¹, V. P. Kuchinov²,
A. N. Chebeskov³, V. V. Shidlovsky⁴

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

²National Research Nuclear University “MEPhI”,
Moscow, Russia

³A. I. Leypunsky Institute for Physics and Power Engineering,
Obninsk, Russia

⁴JSC “Proryv”, Moscow, Russia

The paper states the inevitable development of closed CFC fast neutron nuclear energetics [1] and related nuclear nonproliferation problems [2, 3]. It is noted that mechanisms of surveying traces of clandestine nuclear tests have been refined [4, 5]. A possibility is discussed for a state-importer of fast-neutron reactor with closed fuel cycle enterprises to violate the nuclear nonproliferation regime and to use the imported equipment, technologies and nuclear materials for nuclear weaponization. The most probable course of events is assumed to be a combination of clandestine and explicit scenarios of the importer-state actions. The clandestine scenario implies a preparatory period of creation of nuclear facility non-nuclear components, accumulation of requisite knowledge and experience, and import of the required quantity of weapons-grade nuclear material. The explicit scenario implies testing of the created device and its replication. Considered are potential instruments for detecting the

evidence of violation of the nuclear nonproliferation regime, including the application of IAEA safeguards in the importer-state, and the usage of information technologies by Russia. To implement the latter, the instrumentation for open information acquisition, storage, and processing is proposed, as well as approaches for automated analysis of unstructured and audiovisual data using modern artificial intelligence technologies. This instrumentation is shown to be applicable for detecting the evidence of violation of the nuclear nonproliferation regime by the state importer of the fast-neutron reactor with closed NFC facilities.

References

1. **Gorin, N. V.** Atomic Energetics in Russia National Projects [Text] / N. V. Gorin, A. A. Ekidin, O. S. Golovikhina // *Izvestiya Vuzov. Yadernaya Energetika.* – 2021. – No 1. – С. 5–15. DOI 10.26583/pre.2021.1.01
2. **Avrorin, E. N.** Nonproliferation Regime and Export Control [Text] / E. N. Avrorin, Yu. I. Churikov // *Atomic Energy.* – 2018. – Vol. 124, No 1. – P. 42–46.
3. **Gorin, N. V.** Searching for Ways of Achieving Compliance with the Nuclear Nonproliferation Regime During Export of Closed Fuel Cycle Fast Neutron Reactors [Text] / N. V. Gorin, N. P. Voloshin, Yu. I. Churikov, A. N. Chebeskov, V. P. Kuchinov, A. P. Vasilyev, A. V. Moiseev, S. F. Shepelev, D. A. Skvortsov, S. I. Zhurin, V. V. Shidlovsky, A. V. Krivtsov // *Atomic Energy.* – 2021. – Vol. 130, No 1. – P. 48–51.
4. **Gorin, N. V.** Computer Simulator to Train International Inspectors to Survey Traces of Clandestine Nuclear Tests [Text] / N. V. Gorin, N. P. Voloshin, Yu. I. Churikov, A. V. Klimov, A. A. Korneev // *Atomic Energy.* – 2016. – Vol. 120, No 4. – P. 237–240
5. **Belyaev, S. T.** Usage of Helicopter Neutron Detector for Nuclear Warhead Detection During Soviet-American Experiment on the Black Sea [Text] / S. T. Belyaev, V. I. Lebedev, B. A. Obinyakov, et al. // *Nauka i Vseobshaya Bezopasnost.* – 2009. – 17:186–193.

5-7

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕЖИМА ЯДЕРНОГО НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИ ЭКСПОРТЕ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ С ЗАМКНУТЫМ ЯТЦ

Н. В. Горин¹, Е. В. Кузнецов¹, Н. П. Волошин¹,
Ю. И. Чуриков¹, А. Н. Чебесков², В. П. Кучинов³,
Е. О. Адамов⁴, В. В. Шидловский⁴

¹Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²ГНЦ РФ – ФЭИ им. А. И. Лейпунского, Обнинск, Россия

³НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия

⁴АО «Прорыв, Москва, Россия

В настоящее время энергоносители – это основной товар на международных рынках, с которыми связаны наиболее острые международные проблемы, как, например, из-за газопровода «Северный поток-2». Вполне возможно, что через несколько десятилетий

использование нефти и газа уменьшится из-за истощения запасов или будет законодательно ограничено из-за экологических угроз [1].

Активно развивающиеся сегодня генерации на ВИЭ (ветер, солнце, гидроэнергетика) имеют свои ограничения и не смогут стать основными для целого ряда стран, в том числе и в РФ. Тогда основным энергоносителем останется уран, но не для открытого топливного цикла на уране-235, а для замкнутого с использованием урана-238 в реакторах на быстрых нейтронах. В течение ближайших десятилетий возможно начало экспорта быстрых реакторов с замкнутым ядерным топливным циклом в страны, не обладающие ядерным оружием, что потребует усиления режима нераспространения и повышения эффективности гарантий МАГАТЭ [2, 3].

Они могут быть достигнуты совершенствованием системы учета и контроля ядерных материалов и надежностью их физической защиты. Известно, что существующие в настоящее время погрешности системы учета и контроля не гарантируют выполнения режима нераспространения. Предстоит оценить достижимые погрешности и определить необходимые для этого сроки и трудозатраты так, чтобы система учета и контроля позволяла делать вывод о несанкционированном вмешательстве в процесс переработки топлива и, следовательно, о соблюдении/нарушении режима нераспространения. Система физической защиты ядерного материала более подготовлена к контролю режима нераспространения, однако необходимы дополнительные исследования ее устойчивости на территории государства-импортера.

Отмечено, что отработаны механизмы обнаружения тайных ядерных испытаний [4, 5].

Рассмотрены особенности выполнения режима ядерного нераспространения при экспорте Россией быстрых реакторов с замкнутым ЯТЦ для двух вариантов – с возвратом ОЯТ на переработку в Россию и переработкой на месте на предприятиях замкнутого ЯТЦ, приобретенных страной-импортером вместе с быстрым реактором.

Показано, что при возврате ОЯТ на переработку в Россию режим ядерного нераспространения полностью выполняется и возможностей существующих систем физической защиты и гарантий МАГАТЭ вполне достаточно, что подтверждается многолетней практикой экспорта российских ВВЭР с возвратом ОЯТ в Россию.

Литература

1. **Горин, Н. В.** Атомная энергетика в национальных проектах России [Текст] / Н. В. Горин, А. А. Екидин, О. С. Головихина // *Известия вузов. Ядерная энергетика.* – 2021. – № 1. – С. 5–15. DOI 10.26583/pre.2021.1.01
2. **Аврорин, Е. Н.** Режим нераспространения и экспортный контроль [Текст] / Е. Н. Аврорин, Ю. И. Чуриков // *Атомная энергия.* – 2018. – Т. 124, вып. 1. – С. 42–46.
3. **Горин, Н. В.** Обеспечение режима ядерного нераспространения при экспорте реакторов на быстрых нейтронах с замкнутым топливным циклом [Текст] / Н. В. Горин, Н. П. Волошин, Ю. И. Чуриков, А. Н. Чебесков, В. П. Кучинов,

А. П. Васильев, А. В. Моисеев, С. Ф. Шепелев, Д. А. Скворцов, С. И. Журиин, В. В. Шидловский, А. В. Кривцов // *Атомная энергия*. – 2021. – Т. 130, вып.1. – С. 48–51.

4. **Горин, Н. В.** Компьютерный тренажер для обучения международных инспекторов поиску следов скрытых ядерных испытаний» [Текст] / Н. В. Горин, Н. П. Волошин, Ю. И. Чуриков, А. В. Климов, А. А. Корнеев // *Атомная энергия*. – 2016. – Т. 120, вып. 4. – С. 237–240.

5. **Беляев, С. Т.** Использование вертолетного нейтронного детектора для обнаружения ядерных боеголовок в советско-американском эксперименте на Черном море [Текст] / С. Т. Беляев, В. И. Лебедев, Б. А. Обиняков и др. // *Наука и всеобщая безопасность*, 17:186-193, 2009.

ENSURING NUCLEAR NONPROLIFERATION REGIME WHEN EXPORTING CFC FAST REACTORS

N. V. Gorin¹, E. V. Kuznetsov¹, N. P. Voloshin¹,
Yu. I. Chyurikov¹, A. N. Chebeskov², V. P. Kuchinov³,
E. O. Adamov⁴, V. V. Shidlovsky⁴

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

²A. I. Leypunsky Institute for Physics and Power Engineering, Obninsk, Russia

³NRNU MEPhI, Moscow, Russia

⁴JSC “Proryv”, Moscow, Russia

Nowadays, energy carriers as the main products in international markets are of primary international concerns, such as related to gas pipeline Nord Stream-2. In a few decades, the consumption of oil and gas is very likely to be reduced due to the depletion of fossil energy reserves and, probably, will be legally limited due to environmental threats [1].

Actually, intensively developing renewable energy sources, such as hydropower, wind and solar power, have their own limitations and cannot be used as major energy source in a wide range of countries including Russia. Thus, uranium will come out as the major energy source, not as uranium-235 in open fuel cycle, but as uranium-238 in closed fuel cycle implemented in fast neutron reactors. The next few decades would probably be marked by the beginning of CFC fast neutron reactors export to the countries that do not possess nuclear weapons, therefore, requiring enhancing nonproliferation regime and improving the efficiency of the IAEA assurances [2, 3].

The above can be reached through improving nuclear materials control and accounting system and enhancing reliability of nuclear materials physical protection. It is known that current inaccuracies of the control and accounting system do not assure nonproliferation regime. The attainable inaccuracies have to be determined, and relevant time and labor costs to achieve such inaccuracies have to be estimated so as the control and accounting system would allow making a conclusion about unauthorized intervention into fuel recycling process, and, thus, if nonproliferation regime is ensured or not. Nuclear materials physical protection system is more developed as applied to nonproliferation control, however, its stability

and reliability within importing state’s territory should be additionally studied.

It is noted that the mechanisms of detecting undisclosed nuclear tests have been worked-up [4, 5].

The work reviews the features of ensuring nuclear nonproliferation when exporting Russian CFC fast reactors. Here, two scenarios are possible: SNF return to Russia for reprocessing and onsite SNF reprocessing in CFC facilities purchased by the importing state along with a fast neutron reactor.

It is shown that when SNF is returned to Russia for reprocessing, nonproliferation regime is implemented in full scope, the capabilities of current physical protection systems and the IAEA safeguards being well sufficient. This is confirmed by many years of practice of exporting Russian WWERs with SNF return to Russia.

References

1. **Gorin, N. V.** Atomic Energetics in Russia National Projects [Text] / N. V. Gorin, A. A. Ekin, O. S. Golovikhina // *Izvestiya Vuzov. Yadernaya Energetika*. – 2021. – No 1. – С.5–15. DOI 10.26583/pre.2021.1.01
2. **Avrorin, E. N.** Nonproliferation Regime and Export Control. [Text] / E. N. Avrorin, Yu. I. Churikov // *Atomic Energy*. – 2018. – Vol. 124, No. 1. – P. 42–46.
3. **Gorin, N. V.** Searching for Ways of Achieving Compliance with the Nuclear Nonproliferation Regime During Export of Closed Fuel Cycle Fast Neutron Reactors [Text] / N. V. Gorin, N. P. Voloshin, Yu. I. Churikov, A. N. Chebeskov, V. P. Kuchinov, A. P. Vasilyev, A. V. Moiseev, S. F. Shepelev, D. A. Skvortsov, S. I. Zhurin, V. V. Shidlovsky, A. V. Krivtsov // *Atomic Energy*. – 2021. – Vol. 130, No. 1. – P. 48–51.
4. **Gorin, N. V.** Computer Simulator to Train International Inspectors to Survey Traces of Clandestine Nuclear Tests [Text] / N. V. Gorin, N. P. Voloshin, Yu. I. Churikov, A. V. Klimov, A. A. Korneev // *Atomic Energy*. – 2016. – Vol. 120, No. 4. – P. 237–240
5. **Belyaev, S. T.** Usage of Helicopter Neutron Detector for Nuclear Warhead Detection During Soviet-American Experiment on the Black Sea [Text] / S. T. Belyaev, V. I. Lebedev, B. A. Obinyakov, et al. // *Nauka i Vseobshaya Bezopasnost*. – 2009. – 17:186–193.

5-8

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ И ДИНАМИКИ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИ РАСШИРЯЮЩИХСЯ
УЛЬТРАБЕДНЫХ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ
ПЛАМЕН В УЗКОМ
ГОРИЗОНТАЛЬНОМ КАНАЛЕ**

В. П. Денисенко¹, С. С. Кингсеп¹, И. А. Кириллов¹,
А. С. Мелихов², В. Ю. Плаксин³

¹Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, Москва, Россия

³Кинтех Лаб, Москва, Россия

E-mail: kirillov_ia@nrcki.ru

В аварийных условиях пламя может распространяться не только через трехмерные водородно-воздушные облака в свободных или загороженных пространствах защитной оболочки, но и через тонкие каналы. Технологические щели в оборудовании (например, межэлектродный зазор в топливном элементе), зазоры между соседними конструктивными элементами, трещины в стенах могут быть путями распространения пламени и могут способствовать возникновению пожара или повышению риска взрыва. В отличие от распространения пламени в трубках пламя в тонких плоских каналах недостаточно изучено. Распространение свободного ультрабедного водородно-воздушного пламени изучалось в горизонтальном закрытом узком (толщина 4 мм) щелевом канале (модифицированная ячейка Хеле–Шоу), чтобы минимизировать влияние силы тяжести.

Переход от дрейфующих шаровых пламен к дефлаграции при повышении начальной концентрации водорода в смеси можно характеризовать тремя наблюдаемыми и измеримыми признаками – структурными и морфологическими. С точки зрения микроскопической структуры это: 1) рождение и распад самозатухающих дрейфующих огненных шаров, 2) рождение, устойчивое распространение самоподдерживающихся дрейфующих шаров пламени и их гашение у боковой стенки испытательного сосуда, 3) рождение и лавинообразное распространение наружу саморазветвляющихся дрейфующих огненных шаров. С макроскопической морфологической точки зрения – конкурентная эволюция системы распространяющихся наружу дрейфующих шаровых пламен приводит к трем основным формам следов пламени (морфотипам): 1) лучевой, 2) дендритной, 3) квазинепрерывной. Предложены два интегральных количественных показателя для характеристики 2-мерного ультрабедного пламени: 1) детерминированный – доля сгоревшего водорода и 2) статистический – фрактальная размерность. Обнаружено, что их зависимости от начальной концентрации водорода в водородно-воздушной смеси симбатны. Точка перегиба на обеих кривых соответствует микроскопическому переходу от самоподдерживающихся к саморазветвляющимся

дрейфующим шаровым пламенам и макроскопическому переходу от «лучевой» к «дендритной» морфологии. Ячеистые пламена можно рассматривать как систему саморазветвляющихся дрейфующих шаровых пламен.

Более глубокое понимание и количественные характеристики феномена перехода от шаровых пламен к дефлаграции может быть получены путем экспериментов со свободными трехмерными ультрабедными пламенами в широких трубах в условиях земной гравитации, которые были качественно описаны столетие назад.

**SHAPE AND DYNAMICS OF CYLINDRICALLY
EXPANDING ULTRALEAN HYDROGEN-AIR
FLAMES STUDIED IN THE EXPERIMENTS IN
A NARROW HORIZONTAL CHANNEL**

V. P. Denisenko¹, S. S. Kingsep¹, I. A. Kirillov¹,
A. S. Melikho², V. Yu. Plaksin³

¹National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia,

²Federal State Budgetary Establishment “All-Russian Research Institute for Fire Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters”, Balashikha, Russia

³KintechLab, Moscow, Russia

E-mail: kirillov_ia@nrcki.ru

In an emergency, a flame can propagate not only through three-dimensional (3D) hydrogen-air clouds in free or enclosed spaces of the shell but through thin channels. Technological slots in the equipment (e. g., an inter-electrode gap in a fuel element), gaps between adjacent structural components, cracks in the walls may become pathways of the flame propagation and contribute to the fire initiation or increase the risk of explosion. Unlike the flame propagation in tubes, the flame in thin two-dimensional channels has not been sufficiently studied yet. Propagation of a free ultralean hydrogen-air flame was investigated in a horizontal closed narrow (4-mm thick) slot channel (modified Hele–Shaw cell) to minimize the gravity effect.

The transition from drifting ball flames to deflagration, as the initial concentration of hydrogen in mixture increases, can be characterized by three observed and measured criteria, structural and morphological ones. As for the microscopic structure, they include: initiation and decomposition of self-extinguishing drifting fire balls, initiation and stable propagation of self-sustained drifting fire balls, and their extinguishing near the side wall of a test vessel, initiation and outward avalanche-like propagation of self-branching drifting fire balls. From the macroscopic morphological point of view, a competitive evolution of the outward propagating drifting spherical flames results in three basic shapes of the flame traces (morphotypes): radial, dendritic, and quasicontinuous. Two integrated quantitative parameters to characterize a two-dimensional (2D) ultralean flame were proposed: a deterministic one implying the fraction of burnt hydrogen and a statistical one implying the fractal dimension.

It has been found that dependencies of these parameters on the initial concentration of hydrogen in the hydrogen-air mixture are similar. The inflection point on both curves corresponds to the microscopic transition from self-sustained to self-branching drifting spherical flames, as well as to the macroscopic transition from “radial” to “dendritic” morphology. Cellular flames can be considered as a system of self-branching drifting ball flames.

An improvement in our understanding of the ball flames-to-deflagration transition phenomenon and its quantitative characteristics can be achieved in the experiments with 3D free ultralean flames in the wide tubes under normal gravity conditions that were described in details hundred years ago.

5-9

**О ПЕРЕХОДЕ ОТ ШАРОВЫХ ПЛАМЕН
К ДЕФЛАГРАЦИИ
В СМЕСЯХ ВОДОРОД-ВОЗДУХ**

И. А. Кириллов

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

Горение ультрабедных смесей водорода с воздухом характеризуется двумя явлениями: разницей в пределах концентрации распространения пламени вверх и вниз и неполным сгоранием. Пока нет четких ответов на два основных вопроса: что есть причина и каков механизм их проявления?

В обзоре поставлена задача и описаны основные темы экспериментальных и расчетно-теоретических исследований явления перехода от шаровых пламен к дефлаграции (ПШПД) при повышении начальной концентрации водорода в газовых водородно-воздушных смесях.

Кратко описаны – история исследований по данной теме и эмпирическая концепция фундаментальных концентрационных пределов, которая различает две основные низкоскоростные ламинарные схемы горения – самораспространяющиеся локально плоские фронты горения и дрейфующие локально сферические шары пламени.

Предложен общий механизм ПШДШ. Ключевыми элементами механизма ПШДШ как для 2-х, так и для 3-дневного горения являются следующие. Локально сферические «ведущие центры» (дрейфующие шаровые пламена) являются «элементарными строительными блоками» всех ультра-обедненных пламен. Система дрейфующих шаров пламени образуется за счет первичного раздвоения ядра предпламени сразу после зажигания. Последующая взаимная динамика и общая морфология ультраобедненного пламени регулируются конкурентными нелокальными взаимодействиями отдельных дрейфующих шаров пламени и их вторичных/третичных/и т. д. бифуркации, определяемые исходной стехиометрией.

**ON THE BALL FLAMES-TO-DEFLAGRATION
TRANSITION IN HYDROGEN-AIR MIXTURES**

I. A. Kirillov

National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

Burning of ultralean hydrogen-air mixtures is characterized by two phenomena: difference in concentration limits of upward and downward flame propagation and incomplete combustion. There are still no clear answers to the following basic questions: what are the reason and the mechanism of their action?

The review poses the problem and describes the main subjects of the experimental and computational-theoretical research on the ball flames-to-deflagration transition with increased initial concentration of hydrogen in hydrogen-air mixtures.

This work describes the history of studies on the topic and ab initio concept of the fundamental concentration limits that makes a distinction between two main low-velocity laminar schemes of combustion: self-propagating locally flat combustion fronts and locally drifting balls of flames.

A general mechanism of the ball flames-to-deflagration transition is proposed. The main parameters of the ball flames-to-deflagration transition mechanism for both two-day and three-day periods of combustion are presented below. Locally spherical “leading centers” (drifting ball flames) are “elementary structural components” of all ultralean flames. The system of drifting ball flames is generated due to a primary bifurcation of a pre-flame nucleus just after initiation. The subsequent mutual dynamics and common morphology of an ultralean flame are controlled by the competing nonlocal interactions between the individual drifting balls of flames and their secondary/ tertiary/ etc. bifurcations defined by the initial stoichiometry.

5-10

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ ПОВЫШЕНИЯ
БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
СОВРЕМЕННЫХ РЕАКТОРОВ**

Е. И. Курбатова¹, А. И. Ксенофонтов², Д. А. Савин²

¹Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

E-mail: elkur@km.ru

Развитие исследований, направленных на решение вопросов безаварийной эксплуатации объектов ядерной энергетики, остаются наиболее приоритетными в связи с повышением энергонагруженности функциональных материалов реакторов различного типа.

Так, например основные требования к материалам, используемым в реакторе ДЭМО, более жесткие, чем для реактора ИТЭР. В первую очередь это относится к рабочим температурам в (650–700°C), которые существенно выше по сравнению с ИТЭР (300–550°C).

В представленной работе исследуются вопросы повышения эксплуатационных свойств хромистых феррито-мартенситных сталей за счет формирования в структуре их поверхности субструктурных зон со специальными свойствами. В настоящее время хромистые стали рассматриваются как один из основных конструкционных материалов гелий охлаждаемого blankets ДЭМО с керамическим бридером.

Формирование субструктурных зон в модельных сталях зон проводили, используя вакуумно-дуговые технологии. С помощью комплекса программного обеспечения исследовано влияние вторичного облучения нейтронами и альфа-частицами на свойства сформированных зон.

Распределение пространственного тепловыделения было рассчитано в плоской геометрии для величины флюенса 1,0 нейтрон/см², падающего по нормали к поверхности стали с субструктурными зонами различного состава. Показано, что пространственные тепловыделения зависят от состава зон.

В основе расчета характеристик взаимодействия альфа-частиц с материалами поверхностных сплавов различного состава была использована модель Линдхарда, разработан алгоритм и программа, реализующая метод Монте-Карло.

Исследовались свойства образцов сталей с поверхностными субструктурными зонами методами физико-химического анализа: микроструктурный, рентгенофазовый анализ, ЯГР спектроскопия и другие.

Результаты исследования данного этапа показали перспективность дальнейшего развития этого направления.

Литература

1. **Цыбин, А. С.** Физические основы плазменной и лазерной технологий [Текст]. – М. : МИФИ, 2002.
2. **Ksenofontov, A. I.** Synthesis of New Material Compositions with Special Properties under Impact-Dynamic Conditions [Text] / A. I. Ksenofontov, V. A. Klimanov, E. I. Kurbatova, V. L. Romodanov, S. A. Sobko, Yu. G. Smirnov, J. L. Regens // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 2008. – 69, 9, 2252–2254.

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF PROBLEMS OF IMPROVING THE SAFETY OF OPERATION OF FUNCTIONAL MATERIALS OF MODERN REACTORS

E. I. Kurbatova¹, A. I. Ksenofontov², D. A. Savin²

¹Nuclear safety institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russia

E-mail: elkur@km.ru

The development of research aimed at solving the problems of trouble-free operation of nuclear power facilities remains the highest priority due to the increased energy load of functional materials of various types of reactors.

For example, the basic requirements for materials used in the DEMO reactor are more stringent than for the ITER reactor. First of all, this applies to operating temperatures in (650–700°C), which are significantly higher compared to ITER (300–550°C).

In the present paper, the issues of improving the operational properties of chromium ferrite-martensitic steels due to the formation of substructural zones with special properties in the structure of their surface are investigated. Currently, chromium steels are considered as one of the main structural materials of the helium-cooled DEMO blanket with a ceramic breeder.

The formation of substructural zones in model zone steels was carried out using vacuum-arc technologies. The influence of secondary irradiation by neutrons and alpha particles on the properties of the formed zones was studied using a software package.

The spatial heat release distribution was calculated in a plane geometry for the fluence value of 1.0 neutron/cm² incident along the normal to the surface of steel with substructural zones of different composition. It is shown that the spatial heat release depends on the composition of the zones.

The Lindhard model was used to calculate the characteristics of the interaction of alpha particles with materials of surface alloys of various compositions, an algorithm and a program implementing the Monte Carlo method were developed.

The properties of steel samples with surface substructural zones were studied by methods of physical and chemical analysis: microstructural, X-ray phase analysis, gamma-resonance spectroscopy and others.

The results of the study of this stage showed the prospects for further development of this direction.

References

1. **Tsybin, A. S.** Physical bases of plasma and laser technologies [Text]. – M. : MEPhI, 2002.
2. **Ksenofontov, A. I.** Synthesis of New Material Compositions with Special Properties under Impact-Dynamic Conditions [Text] / A. I. Ksenofontov, V. A. Klimanov, E. I. Kurbatova, V. L. Romodanov, S. A. Sobko, Yu. G. Smirnov, J. L. Regens // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 2008. – 69, 9, 2252–2254.

5-11

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ АКТИВАЦИЯ ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ ДИСПЕРСНОГО АЛЮМИНИЯ ВОДОЙ

М. Н. Ларичев, Н. С. Шайтура

Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова РАН, Москва, Россия

E-mail: mlarichev@chph.ras.ru

Водородная энергетика признана сегодня основой энергетики будущего. Источники, способы производства и хранения водорода становятся критически важными. Наиболее чистый водород («зеленый») может быть легко получен в реакции металлического алюминия с водой. Коммерческое использование реакции требует экологически безопасных способов активации, не ухудшающих потребительские свойства водорода и оксида алюминия. Среди них перспективными способами являются ультразвуковая (УЗ) активация и активация малыми добавками (проценты) оксида кальция (CaO).

Проведенные исследования показали, что использование УЗ активации позволяет полностью окислять водой микронные порошки алюминия. Это обеспечивается за счет интенсификации процессов, определяющих макрокинетику на всех стадиях окисления алюминия. Исследование твердых продуктов окисления, образующихся на различных стадиях процесса, показало, что основной вклад УЗ поля состоит в том, что интенсифицируются процессы разрушения гидрогеля, обволакивающего окисляющуюся поверхность, и стимулируется зародышеобразование и рост кристаллов гидроксида алюминия на удалении от нее. Благодаря этому уменьшается экранировка поверхности частиц продуктами окисления и обеспечивается увеличение скорости и степени превращения алюминия. В работе показано, что для активации окисления не требуется высокая УЗ мощность: основные результаты получены при поглощаемой УЗ мощности, не превышающей $0,015 \text{ Вт/см}^3$, когда затрачиваемая за время полного окисления металла УЗ энергия не превышает 10% энергии выделяющегося водорода.

Использование УЗ активации совместно с химической (CaO) позволяет существенно (в 100 и более раз) увеличить скорость окисления алюминия. Эффект от одновременного применения этих методов активации превосходит суммарный эффект от их раздельного использования, т. е. наблюдается синергетический эффект. Отметим, что короткое воздействие ультразвука вначале стадии интенсивного окисления обеспечивает достижение высоких скоростей окисления, сопоставимых со скоростями, наблюдающимися при непрерывном действии УЗ поля.

В работе определено изменение эффективных энергий активации под действием УЗ поля: для разрушения пассивирующего оксидного покрытия она снижается с 122 ± 16 до 88 ± 13 кДж/моль; для стадии интенсивного окисления – с 125 ± 20 кДж/моль до 34 ± 7 кДж/моль.

ULTRASONIC ACTIVATION OF THE DISPERSED ALUMINUM OXIDATION PROCESS BY WATER

M. N. Larichev, N. S. Shaitura

N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: mlarichev@chph.ras.ru

Hydrogen energy is recognized today as the basis of the energy of the future. Sources, methods of production

and storage of hydrogen are becoming critically important. The purest hydrogen (“green”) can be easily obtained in the reaction of metallic aluminum by water. Commercial use of the reaction requires environmentally friendly activation methods that do not impair the consumer properties of hydrogen and aluminum oxide. Among them, ultrasound activation and activation with small additives (percentages) of calcium oxide (CaO) are promising methods.

The executed studies have shown that the use of ultrasonic activation makes it possible to completely oxidize micron aluminum powders by water during reasonable time. This is achieved by intensifying the processes that determine the macrokinetics at all stages of aluminum oxidation. The study of solid oxidation products formed at various stages of the process showed that the main contribution of the ultrasonic field is that the processes of destruction of the hydrogel screening the oxidizing aluminum surface are intensified, and the nucleation and growth of aluminum hydroxide crystals at a distance from the aluminum surface is intensified. This reduces the shielding of the particle surface by oxidation products and provides an increase in the rate and degree of aluminum oxidation. It is shown that high ultrasonic power is not required for the activation of oxidation: the main results are obtained at the absorbed power of the ultrasonic field of 0.015 W/cm^3 , when the ultrasonic energy consumed during the complete oxidation of the metal does not exceed 10% of the energy of the released hydrogen.

The usage of ultrasonic activation in conjunction with chemical (CaO) can significantly (by 100 or more times) increase the rate of aluminum oxidation. The effect of simultaneous application of these activation methods exceeds the effect of their separate use, i. e. a synergistic effect is observed. In this case, a short exposure to ultrasound at the beginning of the intensive oxidation stage is sufficient to achieve high oxidation rates comparable to the rates observed with the continuous action of the ultrasonic field.

The work determines the change in the effective activation energies under the action of the ultrasonic field:

1. For the destruction of the passivating oxide coating, it decreases from 122 ± 16 to 88 ± 13 kJ/mol;
2. For the stage of intensive oxidation it decreases from 125 ± 20 kJ/mol to 34 ± 7 kJ/mol.

5-12

СИСТЕМА КОДОВ ДЛЯ РАСЧЕТНОГО ОБОСНОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЙ ЗЯТЦ

И. Р. Макеева

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: i.r.makeyeva@vniitf.ru

Развитие ядерной энергетики (ЯЭ) в России в настоящее время связывается с поэтапным внедрением

в ее структуру перспективных типов реакторных установок на быстрых нейтронах и организацией замыкания ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ), что должно обеспечить расширение ресурсной базы ЯЭ, оптимизацию обращения с радиоактивными отходами (РАО) и накопленным отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) тепловых реакторов. Непременным условием функционирования ядерных энергетических систем (ЯЭС) является обеспечение всех типов безопасности – ядерной, радиационной, технологической, экологической. При этом необходимо решить комплекс взаимосвязанных задач различных уровней – от стратегического до технологического. Это создание реакторных установок новых типов и их топливных циклов, оптимизированных по использованию ядерных материалов, полученных при регенерации как собственного ОЯТ, так и других типов реакторов, разработка технологий рециклирования ОЯТ о обращения с РАО и определение параметров как технологии в целом, так и входящих в их состав технологических процессов и операций, создание соответствующей инфраструктуры и производств, согласование их производительностей и сроков ввода в эксплуатацию.

С 2008 г. в РФЯЦ – ВНИИТФ на программной платформе АТЭК [1] развивается семейство программных комплексов, предназначенных для решения разноразмерных и разноплановых задач, связанных с развитием технологий ядерно-энергетической отрасли на основе унифицированного подхода и с использованием единых баз данных. Это позволяет моделировать как сценарные варианты развития ЯЭ, так и характеристики технологических процессов и производств. Информация о параметрах технологических процессах используется в качестве исходной для расчетной оценки безопасности различных типов – ядерной, радиационной, пожаровзрывобезопасности, экологической безопасности. В докладе приводится пример согласованного моделирования развития ЯЭ в целом, соответствующих этому сценарию технологий ЗЯТЦ и расчетной оценки безопасности.

Литература

1. **Макеева, И. Р.** Задачи моделирования технологий ядерного топливного цикла. Платформа АТЭК [Текст] : сборник материалов / И. Р. Макеева, В. А. Симоненко, Н. Д. Дырда, А. А. Рыкунова, С. В. Пчелинцева // XIII Международная конференция «Забабакхинские научные чтения». – Snezhinsk, 2017. – С. 255.

CODE SYSTEM FOR NUMERICAL JUSTIFICATION OF TECHNICAL SOLUTIONS IN THE COURSE OF CLOSED FUEL CYCLE TECHNOLOGIES DEVELOPMENT

I. R. Makeeva

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics”, Snezhinsk, Russia

E-mail: i.r.makeyeva@vniitf.ru

Nuclear power industry in Russia is currently in the process of step-by-step integration of prospective fast-neutron reactors and closing of the fuel cycle. These initiatives are expected to enlarge nuclear power production fuel reserves, optimize thermal reactor radioactive wastes and spent nuclear fuel (SNF) treatment. The essential condition of nuclear fuel systems operation is overall safety, e.g. nuclear, radiation, technological, ecological. This objective requires solving a number of problems of various levels, from strategic to technological one. These problems include: creation of nuclear facilities of new types and fuel cycles, efficient from the point of nuclear materials usage, made of self-generated SNF and of SNF from various type reactors; development of SNF recycling technology and radioactive wastes treatment, considering both the overall technology, and composing technological processes; creation of the appropriate infrastructure and production, determination of the output and commissioning timing.

Since 2008 RFNC–VNIITF develops АТЕС [1] platform and the number of applications required for solving problems of various levels, needed for nuclear power industry development on the basis of the universal approach and with the use of common databases. This provides opportunity to simulate nuclear power industry development scenarios and technological processes characteristics and production. The information about technological process parameters is used as the source data for numerical assessment of the safety of various types: nuclear, radiation, fire, explosion, ecological. The paper provides the example of the joint development of nuclear power industry as a whole, appropriate closed fuel cycle technologies and safety assessment.

References

1. **Makeeva I. R.**, Simonenko V. A., Dirda N. D., Rikunova A. A., Pchelintseva S. V. Nuclear fuel cycle technologies simulation problems. АТЕС platform // collected works “XIII International conference ZST (Zababakhin Scientific Talks) - 2017” Snezhinsk, 2017. P. 255.

5-13

ДИФФУЗИЯ И МЕХАНИЗМЫ МИГРАЦИИ КАТИОНОВ ТОРИЯ В КРИСТАЛЛЕ ThO₂. МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

К. А. Некрасов^{1,2}, Д. Сеитов²,
С. С. Пицхелаури², А. С. Боярченко²

¹Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

E-mail: kirillnkr@mail.ru

Работа посвящена молекулярно-динамическому моделированию миграции собственных катионов в диоксиде тория, представляющего интерес в каче-

стве ядерного топлива. Актуальность такого моделирования обусловлена тем, что экспериментальное исследование процессов дефектообразования и переноса в ядерном топливе под воздействием нейтронного облучения затруднено экстремальными условиями его эксплуатации. Диффузия катионов тория изучена значительно хуже, чем анионов кислорода, в связи с низкой подвижностью катионной подрешетки.

В качестве модельных систем рассмотрены изолированные кристаллиты ThO_2 в форме правильных октаэдров, состоявшие из 5460 и 15960 частиц. При наличии свободной поверхности был обеспечен естественный приток катионных вакансий во внутреннюю область кристалла. Модельные времена эволюции достигали 3,5 мкс. Температуру варьировали от 3100 до 3600 К. Достаточную производительность моделирования обеспечивали распараллеливанием вычислений на графических процессорах архитектуры CUDA.

Взаимодействие ионов описывали набором парных потенциалов MOX-07 [1–2], который позволил в предыдущих работах получить достоверные результаты при моделировании переноса катионов и радиационного разупорядочения в диоксиде урана [3–4].

Основным механизмом диффузии катионов в объеме кристалла при рассмотренных температурах было перемещение по цепочке навстречу вакансиям, рождавшимся на поверхности. Новым результатом стало обнаружение коллективного движения катионов, включавшего их временный выход в междоузельные позиции, окружавшие вакансию.

Полученные значения коэффициента диффузии катионов находятся в диапазоне от $4 \cdot 10^{-12}$ до $2 \cdot 10^{-10}$ cm^2/s . Модельная энергия активации объемной диффузии лежит в пределах от 8 до 13 эВ. Исследовано влияние суперинионного перехода на перенос катионов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-32-90274.

Литература

1. Potashnikov, S. I., A. S. Boyarchenkov, K. A. Nekrasov, and A. Ya. Kupryazhkin [Text]. – J. Nucl. Mater. – 2011. – 419, 217–225.
2. Boyarchenkov, A. S., K. A. Nekrasov, A. Ya. Kupryazhkin, and S. K. Gupta [Text]. – AIP Conference Proceedings, 2020. – 2313, 030064.
3. Boyarchenkov, A. S., S. I. Potashnikov, K. A. Nekrasov and A. Y. Kupryazhkin [Text]. – J. Nucl. Mater. 2013. – 442, 148–161.
4. Balboa, H., L. Van Brutzel, A. Chartier, Y. Le Bouar [Text]. – J. Nucl. Mater. – 2018. – 512, 440–449.

DIFFUSION AND MECHANISMS OF THORIUM CATION MIGRATION IN ThO_2 CRYSTAL. A MOLECULAR DYNAMIC SIMULATION

K. A. Nekrasov^{1,2}, D. Seitov²,
S. S. Pitskhelauri², A. S. Boyarchenkov²

¹Institute of High-Temperature Electrochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

²Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

E-mail: kirillnkr@mail.ru

The work is devoted to molecular dynamics simulation of the migration of intrinsic cations in thorium dioxide, which is of interest as a nuclear fuel. Such a modeling is relevant as the experimental study of the processes of defect formation and transfer in nuclear fuel under the influence of neutron irradiation is hampered by the extreme conditions of its operation. The diffusion of thorium cations has been studied much less than that of oxygen anions, due to the low mobility of the cation sublattice.

Isolated ThO_2 crystallites in the form of regular octahedra, consisting of 5460 and 15960 particles, are considered as the model systems. The presence of a free surface provided a natural inflow of cation vacancies into the inner region of the crystal. The model evolution times reached 3.5 μs . The temperature was varied from 3100 to 3600 K. Sufficient simulation performance was ensured by parallelizing computations on graphics processors of the CUDA architecture.

The interaction of ions was described by a set of pair potentials MOX-07 [1–2], which earlier provided reliable results in modeling the transfer of cations and radiation damage in uranium dioxide [3–4].

The main mechanism of the diffusion of cations in the crystal bulk at the studied temperatures was their chain displacement towards the vacancies that were born at the surface. A new result was the discovery of the collective movement of cations, which included their temporary release to the interstitial positions surrounding the vacancy.

The obtained values of the cation diffusion coefficient are in the range from $4 \cdot 10^{-12}$ to $2 \cdot 10^{-10}$ cm^2/s . The model activation energy for the bulk diffusion lies in the interval from 8 to 13 eV. The influence of the superionic transition on the cation transport is investigated.

The study was funded by RFBR, project No. 19-32-90274.

References

1. Potashnikov, S. I., A. S. Boyarchenkov, K. A. Nekrasov, and A. Ya. Kupryazhkin [Text]. – J. Nucl. Mater. – 2011. – 419, 217–225.
2. Boyarchenkov, A. S., K. A. Nekrasov, A. Ya. Kupryazhkin, and S. K. Gupta [Text]. – AIP Conference Proceedings, 2020. – 2313, 030064.
3. Boyarchenkov, A. S., S. I. Potashnikov, K. A. Nekrasov and A. Y. Kupryazhkin [Text]. – J. Nucl. Mater. 2013. – 442, 148–161.
4. Balboa, H., L. Van Brutzel, A. Chartier, Y. Le Bouar [Text]. – J. Nucl. Mater. – 2018. – 512, 440–449.

5-14

О РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИКИ ДЛЯ РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РАДИОХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

И. В. Пешкичев¹, Я. С. Драморецкая¹,
И. Р. Макеева¹, А. В. Родин²

¹Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²Научно-технический центр по ядерной и радиационной
безопасности, Москва, Россия

E-mail: i.v.peshkichev@vniitf.ru

Одной из важнейших задач при разработке радиохимических производств является обеспечение пожаровзрывобезопасности технологических процессов. В настоящее время безопасность технологических процессов на радиохимических производствах обосновывается с использованием специальных экспериментов, моделирующих условия технологических процессов, или опыта эксплуатации аналогичных производств.

Пожароопасные аварийные ситуации на радиохимических производствах можно разделить по типам, связанным:

- с образованием или использованием горючих газов;
- с использованием горючих жидкостей;
- с использованием пирофорных материалов;
- с использованием смесей окислителей с восстановителями.

Данный подход расчетного обоснования безопасности предполагает моделирование аварийных ситуаций на различных этапах с использованием программных средств для определения химических и изотопных составов, плотностей и других характеристик материального потока [1], термодинамического моделирования [2], а также расчета радиационных и пожаровзрывоопасных характеристик рабочих сред.

Для расчетной оценки пожаровзрывобезопасности технологических процессов радиохимических производств создается программное средство, в котором реализуются разрабатываемые научно-техническим центром по ядерной и радиационной безопасности (ФБУ «НТЦ ЯРБ») методики оценки:

- выделения радиолитического водорода и других горючих газов;
- накопления водорода в оборудовании и трубопроводах;
- условий воспламенения паровоздушных смесей;
- условий возникновения теплового взрыва в оборудовании;
- условий самовоспламенения горючих (пирофорных) материалов;
- последствий воспламенения технологических сред объектов ЯТЦ.

В докладе представлено текущее состояние разработки методики для расчетной оценки пожа-

ровзрывобезопасности технологических процессов радиохимических производств ядерного топливного цикла.

Литература

1. Шмидт, О. В. Моделирование технологических переделов ЗЯТЦ, как инструмент при создании и оптимизации технологических производств [Текст] / О. В. Шмидт, И. Р. Макеева, С. Н. Ливенцов // Радиохимия. – 2016. – Т. 58, № 4. – С. 316–323.
2. Пешкичев, И. В. Программный комплекс TeDu для решения задач термодинамического моделирования [Текст] / И. В. Пешкичев, В. Ф. Куропатенко, И. Р. Макеева и др. // Вестник ЮУрГУ ММП. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 84–94. DOI: 10.14529/mmp180108.

THE DEVELOPMENT OF THE METHODOLOGY FOR THE CALCULATED ASSESSMENT FIRE AND EXPLOSION SAFETY OF TECHNOLOGICAL RADIOCHEMICAL PROCESSES

I. V. Peshkichev¹, Y. S. Dramoretskaya¹,
I. R. Makeeva¹, A. V. Rodin²

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

²Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation
Safety, Moscow, Russia

E-mail: i.v.peshkichev@vniitf.ru

Fire and explosion safety of technological processes is one of the most important tasks in the development of radiochemical production. Currently, the safety of technological processes in radiochemical industries is based on the experience of operating similar industries or the special experiments simulating the conditions of technological processes.

Fire-hazardous emergencies at radiochemical production can be divided by the types related to:

- the formation or using of flammable gases;
- the flammable liquids using;
- the pyrophoric materials application;
- the using mixtures of oxidizing agents with reducing agents.

This approach of safety calculation involves the modeling of emergency situations at various stages using software tools for determining chemical and isotopic compositions, densities and other characteristics of the material flow [1], thermodynamic modeling [2], as well as estimation of radiation and fire-explosive characteristics of analyzing substances.

The software tool is being created in order to calculate fire and explosion safety of technological processes in radiochemical industries. The software tool uses the methods of assessment developed by the Scientific and Engineering Center for Nuclear and Radiation Safety (SEC NRS), such as:

- the estimation of the radiolytic hydrogen and flammable gases release;

- the calculation of hydrogen accumulation in equipment and pipelines;
- the assessment of the ignition conditions of steam-air mixture;
- the conditions evaluation for the occurrence of a thermal explosion in the equipment;
- the conditions computation of self-ignition of pyrophoric materials;
- the consequences estimation of materials ignition in nuclear fuel cycle.

The report presents the current state of the methodology development for the calculated assessment of fire and explosion safety of technological radiochemical processes in nuclear fuel cycle.

References

1. **Shmidt, O. V.** Simulation of closed nuclear fuel cycle processes as a tool for the development and optimization of radiochemical technologies [Text] / O. V. Shmidt, I. R. Makeyeva, S. N. Liventsov // Radiochemistry. – 2016. – Vol. 58, No. 4. – P. 366–373. <https://doi.org/10.1134/S1066362216040044>.
2. **Peshkichev, I. V.** Software TeDy for thermodynamical modelling [Text] / I. V. Peshkichev, I. R. Makeyeva, O. V. Shults et al // Vestnik YuUrGU. Ser. Mat. Model. Progr. – 2018. – Vol. 11, No. 1. – P. 84–94.

5-15

РОЛЬ МЕЖДОУЗЕЛЬНЫХ КЛАСТЕРОВ ПРИ РАСЧЕТЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ

П. А. Покаташкин, А. В. Янилкин

Всероссийский научно-исследовательский институт
автоматики им. Н. Л. Духова, Москва, Россия

E-mail: p.a.pokatashkin@gmail.com

Перед новыми поколениями реакторов и конструкционных материалов ставятся высокие технологические требования. Стали по сравнению с «предшественниками» должны иметь лучшие характеристики для возможности эксплуатации при высоких температурах и высоких дозах облучения.

Прямые эксперименты по исследованию поведения материалов под воздействием облучения в реакторе имеют одну проблему – долговременность. Некоторые типы экспериментов необходимо производить годами. Ускоренные эксперименты (например, использование ионного облучения) являются хорошей альтернативой. Однако в связи с существенно разными условиями (скоростями набора дозы) возникает вопрос о корректности сравнения полученных результатов. Одним из вариантов уточнения корректности сравнения экспериментальных результатов является использование современных методов вычислительно-материаловедения.

В работе методами кластерной динамики исследуется изменение концентрации точечных дефектов из-за стока на междуузельные кластеры (петли). Кон-

центрация вакансий (и вакансионный поток) оказываются на несколько порядков ниже по сравнению с классической NRT моделью. Полученная «эффективная» скорость набора дозы хорошо согласуется экспериментальными результатами. В том числе, корректно предсказывается температурный сдвиг при сопоставлении реакторных и ускоренных экспериментов.

THE ROLE OF SIA CLUSTERS IN CALCULATION OF EFFECTIVE IRRADIATION DOSE

P. A. Pokatashkin, A. V. Yanilkin

Dukhov Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

E-mail: p.a.pokatashkin@gmail.com

Novel generation of nuclear power reactors challenge problems for materials science. New generation of constructional steels have to exhibit good performance at higher temperature range and irradiation doses compared to their predecessors.

Direct experiments of materials performance under reactor irradiation have a key problem – time. Some of them could last for years or even dozens of years after reactor decommissioning. Ionic irradiation could be a good proxy to reactor one, however due to significantly different conditions (dose rates differ by 3 orders of magnitude) the question arises: is this comparison correct? Novel techniques of computational materials science could give the answer.

In this work cluster dynamics approach is used to study the evolution of point defect concentration due to the sink on SIA clusters (loops). The vacancy concentration appeared to be several orders of magnitude lower compared to classical NRT model. The effective obtained dose rate obtained is in a good agreement with the experimental results. The temperature shift in comparison of neutron and ionic irradiation is predicted correctly.

5-16

РАСЧЕТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПИРАМИДАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ В СРЕДЕ COMSOL MULTIPHYSICS

В. В. Савельев, В. А. Сапунов, А. В. Сергеев

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия

E-mail: savelev.vv@urfu.ru

В настоящее время перспективным направлением магнитометрии является применение беспилотных носителей, что формулирует особые требования к подготовке полетных заданий учитывающих форму и свойства объектов. Особый интерес имеют захоронения в виде курганов или пирамид. Исследование свойств таких мегалитических объектов может быть сопряжено с трудностями, поскольку такие объекты

часто являются историческими памятниками культуры, и проведение экспериментов на них требует тщательной подготовки. Этапом такой подготовки является подготовка максимального количества априорной информации об объекте, которую можно получить, из уже проведенных работ других коллективов, а также провести математическое моделирование. Авторами работы [1] было проведено моделирование воздействия радиоволн на Великую пирамиду, получено распределение электромагнитных полей внутри. В данной же работе, результатами вычислений должно стать распределение магнитного поля вне тела пирамиды. Эти области доступны для непосредственной магнитной съемки, в частности – аэромагнитной. Соответственно, повысотные магнитные карты – имитация магнитной съемки, проводимой скалярным магнитометром. В качестве прототипа модели была выбрана Великая пирамида Гизы. Магнитные свойства материала пирамиды [2], взяты для случая известняковой породы. Параметры внешнего магнитного поля в точке расположения пирамиды выбраны в соответствии с моделью IGRF-13 [3].

Результаты проведенных расчетов позволяют оценить величину магнитных аномалий, возникающих около пирамиды, а также ложатся в основу методики магнитной съемки. Полученные магнитные карты однородной пирамиды, выделили направления движения, вдоль которых аномалии от объектов (пустот, гранитных арок), заключенных внутри, дают наибольшую амплитуду.

Литература

1. **Balezin, M.**, K. V. Baryshnikova, P. Kapitanova, Evlyukhin A. B. [Text]. – Journal of Applied Physics 124, 034903 (2018).
2. **Khmelevskoy, V. K.**, V. I. Kostitsyn, [Text]. – Fundamentals of geophysical methods, 111 (2010).
3. International Geomagnetic Reference Field (Electronic resource, URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>, accessed 21.12.2019).

CALCULATION OF THE PYRAMIDAL OBJECTS MAGNETIC FIELD IN COMSOL MULTIPHYSICS

V. V. Saveliev, V. A. Sapunov, A. V. Sergeev

Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

E-mail: savelev.vv@urfu.ru

Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin

Currently, a promising area of magnetometry is the use of UAV (unmanned aerial vehicle) this formulates special requirements for the flight mission's preparation taking into account the shape and properties of objects. Burials in the form of barrows or pyramids are of particular interest. The study of the properties of such megalithic objects can be fraught with difficulties, since such objects are often historical cultural monuments, and conducting experiments on them requires careful preparation. The stage of such preparation is the collection of the

maximum amount of a priori information about the object that can be obtained from the work already carried out by other teams, as well as by performing mathematical modeling. The authors [1] simulated the effect of radio waves on the Great Pyramid, obtained the distribution of electromagnetic fields inside. In this work, the results of calculations should be the distribution of the magnetic field outside the body of the pyramid. These areas are available for direct magnetic survey, in particular – aэромагнитная. Accordingly, height-varied magnetic maps are an imitation of a magnetic survey carried out by a scalar magnetometer. The Great Pyramid of Giza was chosen as the prototype for the model. The magnetic properties of the pyramid material [2] are taken for the case of limestone rock. The parameters of the external magnetic field at the point where the pyramid is located are selected in accordance with the IGRF-13 model [3].

The results of the calculations made it possible to estimate the magnitude of the magnetic anomalies that occur near the pyramid, and also form the basis of the magnetic survey technique. The obtained magnetic maps of a homogeneous pyramid indicated the directions of movement along which anomalies from objects (voids, granite arches), enclosed inside, give the greatest amplitude.

Reference

1. **Balezin, M.**, K. V. Baryshnikova, P. Kapitanova, Evlyukhin A. B. [Text]. – Journal of Applied Physics 124, 034903 (2018).
2. **Khmelevskoy, V. K.**, V. I. Kostitsyn, [Text]. – Fundamentals of geophysical methods, 111 (2010).
3. International Geomagnetic Reference Field (Electronic resource, URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>, accessed 21.12.2019).

5-17

СОСТАВЛЯЮЩИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЯДЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

А. А. Садовский

Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»,
Снежинск, Россия

E-mail: a.a.sadovskiy@gmail.com

В докладе рассматриваются три направления по обеспечению безопасности ядерных объектов – законодательное (Safeguard), технико-технологическое (Safety) и роль человеческого фактора (Security), единство которых и составляет основу культуры безопасности в атомной отрасли.

По направлению **Safeguard** рассматриваются и анализируются законодательные и нормативно-правовые документы международного уровня (МАГАТЭ), национального уровня и регламентирующие деятельность предприятий атомной отрасли. Рассмотрены вопросы гармонизации национальных и международных регламентирующих документов. Приводятся

основные положения Договора о нераспространении ядерного оружия (ДНЯО) и Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ).

По направлению **Safety** рассматриваются особенности работы ядерных объектов и принципы технического обеспечения условий безопасной эксплуатации. Поколения ядерных энергетических реакторов. Рассматриваются технические и технологические проблемы и решения по совершенствованию культуры безопасности в ядерно-оружейном и ядерно-энергетическом комплексах, а также совершенствование технологий обращения с отработанным ядерным топливом (ОЯТ) и радиоактивными отходами (РАО). Проводится анализ причин, характера и последствий возникавших инцидентов. Шкала ядерных событий INES. Рассматриваются меры эшелонированной технологической защиты. Описаны меры по физической защите, учету и контролю ядерных материалов.

По направлению **Security** внимание уделяется роли человеческого фактора в обеспечении безопасности. Рассматриваются вопросы мотивации персонала, формирования ответственности и лояльности. Представлены системы менеджмента, применяемые в Госкорпорации «Росатом». Приводятся основные принципы производственной системы Росатома (ПСР) и внедренной на предприятиях корпорации системы всеобщего управления качеством (Total Quality Management – TQM) на основе международных стандартов ISO 9000, а также выделены ключевые цели устойчивого развития корпорации.

Литература

1. **Бегун, В. В.** Культура безопасности в ядерной энергетике [Текст] : учебник для технических вузов. – Киев, 2012. – 563 с.
2. Ядерная энергетика проблемы. Решения. Часть первая [Текст] / под ред. М. Н. Стриханова. – Москва, 2011.
3. **Садовский, А. А.** Культура техногенной безопасности в атомной отрасли [Текст] : Сборник материалов. – Снежинск : СФТИ НИЯУ МИФИ, 2019. – 140 с.
4. **Nuclear Security Culture. Implementing Guide** [Текст]. – IAEA Nuclear Security Series. – 2008. – No. 7.

COMPONENTS OF THE SAFETY OF NUCLEAR FACILITIES

A. A. Sadovskiy

Snezhinsk Institute of Physics and Technology National Research Nuclear University “MEPhI”, Snezhinsk, Russia

E-mail: a.a.sadovskiy@gmail.com

The report examines three areas for ensuring the safety of nuclear facilities – legislative (Safeguard), technical and technological (Safety) and the role of the human factor (Security), the unity of which forms the basis of safety culture in the nuclear industry.

In the area of **Safeguard**, legal and regulatory documents of the international level (IAEA), national level and regulating the activities of enterprises in the nuclear industry are reviewed and analyzed. The issues of harmonization of national and international regulatory documents are considered. The main provisions of the Treaty

on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons (NPT) and the Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty (CTBT) are presented.

In the area of **Safety**, the features of the operation of nuclear facilities and the principles of technical support for conditions of safe operation are considered. Generations of nuclear power reactors. The paper considers technical and technological problems and solutions to improve safety culture in nuclear weapons and nuclear power complexes, as well as to improve technologies for handling spent nuclear fuel (SNF) and radioactive waste (RW). The analysis of the causes, nature and consequences of the incidents that have occurred is carried out. Nuclear Event Scale INES. Measures of echeloned technological protection are considered. Measures for physical protection, accounting and control of nuclear materials are described.

In the **Security** direction, attention is paid to the role of the human factor in ensuring security. The issues of personnel motivation, formation of responsibility and loyalty are considered. The management systems used in the State Atomic Energy Corporation “Rosatom” are presented. The basic principles of the production system of Rosatom (RPS) and the system of total quality management (TQM) implemented at the enterprises of the corporation based on the international standards ISO 9000 are given, and the key goals of sustainable development of the corporation are highlighted.

References

1. **Begun, V. V.** Safety culture in nuclear power [Text] : a textbook for technical universities. – Kiev, 2012. – 563 p.
2. Nuclear power problems. Solutions. Part one [Text] / Edited by M. N. Strikhanov. – Moscow, 2011.
3. **Sadovskiy, A. A.** Culture of technogenic safety in the nuclear industry [Text] : Collection of materials. – Snezhinsk : SPTI NRNU MEPhI, 2019. – 140 p.
4. **Nuclear Security Culture. Implementing Guide** [Text]. – IAEA Nuclear Security Series. – 2008. – No. 7.

5-18

ЗАДАЧИ СИСТЕМНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

В. А. Симоненко

Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия

E-mail: v.a.simonenko@vniitf.ru

Совокупность технологических, экономических и экологических факторов обусловила в последние десятилетия повышение интереса к использованию водорода как энергетического ресурса. Хотя он является искусственно получаемым, вторичным ресурсом. Заметим, что наша цивилизация издавна такими ресурсами пользуется, и водородом в том числе. Таким образом, новыми являются масштабы потребления,

предполагаемые области применений и некоторые ограничения, которые налагаются на технологии производства и применения водорода на современном этапе. Системная программа исследований в нашей отрасли была инициирована в 2018 г. и начата в 2019 г. под руководством академика Н. Н. Пономарёва-Степного.

Перед сводным коллективом специалистов нашего института была поставлена обобщенная задача, фактически вынесенная в название доклада – системные исследования функционирования и безопасности технологий водородной энергетики. Первая часть названия отражает то обстоятельство, что выявление возможных аварийных процессов и сценариев тяжелых аварий следует делать путем углубленного анализа функционирования конкретных технологий. На основе этих данных следует исследовать сценарии протекания аварий и разрабатывать средства и меры противодействия. Именно в этом году мы вступили во взаимодействие с конкретными разработчиками трех технологий и выходим на важный этап исследований конкретных аварийных процессов.

Укрупненно выделяются четыре связанных между собой типа задач: получение исходных данных для нормативных документов, проведение экспериментальных исследований конкретных аварийных процессов, развитие расчетно-теоретических моделей и кодов для описания номинальных и аварийных процессов, создание моделей, алгоритмов и средств для выполнения оценки ущерба и риска при протекании тяжелой аварии и для разработки сценариев обеспечения стойкости объектов при тяжелых авариях. В докладе раскрывается содержание работ, выполняемых по каждой из указанных задач.

Учитывая, высокую опасность водорода при ряде аварийных процессов и возможные широкие применения его в быту и в транспорте, принципиальное значение имеет доработка норм и правил с учетом особенностей таких применений. Отсюда возникает постановка первой задачи. С другой стороны, учет этих требований приводит к необходимости исследования таких процессов, как воспламенение водорода при малых концентрациях в воздухе и развитие процессов горения при таких концентрациях. Появляются также новые опасности при применении водорода на транспорте, при крупномасштабных производствах водорода на атомно-энергетическом технологическом комплексе с высокотемпературным реактором. Эти требования с необходимостью приводят к новым классам экспериментальных исследований, выполняемых в рамках второй задачи. В силу большой стоимости экспериментальных исследований мы с необходимостью приходим к развитию моделей и кодов для описания опасных процессов различных масштабов. Для описания особенно крупных аварийных процессов, а также при выполнении проектных работ с необходимостью приходится создавать инженерные коды (с редуцированным описанием ряда процессов).

SYSTEMATIC CHALLENGES OF HYDROGEN POWER PRODUCTION TECHNOLOGY SAFETY AND OPERATION

V. A. Simonenko

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: v.a.simonenko@vniitf.ru

The combination of technological, economic, and ecological factors has recently aroused interest towards the hydrogen as a source of energy despite the fact that it is synthesized and turns to be secondary source. It should be noted that our civilization has been using such sources, and hydrogen as well, for a long time. The new agenda includes the new scale of consumption, applications, and restrictions implemented to contemporary hydrogen production and usage. The systematic research program in nuclear industry has been proposed in 2018 and started in 2019 under the lead of Acad. N.N. Ponomarev-Stepnoy.

The task force of specialists from our enterprise has faced the overall challenge, mentioned in the title of the presentation, i.e. systematic research of hydrogen power production industry safety and operation. The first part of the title shows that detection of the potential emergency processes and scenarios of severe accidents should be made via profound analysis of certain technologies operation. On the basis of this data, accident scenarios must be studied and certain countermeasures and mitigation means should be developed. In this year we have started collaboration with the developers of three technologies and now we enter the important stage of the researches of certain accident processes.

Roughly, there are four interconnected objectives: initial data collection for regulatory documents, experimental research of certain emergency processes, theoretical models and codes development for the description of nominal and accidental processes, development of models, algorithms, and tools to assess risks and potential damage inflicted in the course of a severe accident and to work out scenarios aimed at resilience of the objects in case of severe accidents. The paper describes the scope of work for every mentioned objective.

Considering for the high hydrogen-connected risks and great number of applications, the adjustment of regulatory norms and rules, taking into the account such applications, is of the utmost importance. The first challenge formulation arises therefrom. On the other hand consideration of such regulations causes the need in the studies of such processes as hydrogen ignition under low concentration in the air and combustion evolution under these concentrations. The new hazards of hydrogen application arise from its use as a fuel, and from a large-scale hydrogen production on the basis of nuclear power production technological complex with high-temperature reactor. These requirements lead us to a number of new classes of experimental research, performed within the framework of the second challenge. Due to high

cost of the experimental studies we inevitably come to the necessity of development of the models and codes capable of describing hazardous processes of various scale. Engineering codes (with reduced description of a number of processes) are to be developed to simulate the huge accidents.

5-19

**ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
КОМПЛЕКС РФЯЦ – ВНИИТФ,
ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЙ
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ДАННЫХ ПО ОПАСНЫМ ФАКТОРАМ
ИСТЕЧЕНИЯ, ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА
ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ
ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ**

А. А. Тараканов, Н. Б. Аникин, Е. В. Безгодков,
Ю. Ф. Давлетчин, Д. Л. Мошкин, М. В. Никифоров,
С. Д. Пасюков, И. А. Попов, А. А. Тяктев,
Ю. С. Уфимцев, А. В. Ушков,
Д. В. Фролов, В. А. Симоненко

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: e.v.bezgodov@vniitf.ru, v.a.simonenko@vniitf.ru

Для валидации коммерческих и научных программных средств, предназначенных для обоснования водородной безопасности при проектировании объектов водородной энергетики, а также для формирования корреляций и зависимостей в качестве исходных данных для разработки нормативных документов в области использования водородной энергии в РФЯЦ – ВНИИТФ создается исследовательский комплекс. В настоящее время в состав комплекса входит семь установок и стендов, к 2023 г. планируется ввести в эксплуатацию еще пять.

В стендах и установках, расположенных как в открытом пространстве, так и в утепленных ангарах, проводятся экспериментальные исследования по изучению:

- распространения струйных истечений и пожаров-струй водородосодержащих газовых смесей (ВГС), истекающих из сосудов высокого давления до 700 атм;
- формирования взрывоопасных облаков и критических условий для воспламенения ВГС в ограниченных пространствах в условиях работы естественной и принудительной вентиляции;
- концентрационных пределов ускоренных пламен ВГС и условий распространения пламен вверх и вниз, в том числе в узких каналах;
- проливов криогенного водорода на водную и твердую поверхности;
- характеристик горения однородных и стратифицированных ВГС;

– параметров распространения пламени при переходе между объемами и проверки масштабных эффектов.

В докладе приведено описание исследовательских установок, средств измерения и регистрации, технологического оборудования, входящих в их состав, а также приведен краткий обзор результатов измерений, полученных в экспериментах.

**RFNC – VNIITF RESEARCH COMPLEX
DESIGNED FOR OBTAINING EXPERIMENTAL
DATA ON HAZARDOUS FACTORS
OF OUTFLOW, COMBUSTION, AND EXPLOSION
OF HYDROGEN-CONTAINING
GAS MIXTURES**

A. A. Tarakanov, N. B. Anikin, E. V. Bezgodov,
Yu. F. Davletchin, D. L. Moshkin, M. Yu. Nikiforov,
S. D. Pasyukov, I. A. Popov, A. A. Tyaktev,
Yu. S. Ufimtsev, A. V. Ushkov,
D. V. Frolov, V. A. Simonenko

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

E-mail: e.v.bezgodov@vniitf.ru, v.a.simonenko@vniitf.ru

A research complex is under construction at RFNC – VNIITF to validate commercial and scientific research software intended for substantiation of hydrogen safety when designing facilities of hydrogen power engineering, and to formulate correlations and dependences to be used as initial data for elaboration of normative documents in the field of hydrogen energy utilization. Currently, the complex includes seven installations and test stands, and five more will be put into operation by 2023.

The test stands and installations located both in the open air and in heated sheds are used for carrying out the following experimental studies:

- Jet outflow propagation and fire jets of hydrogen-containing gas mixtures (HGMs) outflowing from high-pressure vessels at pressures up to 700 atm;
- Formation of explosive clouds and critical conditions for HGM ignition in confined spaces in conditions of natural and forced ventilation;
- Concentration limits of accelerated HGM flames and conditions of upward and downward propagation of flames, including those in narrow channels;
- Spillage of cryogenic hydrogen on water and solid surfaces;
- Combustion parameters of homogeneous and stratified HGMs; and
- Flame propagation parameters during transition between volumes and the assessment of scale effects.

The paper describes the research installations, as well the measuring and recording devices and the process equipment installed therein. The paper also contains a brief review of measurement results obtained in experiments.

5-20

**ПРИМЕНЕНИЕ ПК ВИЗАРТ
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ
СЦЕНАРИЕВ РЕАЛИЗАЦИИ ЗЯТЦ
И ОПТИМИЗАЦИИ ЗАТРАТ
НА ОБРАЩЕНИЕ С РАО**

Л. Р. Файрушина^{1,2}, И. Р. Макеева^{1,3},
В. Ю. Пугачёв¹, Н. Д. Дырда¹

¹Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²Снежинский физико-технический институт
Национального исследовательского ядерного университета
«МИФИ», Снежинск, Россия

³ФГАОУ ВО ЮУрГУ (НИУ), Челябинск, Россия
E-mail: fayrushinalr@vniitf.ru

При разработке новых технологий замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) возникают задачи, связанные не только с оптимизацией всего комплекса технологий и объектов ЗЯТЦ, но и с оптимизацией потоков образующихся радиоактивных отходов (РАО). Для комплексного решения задач по сокращению объемов РАО и минимизации дорогостоящего захоронения высокоактивных отходов (ВАО) целесообразно использовать средства математического моделирования, которые в зависимости от выбранного варианта технологии переработки, конфигурации технологических линий и аппаратов, позволяют определить минимально допустимый объем остеклованных РАО, при котором образующийся стекломпаунд будет соответствовать нормативным требованиям [1, 2].

В рамках проектного направления «Прорыв» разработан и продолжает развиваться программный комплекс (ПК) ВИЗАРТ [3], предназначенный для математического моделирования и оптимизации технологических переделов замыкающей стадии ядерного топливного цикла (ЯТЦ). В 2019 г. было проведено тестирование функционала ПК ВИЗАРТ в части сквозного расчета процессов ЗЯТЦ, включая расчет оптимального соотношения РАО разных степеней активности [4], рассчитаны минимальные стоимости обращения с РАО для нескольких сценариев реализации ЗЯТЦ, а также показано, что основным условием достижения эффективного обращения с РАО является обеспечение длительного хранения тепловыделяющей фракции.

На основе скорректированной модели для расчета затрат на послереакторное обращение с отработанным ядерным топливом (ОЯТ) с учетом всех технологических переделов замыкающей стадии ЯТЦ проведена серия расчетов с использованием оптимизационной подсистемы ПК ВИЗАРТ [5]. Это позволило выявить наиболее затратные операции в рамках выбранных технологических схем обращения с ОЯТ и РАО.

В докладе представлен анализ основных составляющих затрат на послереакторное обращение с ОЯТ, вид целевых функций для расчета затрат на замыкание ЯТЦ, подготовленные в ПК ВИЗАРТ расчетные

схемы на основе разработанных балансовых моделей для проведения оптимизационных расчетов потоков РАО, полученные результаты оптимизационных расчетов для различных сценариев реализации ЗЯТЦ.

Литература

1. **Федеральные** нормы и правила в области использования атомной энергии «Сбор, переработка, хранение и кондиционирование ЖРО. Требования безопасности» (НП-019-15).
2. **Изменения** в Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Сбор, переработка, хранение и кондиционирование ЖРО. Требования безопасности» (НП-019-15). Ядерная и радиационная безопасность. Проекты нормативных документов, № 3 (81) – 2016, стр. 1–2.
3. **Шмидт, О. В.** Моделирование технологических переделов ЗЯТЦ, как инструмент при создании и оптимизации технологических производств [Текст] / О. В. Шмидт, И. Р. Макеева, С. Н. Ливенцов // Радиохимия. – 2016. – Т. 58, № 4. – С. 316–323.
4. **Расчетное** обеспечение технических решений при разработке технологических линий ОДЭК и ПЭК с использованием ПК ВИЗАРТ и РТМ-2. Этап 2019 года (заключительный). Отчет о НИР/ФГУП «РФЯЦ–ВНИИТФ»; И. Р. Макеева, И. С. Попов, В. Ю. Пугачев, А. А. Рыкунова, Е. А. Белоногова, А. А. Бочкарева, Л. Р. Файрушина, У. Ф. Шереметьева и др. – 2019. Инв. № 030-33/1917дсп.
5. **Makeyeva, I. R.** Calculation and Optimization of Technology Parameters for Closing Stage of Nuclear Fuel Cycle using VIZART code [Text] / I. R. Makeyeva, A. A. Rykunova, V. G. Dubosarsky, V. Yu. Pugachev, O. V. Shmidt, Yu. A. Evsyukova // Proceedings of GLOBAL 2017 September 24–29, 2017 – Seoul (Korea). – EA-318.

**THE USE OF SOFTWARE PACKAGE VIZART
FOR MODELING VARIOUS SCENARIOS
OF THE CNFC IMPLEMENTATION
AND OPTIMIZING THE COSTS
OF RADIOACTIVE WASTE TREATMENT**

L. R. Fayrushina^{1,2}, I. R. Makeeva^{1,3}, V. Yu. Pugachyov¹,
N. D. Dyrda¹

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

²Snezhinsk Institute of Physics and Technology National
Research Nuclear University “MEPhI”, Snezhinsk, Russia

³Federal State Autonomous Educational Institution of Higher
Education “South Ural State University (National Research
University)”, Chelyabinsk, Russia

E-mail: fayrushinalr@vniitf.ru

Development of new closed nuclear fuel cycle (CNFC) technologies leads to the problems associated not only with the optimization of entire complex of technologies and CNFC facilities, but also with the optimization of generated radioactive waste (RW) flows. For a comprehensive solution of RW volume reducing problem and minimizing the expensive disposal of high-level waste (HLW), it is advisable to use mathematical modeling tools, which, depending on the selected processing technology option, the configuration of technological lines

and devices, allow determining the minimum acceptable volume of vitrified RW, at which the resulting glass composite will meet regulatory requirements [1, 2].

Within the scope of the “Proryv” project direction, the software package (PC)

VIZART [3] was developed and continues to grow, designed for mathematical modeling and optimization of technological process stages of the nuclear fuel cycle (NFC) closing stage.

In 2019 the PC VIZART functionality was tested in terms of the end-to-end calculation of the CNFC processes, including the calculation of RW optimal ratio of different degrees of activity [4], the minimum costs of RW treatment for several scenarios of the CNFC implementation were calculated, and it was also demonstrated that the main condition for achieving effective RW management is to ensure long-term storage of the heat-generating fraction.

On the basis of the modified model for calculate the costs of post-reactor treatment with spent nuclear fuel (SNF), taking into account all technological process stages of the NFC final stage, a series of calculations was carried out using optimization subsystem of the PC

VIZART [5]. That allowed us to identify the most expensive operations within the selected technological schemes of SNF and RW management.

This report presents an analysis of the main components of SNF post-reactor treatment costs, the type of target functions for calculating the costs of closing the NFC, the calculation schemes prepared in the PC VIZART based on the developed balance models for conducting optimization calculations of RW flows, the results of optimization calculations for various scenarios of the CNFC implementation.

References

1. **Federal** norms and rules in the field of nuclear energy use: «Collection, reprocessing, storage and conditioning of LRW. Security requirements» (NP-019-15).
2. **Modifications** to the Federal norms and rules in the field of nuclear energy use «Collection, reprocessing, storage and conditioning of LRW. Safety requirements» (NP-019-15). Nuclear and radiation safety. Draft regulatory documents, № 3 (81) – 2016, p. 1–2.
3. **Shmidt, O. V.**, I. R. Makeeva, S. N. Liventzov [Text]. – Modeling of technological stages of closed fuel cycle, as a tool in development and optimization of technological productions. // Radiochemistry, 2016, t. 58, N 4, p. 316–323.
4. **Calculation** support of technical solutions for the technological lines development of pilot demonstration energy complex and commercial power complex with the use of PC VIZART and RTM-2. The 2019 stage (final). Research report / FSUE «RFNC – VNIITF»; I. R. Makeeva, I. S. Popov, V. Yu. Pugachev, A. A. Rykunova, E. A. Belonogova, A. A. Bochkareva, L. R. Fayrushina, U. F. Sheremetyeva [and others]. – 2019. Inv. № 030-33/1917dsp.
5. **Makeyeva, I. R.**, A. A. Rykunova, V. G. Dubosarsky, V. Yu. Pugachev, O. V. Shmidt, Yu. A. Evsyukova [Text]. – Calculation and Optimization of Technology Parameters for Closing Stage of Nuclear Fuel Cycle using VIZART code. – Proceedings of GLOBAL 2017 September 24–29, 2017. – Seoul (Korea). – EA-318.

5-21

РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ К УСТАНОВЛЕНИЮ ЕДИНЫХ НОРМАТИВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ПРЕДЕЛОВ БЕЗОПАСНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПАССИВНЫХ КАТАЛИТИЧЕСКИХ РЕКОМБИНАТОРОВ

Н. Л. Харитонов¹, И. А. Кириллов¹,
В. А. Симоненко², Е. В. Безгодов²

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забахина,
Снежинск, Россия

E-mail: kharitonova_nl@nrcki.ru

Пассивные каталитические рекомбинаторы водорода (ПКРВ) являются одним из важнейших средств обеспечения взрывобезопасности на ОИАЭ в условиях аварий. В докладе показано наличие потребности в выработке единых требований к стандартизации ПКРВ в атомной промышленности и водородной энергетике, поскольку стандартизованные процедуры для определения эффективности и пределов безопасного функционирования ПКРВ различных типов в настоящее время однозначно не установлены.

Отмечено, что разработку нормативных требований к оценке ПКРВ целесообразно осуществлять на основании критериев, задаваемых федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии, регламентирующими требования безопасности, специфичные для атомной станции, в части обеспечения водородной взрывозащиты. Кроме того, предлагается принимать во внимание требования, предъявляемые документами по стандартизации, устанавливающими обязательные требования для конкретного вида продукции, а также документов национальной системы стандартизации и документов эксплуатирующей организации при осуществлении деятельности в области использования атомной энергии.

Обоснована необходимость системного подхода к определению функциональных состояний и процессов (режимов работы) пассивных каталитических рекомбинаторов водорода.

Сделана попытка определить минимальный иерархический набор понятий, который можно использовать для количественной характеристики рекомбинатора на протяжении всего его жизненного цикла.

Предложена схема возможных состояний/процессов, позволяющая обосновать при разработке мета-модели поведения ПКРВ ранжированный перечень физико-химических явлений в штатных и аварийных режимах его работы.

Введены понятия «безопасного» и «опасного» режимов функционирования ПКРВ. Показано, что при использовании ПКРВ возможны аварийные режимы, при которых рекомбинатор переходит в режим

функционирования, сопровождающийся процессом каталитического поджига парогазовой смеси.

Предложенный подход необходим для стандартизации требований к системам аварийного удаления водорода на базе пассивных каталитических рекомбинаторов в атомной промышленности и водородной энергетике и развития методик экспериментального тестирования рекомбинаторов, а также для оптимизации и уточнения их численных моделей.

**DEVELOPMENT OF APPROACHES
TO ESTABLISHING UNIFORM REGULATORY
REQUIREMENTS FOR ASSESSING
EFFECTIVENESS AND SAFE OPERATION
LIMITS OF PASSIVE CATALYTIC HYDROGEN
RECOMBINERS**

N. L. Kharitonova¹, I. A. Kirillov¹,
V. A. Simonenko², E. V. Bezgodov²

¹National Research Center “Kurchatov Institute”,
Moscow, Russia

²FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin
All-Russia Research Institute of Technical Physics”,
Snezhinsk, Russia

E-mail: kharitonova_nl@nrcki.ru

Passive catalytic hydrogen recombiners (PCHRs) are one of the most important security tools intended to ensure explosive safety of nuclear energy facilities under emergency conditions. Since the standardized procedures for assessing effectiveness and safe operation limits of different PCHR types have not been clearly established, the necessity to develop uniform requirements to standardization of PCHRs in the nuclear industry and hydrogen energetics is pointed out in this paper.

It has been noted that the development of regulatory requirements for assessing PCHRs should be implemented on the basis of the criteria defined by the federal rules and regulations in the field of nuclear energy use. These criteria shall specify safety requirements relevant for a nuclear power plant in terms of the hydrogen explosion protection. Furthermore, the requirements specified in the standardization documents that define obligatory requirements to a specific type of the product, as well as in the documents of the national standardization system, and the operator documents applied to the activities in the field of nuclear energy use should be taken into account.

The need for the system approach to determining functional states and processes (operation modes) of PCHRs is substantiated

The present paper attempts to define a minimum hierarchical set of notions that can be used for the recombiner quantitative characterization during its lifecycle.

We propose the scheme of possible states/processes that can be appropriate for justification of the list including ranked physical-chemical phenomena associated with the normal and emergency operation modes when developing the PCHR behavior metamodel.

The notions of “safe” and “dangerous” PCHR operation modes are introduced. It has been shown

that PCHR use may lead to emergency modes when a recombiner turns down to the operation mode followed by catalytic ignition of the vapor-gas mixture.

The proposed approach is needed for standardization of the requirements to the emergency dehydrogenation PCHR-based systems in the nuclear industry and hydrogen energetics, as well as the development of experimental test procedures for recombiners, optimization and refinement of their numerical models.

5-22

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ УСТАНОВКИ БМ-II
ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ПАССИВНЫХ
КАТАЛИТИЧЕСКИХ РЕКОМБИНАТОРОВ
ВОДОРОДА**

Е. М. Щенникова^{1,2}, Ю. А. Томилов^{1,2}

¹Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²Снежинский физико-технический институт
Национального исследовательского ядерного университета
«МИФИ», Снежинск, Россия

E-mail: shchennikovaem@vniitf.ru

В рамках исследований РФЯЦ – ВНИИТФ по теме водородной взрывобезопасности и управлению тяжелыми авариями на АЭС с ВВЭР планируется проведение экспериментальных исследований пассивных каталитических рекомбинаторов водорода (ПКРВ) на установке БМ-II [1]. Чтобы численно моделировать работу ПКРВ в испытаниях на установке и верифицировать модель рекомбинации водорода, требуется достаточно точно моделировать физические процессы в самой установке БМ-II.

Для этого была проведена разработка численной модели установки, а также выполнены расчеты пилотных экспериментов на ней. Эксперименты ставили своей целью проверку работоспособности установки, а также получение данных для верификации модели установки БМ-II и ее систем. Эксперименты воспроизводят основные процессы, происходящие в установке при испытаниях ПКРВ. Так, в отдельных экспериментах производился нагрев установки и остывание, нагрев внутренней среды установки с помощью сосредоточенного источника тепла в виде имитатора ПКРВ, тестировалась работа вентиляционной системы установки, работа системы подачи водорода при наличии или отсутствии устройства распределения потока.

Полученные результаты позволили оценить температуры нагрева и остывания установки, однородность полей температуры, скорости, концентрации водорода в объеме установки, установить наличие или отсутствие застойных зон. Эти данные также могут быть использованы для обоснования расположения средств измерений.

По итогам моделирования проведен сравнительный анализ результатов расчетов и экспериментальных данных. После чего была произведена доработка модели установки БМ-П и ее систем для улучшения совпадения результатов и достижения приемлемой точности. Корректировка этих моделей позволит в дальнейшем снизить их вклад в общее отклонение расчетов от данных, полученных в испытаниях ПКРВ.

Литература

1. **Безгодов, Е. В.** Обзор исследований в области изучения работы рекомбинаторов водорода. Ключевые методы определения характеристик рекомбинаторов и особенности экспериментальных постановок [Текст] : сборник научных трудов / Е. В. Безгодов, В. М. Крюков, В. А. Симоненко // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2020 по направлению «Инновационные ядерные технологии» Всероссийской научно-практической конференции, 22–23 декабря 2020 г. – М. : НИЯУ МИФИ; Снежинск : СФТИ НИЯУ МИФИ, 2020. – С. 110–112.

DEVELOPMENT OF TEST FACILITY BM-P MODEL TO TEST OF PASSIVE AUTOCATALYTIC HYDROGEN RECOMBINERS

E. M. Shchennikova^{1,2}, Y. A. Tomilov^{1,2}

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

²Snezhinsk Institute of Physics and Technology National Research Nuclear University “MEPhI”, Snezhinsk, Russia

E-mail: shchennikovaem@vniitf.ru

Within the framework of research on hydrogen safety and NPP severe accidents control with VVER in FSUE RFNC – VNIITF it is planned the conduction of experimental research of passive autocatalytic hydrogen recombiner (PAR) at the test facility BM-P [1]. In order to model

PAR operation in tests at facility numerically and to verify hydrogen recombination model, it is required to model physical processes in test facility BM-P itself fairly well.

For this purpose development of test facility numerical model was conducted, and also simulations of pilot experiments were performed on it. The purpose of the experiment was performance check of test facility, and also data obtain for facility model verification at PAR tests. Thus, in some experiments heating and cooling of test facility, heating of internal environment of test facility using lumped heat source as a PAR simulator were produced, ventilation system operation of test facility, hydrogen supply system operation with or without flow breakdown device were tested.

Obtained results made it possible to estimate heating and cooling rate of test facility, field uniformity of temperature, velocity, hydrogen concentration in test facility volume, and to specify whether or not stagnant zone. This data also can be used for validation of measuring means positioning.

Based on the simulation comparative analysis of simulation results and experimental data was conducted. Then model improvement of test facility BM-P and its systems was conducted for better agreement of results and reaching acceptable accuracy. Adjustment of these models will allow to further reduce their contribution in common simulation deviation from data, obtained in PAR tests.

References

1. **Bezgodov, E. V.** Review of hydrogen recombiners performance research. Key methods for determining the characteristics of recombiners and features of experimental settings [Text] : Collection of scientific papers / E. V. Bezgodov, V. M. Kryukov, V. A. Simonenko // Scientific session NRNU MEPhI – 2020. Meeting of thematic section in the direction of «Innovative nuclear technology», December 22–23, Snezhinsk. – 2020.

Секция 6
ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ,
ПРОГРАММЫ И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ

Section 6
NUMERICAL METHODS, ALGORITHMS,
CODES AND ACCURATE SOLUTIONS

6-1

**ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕСТА СТИВЕНА ПРИ
ПОМОЩИ КОМБИНИРОВАННОГО КОНЕЧНО-
И ДИСКРЕТНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МЕТОДА**

Хуан Бинь-бинь, Фу Хуа, Юй Инь, Ли Тао

Национальная ведущая лаборатория физики ударных волн и детонации, Институт гидродинамики, Китайская академия инженерной физики, Мянъян, Китайская народная республика

E-mail: huangbb@caep.cn

Конечно-элементный метод (FEM) сталкивается с алгоритмическими сложностями при описании разрушения и трения, а дискретно-элементный метод (DEM) – с трудностями при описании отклика структуры взрывчатых веществ. С целью решения этих проблем был разработан метод трехмерного численного моделирования, объединяющий методы FEM и DEM. Деформация внешней металлической оболочки взрывчатого вещества моделировалась методом FEM; распространение трещин и нагрев от трения – при помощи DEM; тепловыделение при разложении ВВ описывалось при помощи уравнения Аррениуса, и, наконец, было реализовано трехмерное моделирование безударного зажигания заряда при низкоскоростном ударе. Взяв в качестве примера ударные тесты Стивенса, мы выполнили моделирование повреждения и зажигания заряда хрупкого взрывчатого вещества PBX-2 при двух видах удара: ударником с шарообразной головкой и с плоской головкой. Было исследовано влияние неоднородности ВВ. Были получены данные для таких параметров как напряжение нагружения по времени, распределение трещин, кривая роста температуры, время и место зажигания, скоростной порог ударного зажигания. Были проанализированы случайные характеристики разброса ударного зажигания для ударника с шарообразной головкой и с плоской головкой. Результаты моделирования основанные на механизмах зажигания под действием трещинообразования в ВВ и тепловыделения при самореакции находятся в хорошем согласии с известными экспериментальными данными.

**THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL
SIMULATION OF STEVEN TEST BY A
COMBINED FINITE-DISCRETE ELEMENT
METHOD**

Huang Bin-bin, Fu Hua, Yu Yin, Li Tao

National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineer Physics, Mianyang 621999, China

E-mail: huangbb@caep.cn

The finite element method (FEM) has algorithmic difficulties in describing fracture and friction, while the discrete element method (DEM) has difficulties in describing the structure response of explosives. Aiming at

these problems, a three-dimensional numerical simulation combining FEM and DEM was established. The deformation of the outer metal shell of the explosive was simulated by FEM; the crack propagation and frictional heating inside the explosive were simulated by DEM; the decomposition heat release of the explosive was described by the Arrhenius equation; and finally, a three-dimensional simulation of non-impact ignition of charge low-speed impact is realized. Taking Steven impact test as an example, the charge damage and ignition simulation of the brittle explosive PBX-2 under two impact conditions of ball head projectile and flat head projectile were carried out. The influence of the non-uniformity of the explosive was investigated. The history of load stress, crack distribution, temperature rise curve, ignition time and position, and velocity threshold of impact ignition were obtained. The random dispersion characteristics of impact ignition of ball head projectile and flat head projectile were analyzed. The simulation results based on the ignition mechanisms of explosive crack friction and self-reaction heat release are in good agreement with the reported experimental results.

6-2

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЧНОСТИ
НА РАСТЯЖЕНИЕ ДЛЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ВВ**

Ли Кэ-у, Фу Хуа, Ли Тао, Чжэн Сянь-суй

Ведущая национальная лаборатория по физике ударных волн и детонации, Институт гидродинамики, Китайская академия инженерной физики, Мянъян, 621999, Китай

E-mail: bnh164@163.com

В практических применениях пластические ВВ часто используются как конструктивные детали, несущие нагрузку. В силу этого механическая прочность пластических ВВ становится важным качеством, которое необходимо учитывать при разработке ВВ. Поведение пластического ВВ исследовалось при одноосевом растяжении на основе теории механических повреждений мезомасштаба. Мы рассматривали прочность на растяжение как нагрузку, которая вызывает катастрофическое распространение трещин, при заданной теоретической модели прочности на растяжение, а также применяли теорию DMG (Domain of Microcrack Growth, область роста микротрещин) и закон соединения статистически распределенных микротрещин. В этой теоретической модели прочность на растяжение управляется углом верхнего предела DMG и коэффициентами интенсивности напряжений K_{IC} и K_{IIIC}. При помощи этой теоретической модели мы анализировали поведение при растяжении состава PBX-3 при различных температурах и разработали направления повышения прочности на растяжение при конструировании изделий из взрывчатых веществ типа PBX-3.

THE THEORETICAL MODEL OF TENSILE STRENGTH FOR PBXS

Li Ke-wu, Fu Hua, Li Tao, Zheng Xian-xu

Natioanl Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineer Physics, Mianyang 621999, China

E-mail: bnh164@163.com

In practical application, PBXs (Plastic Bonded eXplosives) are also used as structural parts to bear loads frequently. Therefore, the mechanical strength of PBX is an important property to be considered during the explosive design. Based on the mesomechanical damage theory, the uniaxial tensile behavior of PBX was studied. By treating the tensile strength as the load causing catastrophic crack extension, the theoretical model of tensile strength was given, with the application of DMG (Domain of Microcrack Growth) theory and the law of connecting statistically distributed microcracks. In this theoretical model, the tensile strength is controlled by the upper limit angle of the DMG and the stress intensity factors K_{IC} K_{IIIC}. The tensile behaviour of PBX-3 at different temperatures was analyzed by this theoretical model, and the improvement direction of elevating amount of tensile strength was provided to support the PBX-3 series' design.

6-3

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ И УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ В ОКТОГЕНА ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

Суй Чжилэй, Чун Тао, Чжэн Сянь-суй

Ведущая национальная лаборатория по физике ударных волн и детонации, Институт гидродинамики, Китайская академия инженерной физики, Мянъян, 621999, Китай

E-mail: suizhilei179@126.com

Октоген – это высокоэнергетическое взрывчатое вещество, широко применяемое в военной промышленности. Структурный фазовый переход октогена при экстремальных условиях важен для понимания реакции зажигания и механизма инициации высокоэнергетического взрывчатого вещества. В докладе мы расскажем о фазовых переходах β -октогена под действием высокого давления.

Фазовые переходы кристаллов β -октогена исследовались при помощи таких методик как Рамановская спектроскопия, спектроскопия в средней части инфракрасной области, рентгеновская дифракция при высоком давлении до 40 ГПа. Мы использовали в качестве среды, передающей давление, неон и наблюдали четыре фазовых перехода, такие как переход от β -фазы к ζ -фазе при 5,4 ГПа, переход в ε -фазу при 9,6 ГПа, в ϕ -фазу при 21,6 ГПа, и далее в η -фазу при 35,0 ГПа. В соответствии с рамановскими спектрами при высоком давлении первые два фазовых перехода октогена вызываются изменениями в группах NO_2 и кольца, а переход из ε - в ϕ -фазу – изменениями

групп CH_2 и кольца. При более высоких давлениях наблюдался вновь открытый переход из ϕ - в η -фазу, происходивший при 35,0 ГПа. На основе результатов рентгеновской дифракции при высоком давлении, все наблюдавшиеся фазы высокого давления являются изоструктурными фазами моноклинного октогена, и до давления в 38 ГПа не наблюдалось никаких резких изменений на кривой объем–давление. Это соответствует результатам по изэнтропическому сжатию и выводам из первопринципных расчетов. Настоящая работа проясняет противоречивую природу фазовых переходов β -октогена под действием давления и вновь открытые фазовые переходы при высоком давлении. Мы также исследовали процесс фазового перехода монокристаллов октогена при изэнтропическом сжатии вдоль различных кристаллографических направлений. При изэнтропическом сжатии не наблюдалось никаких признаков фазовых переходов или изменений объема.

PHASE TRANSITIONS AND EQUATION OF STATE OF β -HMX UNDER HIGH PRESSURE

Sui Zhilei, Chong Tao, Zheng Xian-xu

National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineer Physics, Mianyang 621999, China

E-mail: suizhilei179@126.com

HMX is a high-energy explosive, which has been widely applied in military weapons. The structural phase transition of HMX at extreme conditions is significance for understanding the ignition reaction and initiation mechanism of high energetic explosive. Here we report the pressure-induced phase transitions of β -HMX under high pressure.

Phase transitions of the β -HMX crystal have been studied via Raman, mid-infrared, and X-ray diffraction techniques under high pressures of up to 40 GPa. When using a neon pressure transmitting medium, we observed four phase transitions, including β -phase to ζ -phase at 5.4 GPa, ε -phase at 9.6 GPa, ϕ -phase at 21.6 GPa, and further to η -phase at 35.0 GPa. According to the high-pressure Raman spectra, the first two phase transitions of HMX are induced by the changes of the NO_2 groups and ring, whereas the ε to ϕ phase transition is attributed to the mutation of the CH_2 groups and ring. Under higher pressures, another newly discovered phase transition from ϕ to η occurred at 35.0 GPa. Based on the analysis of high-pressure X-ray diffraction results, all currently observed high-pressure phases are isostructures of monoclinic HMX, and no abrupt change in the volume has been found in the volume–pressure curve below 38 GPa. These are consistent with the isentropic compression results and the conclusion of the first-principles calculation. The present work clarifies the controversial pressure-induced phase transitions for β -HMX and the newly discovered phase transitions under high pressure. We also studied the phase transition process of the HMX single crystal under isentropic compression along different crystal orientations. No

evidence of phase transition or volume jump was observed during the isentropic compression.

6-4

**3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
ТРЕЩИН ПРИ ЛОКАЛЬНОМ
ПРОНИКНОВЕНИИ В ПЛАСТИЧЕСКОЕ ВВ
МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Вэй И, Ху Цюши, Фу Хуа, Ли Тао

Институт гидродинамики, Китайская академия
инженерной физики, Мянъян, 621999, Китай

E-mail: weiyi_202107@163.com

При помощи 3D-метода дискретных элементов мы моделировали локальное проникновение в образцы пластического ВВ колонновидной формы с ограничением и образцов ВВ квадратного сечения и проанализировали деформационное поведение образцов пластического ВВ. В результате мы описали типичные модели трещинообразования в образцах обоих типов. При внедрении в колонновидный образец с ограничением, образец раскалывается внедряющейся деталью осесимметрично, т. е. основные трещины распределены в радиальных направлениях. Однако в случае образца квадратного сечения с ограничением трещина наблюдается только вдоль проникающей детали. Благодаря концентрации сдвиговой деформации в локальной области, детали из пластического ВВ в обоих случаях испытывают существенное повреждение в поперечном сечении около той поверхности, через которую началось проникновение. Другим общим характерным признаком является V-образная недеформированная зона непосредственно под внедряющейся деталью. Кроме того, мы обнаружили, что высота недеформированной зоны уменьшается с увеличением глубины проникновения.

**SIMULATION OF CRACK FORMATION
IN LOCAL INTRUSION OF PBX USING 3D
DISCRETE ELEMENT METHOD**

Wei Yi, Hu Qiushi, Fu Hua, Li Tao

E-mail: weiyi_202107@163.com

Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineer Physics,
Mianyang 621999, China

E-mail: weiyi_202107@163.com

Abstract: By utilizing 3D discrete element method, local intrusion of constrained columniform and square PBX are simulated, and deformation behaviour of PBXs are analyzed. As a result, we find typical crack patterns in both conditions. In intrusion of constrained columniform PBX, the sample is split by the intruder axisymmetrically, i. e. main cracks are basically distributed in the radial directions of the sample. However, in constrained square PBX case, crack is only observed along the intruder. Due to shear deformation concentration in a local area, PBX

samples in both cases suffer from severe damage in a cross section near the surface where intrusion start. Another common characteristic is the 'V' type undeformed zone directly underneath the intruder. Furthermore, we find the height of the undeformed zone decreasing with the increasing intrusion depth of the intruder.

6-5

**КОНТРИМЕР К ОДНОЙ
ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ГИПОТЕЗЕ**

С. П. Баутин

Снежинский физико-технический институт Национального
исследовательского ядерного университета «МИФИ»,
Снежинск, Россия

E-mail: SPBautin@mail.ru

В газовой динамике из соотношений на сильном разрыве – на ударной волне – следует [1], что течение газа перед ударной волной дозвуковое, а за ударной волной сверхзвуковое. Исходя из этого, многие считают верным и обратное суждение, то есть считают справедливой гипотезу: если течение сверхзвуковое, то оно обязательно имеет разрыв первого рода. В данной работе построен пример конкретного течения, опровергающий эту гипотезу.

Для построения нужного течения рассматриваются изэнтропические решения системы уравнений газовой динамики при учете действия силы Кориолиса [2, 3]. При этом вводится формальный малый параметр ε и решение строится в виде бесконечных рядов по степеням ε . В качестве начальных условий при $\varepsilon = 0$ берутся постоянные значения газодинамических параметров, передающие однородный покой. Поскольку в системе уравнений газовой динамики не присутствуют производные по переменной ε , то координатная плоскость $\varepsilon = 0$ является характеристикой кратности четыре [4]. Поэтому для построения единственного решения в виде рядов по степеням ε в начальный момент времени $t = 0$ задаются конкретные распределения всех четырех газодинамических параметров [4].

Получившаяся начально-краевая задача является характеристической задачей Коши стандартного вида, у которой в некоторой окрестности точки ($t = 0$, $x = 0$, $y = 0$, $z = 0$, $\varepsilon = 0$) существует единственное аналитическое решение, представимое в виде сходящегося ряда по степеням ε [4].

При анализе области сходимости построенных рядов доказано, что существует строго положительное значение $t = t_1$, что построенный степенной ряд сходится при изменении t от нуля до t_1 в некоторой окрестности точки ($x = 0$, $y = 0$, $z = 0$, $\varepsilon = 0$). Первые коэффициенты ряда являются бегущими волнами, зависящими от переменных $(x + v^*t)$, $(x - v^*t)$, где константа v^* строго больше единицы, если положителен модуль угловой скорости вращения Земли вокруг своей оси. Следовательно, гладкие начальные возмущения однородного покоя заведомо некоторое время

t_1 будут распространяться со сверхзвуковой скоростью, то есть быстрее локальной скорости звука.

Тем самым, построенное решение системы уравнений газовой динамики опровергает гипотезу о том, что со сверхзвуковой скоростью могут распространяться только разрывные возмущения – течения с ударной волной.

Очевидно, что наступит конечный момент времени t^* , больший чем t_1 , при котором построенные ряды будут расходиться и в течении газа при $t = t^*$ возникнет особенность, приводящая к появлению сильного разрыва – ударной волны.

В работе обсуждаются математические и физические причины полученного факта.

Литература

1. **Овсянников, Л. В.** Лекции по основам газовой динамики [Текст]. – Ижевск : Ин-т компьютерных исследований, 2003. – 336 с.
2. **Баутин, С. П.** Торнадо и сила Кориолиса [Текст]. Новосибирск : Наука, 2008. – 96 с.
3. **Баутин, С. П.** Газодинамическая теория восходящих закрученных потоков [Текст] / С. П. Баутин, И. Ю. Крутова, А. Г. Обухов // Екатеринбург : УрГУПС, 2020. – 400 с.
4. **Баутин, С. П.** Характеристическая задача Коши и ее приложения в газовой динамике [Текст]. – Новосибирск : Наука, 2009. – 368 с.

A COUNTEREXAMPLE TO A GAS-DYNAMIC HYPOTHESIS

S. P. Bautin

Snezhinsk Institute of Physics and Technology National
Research Nuclear University “MEPhI”, Snezhinsk, Russia

E-mail: SPBautin@mail.ru

In gas dynamics, it follows from the relations at a strong discontinuity – at a shock wave – [1] that the gas flow before the shock wave is subsonic, and after the shock wave is supersonic. Based on this, many believe that the opposite judgment is also true, that is, they consider the hypothesis fair: if the current is supersonic, then it necessarily has a gap of the first kind. In this paper, an example of a specific current is constructed that refutes this hypothesis.

To construct the desired flow, isentropic solutions of the system of gas dynamics equations are considered, taking into account the action of the Coriolis force [2, 3]. In this case, a formal small parameter ε introduced and the solution is constructed in the form of infinite series in degrees ε . The initial conditions for $t = 0$ are constant values of the gas-dynamic parameters, which transmit a uniform rest. Since the system of equations of gas dynamics does not contain derivatives with respect to the variable ε , the coordinate plane $\varepsilon = 0$ is a characteristic of multiplicity four [4]. Therefore, to construct a single solution in the form of series by degrees ε at the initial time $t = 0$, specific distributions of all four gas-dynamic parameters are set [4].

The resulting initial-boundary value problem is a characteristic Cauchy problem of the standard form [4]. This problem in a certain neighborhood of a point ($t = 0, x = 0,$

$y = 0, z = 0, \varepsilon = 0$) has a unique analytical solution that can be represented as convergent series in powers of ε .

When analyzing the convergence region of the constructed series, it is proved that there is a strictly positive value $t = t_1$. And the constructed power series converges when t changes from zero to t_1 in some neighborhood of the point ($x = 0, y = 0, z = 0, \varepsilon = 0$). The first coefficients of the series are traveling waves that depend on the variables $(x + v^*t), (x - v^*t)$. The constant v^* is strictly greater than one if the modulus of the angular velocity of the Earth's rotation around its axis is positive. Consequently, smooth initial perturbations of homogeneous rest will propagate at supersonic speed for some time t_1 . That is, faster than the local speed of sound. Thus, the constructed solution of the system of gas dynamics equations refutes the hypothesis: only discontinuous perturbations – shock wave flows – they can propagate at supersonic speed.

It is obvious that there will come a finite time t^* greater than t_1 , at which the constructed series will diverge. Then, in the gas flow at $t = t^*$, there will be a special feature – a shock wave.

The paper discusses the mathematical and physical reasons for the obtained fact.

References

1. **Ovsyannikov, L. V.** Lectures on the basics of gas dynamics [Text]. – Izhevsk : Institute of Computer Research, 2003. – 336 p.
2. **Bautin, S. P.** Tornado and the power of Coriolis [Text]. – Novosibirsk : Nauka, 2008. – 96 p.
3. **Bautin, S. P.** Gas-dynamic theory of ascending swirling flows [Text] / S. P. Bautin, I. Yu. Krutova, A. G. Obukhov // Ekaterinburg : USURT, 2020. – 400 p.
4. **Bautin, S. P.** The Cauchy characteristic problem and its applications in gas dynamics [Text]. Novosibirsk : Nauka, 2009. – 368 p.

6-6

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗУДАРНОГО СЖАТИЯ ГАЗА ИЗ ПОКОЯ В ПОКОЙ ПРИ ЗАДАННОМ ЗАКОНЕ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

С. П. Баутин, Ю. В. Николаев

Снежинский физико-технический институт Национального
исследовательского ядерного университета «МИФИ»,
Снежинск, Россия

E-mail: SPBautin@mail.ru

Управляемый термоядерный синтез (УТС) является практически неограниченным источником энергии и уже несколько десятилетий ученые занимаются его изучением для случая, когда термоядерную реакцию пытаются вызвать без использования энергии атомного взрыва [1, 2]. Для этого требуется эффективное и устойчивое сжатие дейтериево-тритиевого топлива до очень большой плотности.

В данной работе рассмотрено безударное одномерное (случай плоской, цилиндрической и сфери-

ческой симметрии) «сжатие из покоя в покой»: из исходного покоящегося состояния несжатого газа под воздействием непроницаемого поршня осуществляется безударный переход также в покоящееся, но уже в сжатое однородное состояние. Такое сжатие является энергетически наиболее выгодным, поскольку работа непроницаемого поршня тратится только на сжатие, но не на разгон газа.

Ранее [3] задача о безударном «сжатии из покоя в покой» была решена в обратном направлении изменения времени от $t = t^*$ к $t = t_0$, где t^* – финальный момент сжатия; t_0 – начальный момент сжатия, $t_0 < t^*$. Расчеты были проведены при различных значениях массы и плотности сжатого газа. При этом было существенно учтено, что в рассчитываемом течении есть конкретная особенность [4]: в финальный момент сжатия $t = t^*$ возникает скачок плотности на поршне. Численное решение этой задачи в обратном направлении изменения времени позволило получить закон движения сжимающего непроницаемого поршня в виде набора точек пространства переменных (t, r) , в которых определены скорость и плотность газа.

В данной работе задача о безударном «сжатии из покоя в покой» решена в прямом направлении изменения времени от t_0 к t^* . Проведены расчеты течений, возникающие в первоначально покоящемся однородном газе при наличии двух непроницаемых поршней. Один из них неподвижен, а второй, сжимая газ, движется по монотонной траектории в сторону от оси или центра симметрии. Такое сжатие называем «сжатием изнутри» и оно является более устойчивым, чем сжатие газа при движении непроницаемого поршня к оси или к центру симметрии. Траектория движения сжимающего непроницаемого поршня берется из уже имеющегося решения этой задачи в обратном направлении изменения времени. В момент финального сжатия $t = t^*$ газ покоится с постоянной плотностью в 10 тысяч раз большей первоначальной. При этом во все моменты времени от начала и до окончания движения сжимающего поршня в течении не возникают ударные волны, то есть нет пересечения звуковых характеристик одного семейства. Важно отметить, что при расчете в прямом направлении изменения времени никакие внутренние для области расчета звуковые характеристики изначально не вводятся. Они, как и все течение газа в расчетной области, определяются в процессе прямого счета.

Имеется конкретное свойство течения «сжатия из покоя в покой»: в моменты времени, непосредственно предшествующие итоговому сжатию, происходит отражение газа от неподвижной стенки, которое ведет как к дополнительному повышению плотности газа, так и к уменьшению его скорости. Эта особенность течения «сжатия из покоя в покой» дает основание для следующей рекомендации к мишеням для УТС: в центр тетраэдрной мишени заранее помещать тетраэдрный сердечник из очень плохо сжимаемого материала, имеющий соответствующие размеры и стороны которого вогнуты к центру тетраэдра.

Литература

1. **Илькаев, Р. И.** Исследование проблем термоядерного синтеза на мощных лазерных установках [Текст] / Р. И. Илькаев, С. Г. Гаранин // Вестник РАН. – 2006. – Т. 76, № 6. – С. 503–513.
2. **Bernstein, L. A.** Reactions on Excited States using the National Ignition Facility. Nuclear Astrophysics using NIF. LLNL, 2007. – Preparation / Lawrence Livermore National Laboratory; UCRL PRES-233342.
3. **Баутин, С. П.** Численное решение задачи о сжатии газа из покоя в покой [Текст] / С. П. Баутин, Ю. В. Николаев // Вычислительные технологии. – 2020. – Т. 25, № 5.
4. **Баутин, С. П.** Математическое моделирование сильного сжатия газа [Текст] // Новосибирск : Наука, 2007. – 312 с.

NUMERICAL SIMULATION OF SHOCKLESS GAS COMPRESSION FROM REST TO REST WITH GIVEN EXTERNAL INFLUENCE

S. P. Bautin, Yu. V. Nikolaev

Snezhinsk Institute of Physics and Technology National Research Nuclear University “MEPhI”, Snezhinsk, Russia

E-mail: SPBautin@mail.ru

Controlled thermonuclear fusion (CTF) is an almost unlimited source of energy and for several decades scientists have been studying it for the case when a thermonuclear reaction is attempted without using the energy of an atomic explosion [1, 2]. This requires an efficient and stable compression of deuterium-tritium fuel to a very high density.

In this paper, we consider an shockless one-dimensional (cases of plane, cylindrical and spherical symmetry) “compression from rest to rest”: from the initial resting state of an uncompressed gas, under the influence of an impermeable piston, a shockless transition is also carried out to a resting, but already compressed, homogeneous state. This compression is energetically most advantageous, since the work of the impermeable piston is spent only on compression, but not on gas acceleration.

Earlier [3], the problem of shockless «compression from rest to rest» was solved in the reverse direction of the time change from $t = t^*$ to $t = t_0$, where t^* is the final moment of compression, the period t_0 is the initial moment of compression, $t_0 < t^*$. The calculations were carried out at different values of the mass and density of the compressed gas. At the same time, it was significantly taken into account that there is a specific feature in the calculated flow [4]: at the final moment of compression $t = t^*$, there is a jump in the density on the piston. The numerical solution of this problem in the reverse direction of time change allowed to obtain the trajectory of compressive impermeable piston in the form of a set of points in the space of variables (t, r) , in which the velocity and density of the gas are determined.

In this paper, the problem of shockless “compression from rest to rest” is solved in the forward direction of time change from t_0 to t^* . Calculations of the flows arising in an initially stationary homogeneous gas in the presence of two impermeable pistons are carried out. One of them is stationary, and the second, compressing the gas,

moves along a monotonous trajectory away from the axis or center of symmetry. This compression is called “internal compression” and it is more stable than the compression of the gas when the impervious piston moves to the axis or to the center of symmetry. The trajectory of the compressive impervious piston is taken from the existing solution of this problem in the opposite direction of time change. At the moment of final compression $t = t^*$, the gas is at rest with a constant density 10 thousand times greater than the original one. At the same time, at all times from the beginning to the end of the movement of the compressing piston, shock waves do not occur during the flow, that is, there is no intersection of the characteristic lines of the same family. It is important to note that when calculating in the forward direction of the time change, no characteristic lines internal to the calculation area are initially entered. They, as well as all gas flow in the calculation area, are determined in the process of direct counting.

There is a specific property of the “compression from rest to rest” flow: at the moments of time immediately preceding the final compression, the gas is reflected from the stationary piston, which leads both to an additional increase in the gas density and to a decrease in its velocity. This feature of the “compression from rest to rest” flow provides the basis for the following recommendation for CTF targets: in the center of the tetrahedral target, a tetrahedral core made of a very poorly compressible material, having the appropriate dimensions and the sides of which are concave to the center of the tetrahedron, should be placed in advance.

References

1. **Ilkaev, R. I.** Investigation into thermonuclear fusion at high-power laser facilities [Text] / R. I. Ilkaev, S. G. Garanin // Bulletin of the Russian Academy of Sciences, 2006. – Vol. 76, No. 6. – pp. 503–513.
2. **Bernstein, L. A.** Reactions to excited states using the National Ignition System. Nuclear astrophysics using NIF. LLNL, 2007. – Preparation / Lawrence Livermore National Laboratory; UCRL PRES-233342.
3. **Bautin, S. P.** Numerical solution of the problem of gas compression from rest to rest [Text] / S. P. Bautin, Yu. V. Nikolaev // Computational technologies. – 2020. – Vol. 25, No. 5.
4. **Bautin, S. P.** Mathematical modeling of strong gas compression [Text] // Novosibirsk : Nauka, 2007. – 312 p.

6-7

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РЕАЛИЗАЦИИ И ПРИМЕНЕНИЯ (k - ϵ)-МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В КОНЕЧНО-ОБЪЕМНОМ ПОДХОДЕ

М. И. Болдырев, И. В. Глазырин,
Н. А. Михайлов, М. Н. Чижков

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Стандартная (k - ϵ)-модель расширена [1] для учета турбулентного потока массы и объединена с подробной системой уравнений Навье–Стокса [2] для описания перемешивания в условиях неустойчивости Рихтмайера–Мешкова [3].

Дискретизация системы дифференциальных уравнений осуществляется с помощью метода конечных объемов. Для разделения системы уравнений на гиперболическую и параболическую подсистемы используется подход разделения на процессы [4]. Для решения гиперболической подсистемы применяется приближенный решатель задачи Римана и TVD-реконструкция [4]. Параболическая подсистема решается построением матрицы СЛАУ.

Рассматривается несколько приближенных решателей задачи Римана и разновидностей TVD-реконструкции для поиска оптимальной схемы решения системы уравнений турбулентной газовой динамики.

Полученная в результате численная схема апробируется на ряде экспериментов [5–7] по измерению ширины зоны перемешивания при неустойчивости Рихтмайера–Мешкова. Выбор начальных значений величин k , ϵ и параметров модели турбулентности позволяет добиться соответствия между результатами расчетов и экспериментами.

Литература

1. **Morán-López, J. T.** Multicomponent Reynolds-averaged Navier–Stokes simulations of reshocked Richtmeyer–Meshkov instability-induced mixing [Text] / J. T. Morán-López, O. Schilling // High Energy Density Phys. – 2013. – 9, 112–121.
2. **Гиршфельдер, Дж.** Молекулярная теория газов и жидкостей [Текст] / Дж. Гиршфельдер, Ч. Кергисс, Р. Берд. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1961.
3. **Meshkov, E. E.** Instability of the Interface of Two Gases Accelerated by a Shock Wave [Text] // Soviet Fluid Dynamics, 1969. – 4, 5, 101–104.
4. **Toro, E.** Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamic. A Practical Introduction [Text]. – Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.
5. **Leinov, E.** Experimental and numerical investigation of the Richtmeyer–Meshkov instability under re-shock conditions [Text] / E. Leinov, G. Malamud, Y. Elbaz, L. A. Levin, G. Bendor, D. Shvarts, O. Sadot // J. of Fluid Mech. – 2009. – 626, 449–475.
6. **Vetter, M.** Experiments of the Richtmeyer–Meshkov instability of an air/SF6 interface [Text] / M. Vetter, B. Sturtevant // Shock Waves, 1995. – 4, 247–252.

7. **Poggi, F.** Velocity measurements in turbulent gaseous mixtures induced by Richtmeyer-Meshkov instability [Text] / F. Poggi, M.-H. Thorembey, G. Rodrigez // *Phys. Fluids*. – 1998. – 10, 2698–2700.

7. **Poggi, F.** Velocity measurements in turbulent gaseous mixtures induced by Richtmeyer-Meshkov instability [Text] / F. Poggi, M.-H. Thorembey, G. Rodrigez // *Phys. Fluids*. – 1998. – 10, 2698–2700.

**ON THE NUANCES
OF THE IMPLEMENTATION AND APPLICATION
OF (k - ϵ)-TURBULENCE MODEL IN THE FINITE
VOLUME METHOD**

M. I. Boldyrev, I. V. Glazyrin,
N. A. Mikhailov, M. N. Chizhkov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

Standard (k - ϵ)-model was expanded [1] to account turbulent mass flux and combined with detailed Navier–Stokes system of equations [2] for description of mixing in case of Richtmeyer–Meshkov instability [3].

Discretization of a system of differential equations was conducted by the means of finite volume method. For division of the system of equations onto hyperbolic and parabolic subsystems division on processes method was used [4]. Solution of hyperbolic subsystem was acquired by using approximate Riemann solver and TVD-reconstruction [4]. Parabolic subsystem was solved by construction of SLE-matrix.

Several approximate Riemann solvers and TVD-reconstruction types were tested to deduce optimal scheme for solution of system of equations of turbulent gas dynamics.

Resulting numerical scheme was applied to series of experiments [5–7], where mixing zone width was measured in presence of Richtmeyer–Meshkov instability. Varying initial conditions of k , ϵ and parameters of model, agreement between simulations and experimental results was achieved.

References

1. **Morán-López, J. T.** Multicomponent Reynolds-averaged Navier–Stokes simulations of reshocked Richtmeyer-Meshkov instability-induced mixing [Text] / J. T. Morán-López, O. Schilling // *High Energy Density Phys.* – 2013. – 9, 112–121.
2. **Гиршфельдер, Дж.** Молекулярная теория газов и жидкостей [Текст] / Дж. Гиршфельдер, Ч. Кертисс, Р. Берд. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1961.
3. **Meshkov, E. E.** Instability of the Interface of Two Gases Accelerated by a Shock Wave [Text] // *Soviet Fluid Dynamics*, 1969. – 4, 5, 101–104.
4. **Toro, E.** Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamic. A Practical Introduction [Text]. – Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.
5. **Leinov, E.** Experimental and numerical investigation of the Richtmeyer–Meshkov instability under re-shock conditions [Text] / E. Leinov, G. Malamud, Y. Elbaz, L. A. Levin, G. Bendor, D. Shvarts, O. Sadot // *J. of Fluid Mech.* – 2009. – 626, 449–475.
6. **Vetter, M.** Experiments of the Richtmeyer-Meshkov instability of an air/SF6 interface [Text] / M. Vetter, B. Sturtevant // *Shock Waves*, 1995. – 4, 247–252.

6-8

**РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ПРОЧНОСТИ ВЗРЫВ-ЗАСЛОНКИ
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗАКЛАДКАХ ВВ**

И. О. Боровский, С. В. Балушкин, Г. В. Куликов,
М. А. Липатников, М. В. Никульшин,
А. Ю. Симонов, А. Н. Хрулёв

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забахина,
Снежинск, Россия

E-mail: borovskii-95@mail.ru

Одним из основных элементов системы экологической безопасности, используемой для проведения экспериментов по исследованию динамических свойств спецматериалов является взрыв-заслонка (клин-затвор), которая обеспечивает одну из ступеней герметизации нагружающего устройства.

В работе с помощью численного моделирования определяются величины скорости движения заслонки и время ее полного закрытия при различных закладках ВВ (6, 12, 15, 24 и 50 г). Проведены газодинамические расчеты при одновременном движении заслонки и газа в проходном канале. Определены давления на заслонку от движения газа в процессе движения ударника в проходном канале. Проведена оценка прочности заслонки для выбранных рабочих скоростей заслонки при наличии газа в проходном канале. Показано, что заслонка сохраняет прочность для обеспечения герметизации.

**COMPUTATIONAL SUBSTANTIATION OF
WEDGE PLUG STRENGTH AT DIFFERENT HE
CHARGE SIZES**

I. O. Borovsky, S. V. Balushkin, G. V. Kulikov,
M. A. Lipatnikov, M. V. Nikulshin,
A. Yu. Simonov, A. N. Khrulyov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

E-mail: borovskii-95@mail.ru

One of the basic elements of the environmental safety system used in the experiments studying properties of special materials is a wedge plug (blast gate) that ensures one of hermetization stages of a loading device.

Using numerical simulation, we determined the wedge speed and the time of its complete closure at different HE charge sizes (6, 12, 15, 24, and 50 g). We performed gas-dynamic computations for simultaneous movement of a wedge and gas in a passage channel. We calculated the pressure applied to the wedge due to gas travel caused by

impactor movement in the passage channel. The wedge strength was evaluated for selected working speeds of the wedge in the presence of gas in the passage channel. It is shown that the wedge preserves its strength to provide hermetization.

6-9

ЧАСТНЫЕ РЕШЕНИЯ ЛИНЕАРИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ ПРИ УЧЕТЕ ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ КОРИОЛИСА

А. А. Бугаенко^{1,2}, И. Ю. Крутова²

¹Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия

²Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Снежинск, Россия

E-mail: bugaenkoanya@yandex.ru

Природные восходящие закрученные потоки (ВЗП): торнадо, тропические циклоны, огненные вихри представляют собой сложные и еще достаточно мало изученные явления с точки зрения их возникновения и продолжительного функционирования. Надежное теоретическое изучение этих потоков возможно только с использованием системы уравнений газовой динамики СУГД при учете действия сил тяжести и Кориолиса [1]. В силу нелинейности СУГД построение ее решений является достаточно трудоемким. Это и послужило причиной линейризации СУГД на ее точных решениях [2].

В докладе приведена линейризованная на этом точном решении СУГД при учете силы Кориолиса и не учете силы тяжести. Не учет действия силы тяжести возможен при исследовании газодинамических течений в придонных частях природных ВЗП, в которых параметры газа несильно зависят от высоты. Для полученной линейризованной системы в явном виде построены конкретные решения.

Для построения частных точных решений в одном случае предполагалось, что они не зависят от переменных x и z , а во втором случае – что не зависят от переменных x и y . В обоих вариантах искомое частное решение – нестационарное, представляющее собой комбинацию функций синуса и косинуса. С использованием соответствующих тригонометрических формул получается, что частные решения являются бегущими волнами. Для случая каждой из независимых переменных y и z получено по две скорости распространения бегущих волн. Причем для конкретных широт и в случае независимой переменной y , и в случае независимой переменной z одна из скоростей больше единицы. В отличие от случая, когда учтена зависимость только от переменной x , где частное решение в виде бегущей волны распространяется в разные стороны с одной одинаковой скоростью.

Наличие для СУГД нескольких скоростей распространения бегущих волн является достаточно неожиданным фактом. Подобное случается только в случае многокомпонентных сред [3]. Очевидно, что этот факт связан с тем, что в СУГД учитывается действие силы Кориолиса.

Полученное решение моделируется численным методом Рунге–Кутты четвертого порядка точности. Восстанавливаются мгновенные линии тока при численном решении соответствующих систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Которые являются замкнутыми окружностями и направление движения частиц газа вдоль этих мгновенных линий тока осуществляется по ходу часовой стрелки, также как происходит закрутка в придонной части ВЗП.

Литература

1. **Баутин, С. П.** Газодинамическая теория восходящих закрученных потоков [Текст] / С. П. Баутин, И. Ю. Крутова, А. Г. Обухов // Екатеринбург : УрГУПС, 2020. – С. 400
2. **Баутин, С. П.** Линейризованная система уравнений газовой динамики при учете действия силы Кориолиса: препринт [Текст] / С. П. Баутин, И. Ю. Крутова // Снежинск : СФТИ НИЯУ МИФИ, 2019. – С. 60.
3. **Баутин, С. П.** Скорость звука в многокомпонентной покоящейся среде [Текст] // Прикладная механика и техническая физика. – 2008. – Т. 49, № 3. – С. 35–44.

PARTICULAR SOLUTIONS OF A LINEARIZED HYDRODYNAMICS EQUATIONS WITH CORIOLIS FORCE

A. A. Bugayenko^{1,2}, I. Y. Krutova²

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

²Snezhinsk Institute of Physics and Technology National Research Nuclear University “MEPhI”, Snezhinsk, Russia

E-mail: bugaenkoanya@yandex.ru

The naturally rising skewed streams (RSS) – tornado, tropical cyclones, or fire whirls – are sophisticated and still poorly understood phenomena as to their initiation and duration. A sound theoretical consideration of these phenomena is only possible through the use of a system of hydrodynamics (SHE) which include gravity and Coriolis force [1]. The system is nonlinear and hence difficult to solve. Just this is the reason for our linearization of the system on the basis of its exact solutions [2].

The paper presents a linearized SHE with Coriolis force but with no account for gravity. Gravity can be neglected in the bottom parts of the RSS where the parameters of gas are not strongly dependent on height. Particular solutions are derived for the linearized system in explicit form.

The particular exact solutions were derived under the assumption that they were independent on the variables: 1) x and z , and 2) x and y . In both cases, the sought solution is a non-stationary and represents a combination of sine and cosine functions. With the appropriate trigonometric functions we came to particular solutions which

appeared to be traveling waves. For each of the independent variables y and z , we obtained two velocities for the traveling waves, and one of them was greater than unity both for y and z . This is in contrast to the case where the particular solution is only dependent on x and the traveling waves propagate in different directions with one and the same speed.

Several velocities for traveling waves which are solutions to a SHE is a rather unexpected outcome. Such a situation is only possible for multicomponent media [3]. This is clearly a result of the accounting for Coriolis force.

The solution is modeled with a fourth-order Runge-Kutta method. We solve appropriate systems of ordinary differential equations to reconstruct instantaneous streamlines. They are closed circles and gas particles move along them clockwise like skewing in the bottom part of the flow.

References

1. **Bautin, S. P.** Hydrodynamic of skewed upward streams [Text] / S. P. Bautin, I. Yu. Krutova, A. G. Obukhov // Yekaterinburg : Ural State University Press, 2020. – P. 400.
2. **Bautin, S. P.** A linearized system of hydrodynamic equations with Coriolis force [Text] / S. P. Bautin, I. Yu. Krutova // Snezhinsk Engineering Physics Institute, 2019. 60 p.
3. **Bautin, S. P.** Sound velocity in multicomponent media at rest [Text] // J. Applied Mechanics and Engineering Physics. – 2008. – V. 49, No. 3. – P. 35–44.

6-10

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛОКАЛЬНЫХ ДИСКРЕТНЫХ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТАХ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ

М. В. Ветчинников, М. А. Дёмина,
Н. С. Самсонова, В. Н. Софронов

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия
E-mail: MVVetchinnikov@vniief.ru, VNSofronov@vniief.ru

Представлен бессеточный метод численного решения задач механики сплошной среды, основанный на дискретной гамильтоновой динамике. Для численного решения гамильтоновых уравнений используются симплектические разностные схемы.

Для решения задач с необратимыми деформациями дискретный подход дополнен учетом диссипативных процессов – вязкости и пластичности. При моделировании упругопластических течений система уравнений дискретной модели дополнена соотношениями для вычисления тензора пластической дисторсии.

Представлены результаты расчетов ударно-волновых процессов в однородных и микронеоднородных средах.

USE OF NONLOCAL DISCRETE METHODS OF COMPUTATIONAL MODELLING TO NUMERICALLY SOLVE OF CONTINUUM MECHANICS PROBLEMS

M. V. Vetchinnikov, M. A. Dyomina,
N. S. Samsonova, V. N. Sofronov

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific
Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia
E-mail: MVVetchinnikov@vniief.ru, VNSofronov@vniief.ru

The paper presents a computational continuum mechanics method based on discrete Hamiltonian dynamics. Hamilton's equations are numerically solved using symplectic difference schemes.

To solve problems with irreversible deformations, the discrete approach is supplemented by taking into account dissipative processes – viscosity and plasticity. When modeling elastic-plastic flows, the system of equations of the discrete model is supplemented with relations for calculating the plastic distortion tensor.

Examples of shock-waves processes in uniform medium and microinhomogeneous medium are provided.

6-11

МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ ЛОГОС ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ТЕПЛОМЫМ ВЗРЫВОМ ВВ НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОСТАДИЙНОЙ КИНЕТИКИ ТЕРМОРАЗЛОЖЕНИЯ

А. Ю. Вишняков, А. А. Кабаев,
В. А. Глазунов, С. А. Кабаев

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

Для расчетного определения поведения конструкций с взрывчатыми веществами (ВВ) в условиях внешнего нагрева в модуле расчета теплопроводности пакета программ Логос [1] реализована модель воспламенения ВВ, основанная на трехстадийной кинетике терморазложения, в которой учитываются лимитирующие химические реакции, определяющие процесс воспламенения.

С использованием модели воспламенения выполнено численное моделирование мелкомасштабных (масса ВВ несколько граммов) и крупномасштабных (масса ВВ несколько килограммов) экспериментов с тепловым взрывом ВВ на основе октогена при различных режимах внешнего нагрева: мелкомасштабные опыты [2] со статическим нагревом, являющиеся наиболее жестким тестом для верификации теоретических моделей воспламенения ВВ, и крупномасштабные опыты [3] с динамическим (линейным) нагревом образцов ВВ. Определены характер и параметры воспламенения (время задержки воспламенения, положение очага воспламенения, поля температуры

и концентраций ВВ). Показано, что трехстадийная кинетика терморазложения ВВ позволяет достаточно точно (в пределах погрешности эксперимента) описывать влияние масштабного фактора и режима нагрева на воспламенение ВВ.

Литература

1. **Дерюгин, Ю. Н.** Многофункциональный пакет программ ЛОГОС: физико-математические модели расчета задач аэро-, гидродинамики и теплопереноса [Текст] : Препринт / Ю. Н. Дерюгин, Д. К. Зеленский, В. А. Глазунов и др. – Саров : РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2013. – С. 111.
2. **McGuire, R. R.** Chemical Decomposition Models for Thermal Explosion of Confined HMX, TATB, RDX, and TNT Explosives [Text] / R. R. McGuire and C. M. Tarver // Seventh Symp. (Int.) on Detonation, 1981.
3. **Tarver, C. M.** On the Violence of Thermal Explosion in Solid Explosives [Text] / C. M. Tarver, S. K. Chidester, L. G. Green, and P. A. Urtiew // Comb. And Flame 110. – 1997. – P. 264–280.

THERMAL EXPLOSION OF EXPLOSIVES ON THE OCTOGEN BASIS USING MULTISTAGE KINETICS OF THERMAL DECOMPOSITION

A. Yu. Vishnyakov, A. A. Kabaev,
V. A. Glazunov, S. A. Kabaev

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific
Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

To calculate the behavior of constructions with explosives under the conditions of an external heating in the heat transfer module of the Logos software package [1] has implemented the ignition model of explosive based on the three-stage kinetics of thermal decomposition which takes into account the limiting chemical reactions that determine the ignition process.

Using the ignition model, numerical modeling of small-scale (explosive mass of several grams) and large-scale (explosive mass of several kilograms) experiments was performed. It was experiments with a thermal explosion based on HMX under various modes of external heating: small-scale experiments [2] with static heating which are the strictest test for verifying theoretical models of explosive ignition, and large-scale experiments [3] with dynamic (linear) heating of explosive samples. The character and parameters of ignition (ignition delay time, position of the ignition source, temperature and explosive concentration fields) have been determined. It is shown that the three-stage kinetics of explosives thermal decomposition makes it possible to describe quite accurately (within the experimental error) the effect of the scale factor and heating mode on the ignition of explosives.

References

1. **Deryugin, Yu. N.** Multifunctional software package LOGOS: physical and mathematical models for calculating the problems of aerodynamics, hydrodynamics and heat transfer [Text] : Preprint. RFNC – VNIIEF / Yu. N. Deryugin, D. K. Zelensky, V. A. Glazunov and others. – Sarov : RFNC – VNIIEF, 2013. – P. 111.

2. **McGuire, R. R.** Chemical Decomposition Models for Thermal Explosion of Confined HMX, TATB, RDX, and TNT Explosives [Text] / R. R. McGuire and C. M. Tarver // Seventh Symp. (Int.) on Detonation, 1981.

3. **Tarver, C. M.** On the Violence of Thermal Explosion in Solid Explosives [Text] / C. M. Tarver, S. K. Chidester, L. G. Green, and P. A. Urtiew // Comb. And Flame 110. – 1997. – P. 264–280.

6-12

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О ТОЧЕЧНОМ ВЗРЫВЕ

В. И. Волков, Н. С. Еськов, В. Н. Ногин

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

В докладе приведены результаты численного исследования устойчивости решения задачи Л. И. Седова (Дж. Тейлора) о точечном взрыве. Рассматривались газодинамические течения, возникающие в сферических системах, заполненных газом. Для описания вещества использовались уравнения состояния идеального газа с различными показателями адиабаты. Малые возмущения задавались на границе области мгновенного энерговыделения.

Проводится сравнение полученных численных результатов с автоматическим точным решением Л. И. Седова и с данными теоретических исследований.

NUMERICAL STUDY OF SOLUTION STABILITY FOR THE POINT EXPLOSION PROBLEM

V. I. Volkov, N. S. Eskov, V. N. Nogin

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

The paper presents results of our numerical study into solution stability for L. I. Sedov's (J. Taylor's) problem on point explosion. Hydrodynamic flows in gas-filled spherical systems were considered. Equations of state for ideal gas with different adiabatic exponents were used to describe matter. Small perturbations were defined on the boundary of the instantaneous energy release region.

Our numerical results are compared with the self-similar exact solution derived by L. I. Sedov and theoretical results.

6-13

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
СОУДАРЕНИЯ ПРОФИЛИРОВАННЫХ
МЕДНЫХ ЦИЛИНДРОВ
С ЖЕСТКОЙ СТЕНКОЙ**

Н. А. Грачёва, Е. С. Родионов, А. Е. Майер

Челябинский государственный университет,
Челябинск, Россия

E-mail: nagra45da@gmail.com

В связи с широким применением меди и медных сплавов существует большое количество исследований поведения данного материала при различных степенях и скоростях нагружения.

В данной работе приведены результаты численного моделирования процесса деформации OFHC медных образцов составной цилиндрической и конусообразной формы. Задача решалась в трехмерной постановке с использованием бессеточного метода гидродинамики сглаженных частиц. Математическая модель включает в себя дислокационную модель пластичности металлов [1, 2], модель разрушения [3, 4] и построенные искусственные нейронные сети (ИНС), используемые в качестве аппроксимации уравнения состояния и предсказания нуклеации дислокаций [5]. Для обучения ИНС проведено молекулярно-динамическое моделирование равномерного изотермического всестороннего сжатия и растяжения кристалла меди в широком диапазоне температур и сдвига кристалла в различных направлениях. Результаты численного моделирования сравнивались с экспериментальными данными модифицированного теста Тейлора профилированных медных образцов.

Работа поддержана Минобрнауки РФ (гос. задание № 075-00992-21-00) в части разработки уравнения состояния в форме ИНС, РФФ (проект № 20-11-20153) в части описания разрушения и исследования нуклеации дислокаций.

Литература

1. **Krasnikov, V. S.** Dislocation based high-rate plasticity model and its application to plate-impact and ultra short electron irradiation simulations [Text] / V. S. Krasnikov, A. E. Mayer and A. P. Yalovets // *Int. J. Plast.* – 2011. – Vol. 27. – P. 1294–1308.
2. **Krasnikov, V. S.** Influence of local stresses on motion of edge dislocation in aluminum [Text] / V. S. Krasnikov, A. E. Mayer // *Int. J. Plast.* – 2018. – Vol. 101. – P. 170–187.
3. **Mayer, A. E.** Evolution of pore ensemble in solid and molten aluminum under dynamic tensile fracture: Molecular dynamics simulations and mechanical models [Text] / A. E. Mayer and P. N. Mayer // *Int. J. Mech. Sc.* – 2019. – Vol. 157–158. – P. 816–832.
4. **Mayer, A. E.** Strain rate dependence of spall strength for solid and molten lead and tin [Text] / A. E. Mayer and P. N. Mayer // *Int. J. Fract.* – 2020. – Vol. 222. – P. 171–195.
5. **Mayer, A. E.** Dislocation nucleation in Al single crystal at shear parallel to (111) plane: Molecular dynamics simulations and nucleation theory with artificial neural networks [Text] / A. E. Mayer, V. S. Krasnikov, V. V. Pogorelko // *Int. J. Plast.* – 2021. – Vol. 139. – 102953 p.

**NUMERICAL SIMULATION
OF IMPACT TESTS OF PROFILED
COPPER CYLINDERS WITH A RIGID WALL**

N. A. Grachyova, A. E. Mayer, E. S. Rodionov

Chelyabinsky State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: nagra45da@gmail.com

Due to the widespread use of copper and copper alloys, there is a large number of studies on the behavior of this material at various degrees and rates of loading.

This paper presents the results of numerical modeling of the OFHC deformation process of copper samples of composite cylindrical and conical shapes. The problem was solved in a three-dimensional formulation using the gridless method of smoothed particle hydrodynamics. The mathematical model includes a dislocation model of plasticity of metals [1, 2], a fracture model [3, 4] and constructed artificial neural networks (ANNs) used as an approximation of the equation of state and prediction of dislocation nucleation [5]. Molecular dynamics modeling of uniform isothermal all-round compression and tension of a copper crystal in a wide range of temperatures and crystal shear in various directions for ANN training has been carried out. The numerical simulation results were compared with the experimental data of the modified Taylor test of profiled copper samples.

The work is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state assignment No. 075-00992-21-00) in the part of the equation of state and by the Russian Science Foundation (project No. 20-11-20153) in the part of the description of destruction and study of dislocation nucleation.

References

1. **Krasnikov, V. S.** Dislocation based high-rate plasticity model and its application to plate-impact and ultra short electron irradiation simulations [Text] / V. S. Krasnikov, A. E. Mayer and A. P. Yalovets // *Int. J. Plast.* – 2011. – Vol. 27. – P. 1294–1308.
2. **Krasnikov, V. S.** Influence of local stresses on motion of edge dislocation in aluminum [Text] / V. S. Krasnikov, A. E. Mayer // *Int. J. Plast.* – 2018. – Vol. 101. – P. 170–187.
3. **Mayer, A. E.** Evolution of pore ensemble in solid and molten aluminum under dynamic tensile fracture: Molecular dynamics simulations and mechanical models [Text] / A. E. Mayer and P. N. Mayer // *Int. J. Mech. Sc.* – 2019. – Vol. 157–158. – P. 816–832.
4. **Mayer, A. E.** Strain rate dependence of spall strength for solid and molten lead and tin [Text] / A. E. Mayer and P. N. Mayer // *Int. J. Fract.* – 2020. – Vol. 222. – P. 171–195.
5. **Mayer, A. E.** Dislocation nucleation in Al single crystal at shear parallel to (111) plane: Molecular dynamics simulations and nucleation theory with artificial neural networks [Text] / A. E. Mayer, V. S. Krasnikov, V. V. Pogorelko // *Int. J. Plast.* – 2021. – Vol. 139. – 102953 p.

6-14

ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ И ТЕПЛООБМЕН В ЗАПЫЛЕННОМ ГАЗЕ

О. Н. Дементьев, Г. Ф. Костин, Н. Н. Тихонов

Челябинский государственный университет,

Челябинск, Россия

E-mail: dement@csu.ru

При движении летательных аппаратов в плотных слоях атмосферы поверхность теплозащитных покрытий разрушается, происходит механический унос твердых частиц покрытия в пограничный слой. Массу и размеры частиц на участке их движения можно считать неизменными. Малость размеров частиц позволила использовать в работе модель «растворенной» в пограничном слое твердой фазы [1]. В линейном приближении профилей скоростей и концентрации твердой примеси решена система уравнений пограничного слоя и уравнения сохранения облака твердых частиц, получена зависимость толщины пограничного слоя от характера распределения частиц по слою.

В работе проведена оценка распределения уносимых частиц в пограничном слое на поверхности летательного аппарата типа затупленного по сфере конуса и их влияния на переход ламинарного течения в пограничном слое в турбулентное. Запыленность пограничного слоя может существенно (на 3–5%) снизить величину линейного уноса и коэффициент сопротивления летательного аппарата. Наличие примеси твердых частиц приводит к увеличению теплового потока тоже примерно на 4–5%.

Литература

1. **Костин, Г. Ф.** Влияние структурных неоднородностей углерод-углеродных композиционных материалов тепловой защиты гиперзвуковых летательных аппаратов на разбросы обгарных форм [Текст] / М. Г. Булыгин, О. Н. Дементьев, Г. Ф. Костин, Ю. М. Ковалев, Н. Н. Тихонов, Ш. Ш. Ягофаров // Конструкции из композиционных материалов. – 2004. – № 3.

BOUNDARY LAYER AND HEAT EXCHANGE IN DUSTY GAS

O. N. Dementev, G. F. Kostin, N. N. Tikhonov

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: dement@csu.ru

At movement of flying devices in dense layers of an atmosphere the surface of heat-shielding coverings collapses, there is a mechanical ablation of firm particles of a covering in a boundary layer. On a site of their movement it is possible to consider weight and the sizes of particles constant. A little the sizes of particles has allowed to use in work model of the firm phase “dissolved” in a boundary layer [1]. In linear approach of structures of speeds and concentration of a firm impurity the system of equations of a boundary layer and the equation of preservation of a cloud of firm particles is solved, dependence

of thickness of a boundary layer on character of distribution of particles on a layer is received.

In work the estimation of distribution removed particles in a boundary layer on a surface of the flying device of type of the cone blunted on sphere and their influences on transition of laminar current in a boundary layer in turbulent is lead. The dust content of a boundary layer can be essential (on 3–5%) to lower size of linear ablation and factor of resistance of the flying device. Presence of an impurity of firm particles leads to increase in a thermal stream too approximately on 4–5%.

Reference

1. **Kostin, G. F.** Structural inhomogeneities influence of carbon-carbon composite materials for hypersonic heat shield of aircraft on the spreads in ablating forms [Text] / M. G. Bulygin, O. N. Dementyev, G. F. Kostin, Yu. M. Kovalev, N. N. Tikhonov, Sh. Sh. Yagofarov // Designs from composite materials. – 2004. – No. 3.

6-15

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ НАНОКОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ РММА

Н. С. Дюрягина¹, А. П. Яловец^{1,2}¹Южно-Уральский государственный университет (НИУ),
Челябинск, Россия²Челябинский государственный университет, Челябинск,
Россия

E-mail: diuriaginans@susu.ru

Интерес к исследованию фотолюминесценции нанокomпозиционных материалов на основе полимеров, например ПММА, обусловлен их широким применением в разработке различных оптоэлектронных устройств [1–6]. В качестве включений, как правило, используют полупроводниковые наночастицы, например CdS, которые способны излучать в широком диапазоне длин волн в зависимости от их размера [1–6]. Обзор литературы показал, что внедрение наночастиц CdS в ПММА, не только увеличивает интенсивность фотолюминесценции и коэффициент поглощения [1–6], но и уменьшает время релаксации облученного материала к исходному состоянию [6–8], что позволяет использовать оптоэлектронные устройства в условиях повышенной радиации.

Теоретическая модель основана на модели Роуза-Фаулера (РФ), которая наилучшим образом описывает процессы, определяющие электрофизические свойства нанокomпозиционных материалов [6–8], учитывая процессы ионизации и рекомбинации носителей заряда, освобождение и захват носителей заряда на локализованные состояния за счет процессов фотопоглощения и фотоиспускания. Также теоретическая модель учитывает перенос излучения через вещество и температурные эффекты.

В данной работе на основе модели РФ исследуются спектры поглощения и фотолюминесценции, необлученного чистого ПММА, а также нанокompозита ПММА, с включением наночастиц CdS размера от 2 до 10 нм и концентрации до 10 об.%, а также материалов подверженных воздействию ионизирующим излучением разной мощности и длительности.

Литература

1. **Zidan, H. M.** Structural and optical properties of pure PMMA and metal chloride-doped PMMA films [Text] / H. M. Zidan, M. Abu-Elnader // *Physics B*. – 2005. – Vol. 355. – P. 308–317.
2. **Khanna, P. K.** Light emitting CdS quantum dots in PMMA: Synthesis and optical studies [Text] / P. K. Khanna, N. Singh // *Journal of Luminescence*. – 2007. – Vol. 127. – P. 474–482.
3. **Magerramov, A. M.** [Text] / , A. M. Magerramov, M. A. Razanazov, F. V. Gadzhieva// *Inorganic materials: applied research*. – 2008. – 1. – P. 71–74. (In rus)
4. **Svetlichnii, V. A.** Fetures of fluorewsceene of the CdS nanoparticle/organic dyes, PMMA nanocomposites [Text] / V. A. Svetlichnii, A. A. Biriukov, I. N. Lapin, T. I. Izaak // *Russian Physics Journal*. – 2010. – No. 11/3. – P. 69–72,
5. **Kaur, R.** Electrical and mechanical behavior of polymethyl methacrylate/cadmium sulphide composites [Text] / R. Kaur, K. S. Samra // *Physica B: Condensed Matter*. – 2018. – Vol. 538. – P. 29–34.
6. **Dyuryagina, N. S.** Using Rouse-Fowler model to describe radiation-induced electrical conductivity of nanocomposite materials [Text] / N. S. Dyuryagina, A. P. Yalovets // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2017. – Vol. 830. – No.1. – P. 12130–12136.
7. **Dyuryagina, N. S.** Radiation-induced electrical conductivity of nanocomposite materials [Text] / N. S. Dyuryagina, A. P. Yalovets // *J. Technical Physics*. – Vol. 63. – No. 6. – P. 838–847.
8. **Dyuryagina, N. S.** Thermoluminescence of Irradiated Nanocomposite Material Based on Aluminum Oxide [Text] / N. S. Dyuryagina, A. P. Yalovets // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2018. – Vol. 1115. – No. 5. – P. 052022–30.

PHOTOLUMINESCENCE THEORETICAL DESCRIPTION OF NANOCOMPOSITE MATERIAL BASED ON PMMA

N. S. Dyuryagina¹, A. P. Yalovets^{1,2}

¹South-Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia

²Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: diuriaginans@susu.ru

Interest in photoluminescence research of nanocomposite materials based on polymers, such as polymethylmethacrylate (PMMA), due to their common use in the development of various optoelectronic devices [1–6]. Semiconductor nanoparticles, such as CdS are usually used as inclusions due to their ability to emit in a wide range of wavelengths depending on their size. Literature review showed that the CdS nanoparticle introduction into PMMA not only increases the photoluminescence intensity and absorption coefficient [1–6], but also reduces the relaxation time of irradiated materials to its initial state [6–8], that allows the use of optoelectronic devices under increased radiation. Change the electrophysical properties of nanocomposite materials is related to the additional

localized centers in the bandgap, the energy spectrum of which determined by the size, shape and concentration of nanoparticles.

Theoretical model based on Rose–Fowler (RF) model, that describes all the processes, which define electrophysical properties of materials, in the best way [6–8], including such processes as the charge carriers recombination and generation due to the ionization of matrix material and inclusions, the charge carrier remove and capture by localized states. Also, the theoretical model considers radiation transport through the matter and the temperature effects.

In this work, we investigate photoluminescence and absorption spectra of the unirradiated pure PMMA and PMMA with CdS inclusions in size from 2 to 10 nm and concentration up to 10 vol.%, as well as materials after the irradiation with different power and pulse duration using RF model.

References

1. **Zidan, H. M.** Structural and optical properties of pure PMMA and metal chloride-doped PMMA films [Text] / H. M. Zidan, M. Abu-Elnader // *Physics B*. – 2005. – Vol. 355. – P. 308–317.
2. **Khanna, P. K.** Light emitting CdS quantum dots in PMMA: Synthesis and optical studies [Text] / P. K. Khanna, N. Singh // *Journal of Luminescence*. – 2007. – Vol. 127. – P. 474–482.
3. **Magerramov, A. M.** [Text] / , A. M. Magerramov, M. A. Razanazov, F. V. Gadzhieva// *Inorganic materials: applied research*. – 2008. – 1. – P. 71–74. (In rus)
4. **Svetlichnii, V. A.** Fetures of fluorewsceene of the CdS nanoparticle/organic dyes, PMMA nanocomposites [Text] / V. A. Svetlichnii, A. A. Biriukov, I. N. Lapin, T. I. Izaak // *Russian Physics Journal*. – 2010. – No. 11/3. – P. 69–72,
5. **Kaur, R.** Electrical and mechanical behavior of polymethyl methacrylate/cadmium sulphide composites [Text] / R. Kaur, K. S. Samra // *Physica B: Condensed Matter*. – 2018. – Vol. 538. – P. 29–34.
6. **Dyuryagina, N. S.** Using Rouse-Fowler model to describe radiation-induced electrical conductivity of nanocomposite materials [Text] / N. S. Dyuryagina, A. P. Yalovets // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2017. – Vol. 830. – No.1. – P. 12130–12136.
7. **Dyuryagina, N. S.** Radiation-induced electrical conductivity of nanocomposite materials [Text] / N. S. Dyuryagina, A. P. Yalovets // *J. Technical Physics*. – Vol. 63. – No. 6. – P. 838–847.
8. **Dyuryagina, N. S.** Thermoluminescence of Irradiated Nanocomposite Material Based on Aluminum Oxide [Text] / N. S. Dyuryagina, A. P. Yalovets // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2018. – Vol. 1115. – No. 5. – P. 052022–30.

6-16

СОСТОЯНИЕ УДАРНИКА В УСЛОВИЯХ ПРОНИКАНИЯ В БЕТОН

Е. Ю. Емельянова, В. В. Доценко,
М. В. Никульшин, В. В. Титов

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: emeljanova.elena@rambler.ru

В данной работе представлены результаты численных исследований состояния ударника в условиях низкоскоростного проникновения (200–500 м/с) в бетонную преграду по нормали.

Конструктивно в ударнике предусмотрено наличие материала – смесь ИЛП-1, поведение которого в условиях ударного нагружения подобно сыпучему веществу. В ходе исследования влияния уплотняющегося вещества на прочность силового корпуса поведение смеси ИЛП-1 рассматривалось подобно сухому песку, влажному песку и несжимаемой жидкости. Наихудший случай нагружения корпуса ударника отвечает поведению смеси ИЛП-1 подобно сухому песку. Уплотнение песка в условиях ударного нагружения характеризовалось УРС на сжатие в виде опытной ударной адиабаты.

В задачах динамического деформирования и разрушения бетона, как разносопротивляющегося материала (различное сопротивление растяжению и сжатию), ключевая роль отводится математической модели материала. Модель RHT описывается конституционными уравнениями трех предельных поверхностей. Верификация модели RHT проводилась на основе экспериментальных данных.

По результатам численного моделирования состояние силового корпуса ударника в условиях низкоскоростного проникновения в бетонную преграду при заданных скоростях характеризуется высоким уровнем пластических деформаций. При скоростях удара 350 и 500 м/с произойдет разрушение головной части ударника. Глубина проникновения ударника находится в пределах от 107 до 302 мм.

STATE OF THE IMPACTOR UNDER PENETRATION INTO CONCRETE

E. Yu. Emel'yanova, V. V. Dotsenko,
M. V. Nikul'shin, V. V. Titov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

E-mail: emeljanova.elena@rambler.ru

The work presents the results of numerical investigations of the impactor state under low-velocity normal penetration (200–500 m/s) into a concrete barrier.

The impactor structure is designed to include an ILP-1 mixture which behavior under shock loading is similar to slurry. When studying the influence of a consolidating

matter on the strength of the load-bearing casing, the behavior of ILP-1 mixture was considered as similar to dry sand, damp sand, and incompressible liquid. The worst case of the impactor casing loading corresponds to the behavior of ILP-1 mixture similar to dry sand. Consolidation of sand under shock loading was characterized through the equation of state for compression in the form of test shock adiabat.

The mathematical model of a material is of key importance for the problems of dynamic strain and damage of concrete as a multi-modulus material (different tensile and compression strengths). The RHT model is described by constitutional equations of three limiting surfaces. The RHT model was validated through the experimental data.

According to the numerical simulation results, the state of the impactor load-bearing casing under low-velocity penetration into a concrete barrier at the given velocities is characterized by high plastic strain rates. The impactor head will be damaged at the impact velocities of 350 and 500 m/s. The impactor penetration depths range from 107 to 302 mm.

6-17

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОБИВАНИЯ ПРОТИВООСКОЛОЧНЫХ ПРЕГРАД ТРЕХМЕРНЫМИ ОСКОЛКАМИ

О. С. Илютина, М. Ю. Сахаров

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: m.yu.sakharov@vniitf.ru, o.s.ilyutina@vniitf.ru

Рассмотрены результаты расчетов задач пробивания противоосколочных преград трехмерными осколками по программному комплексу МАХ-3. Сделаны выводы о характере режима пробивания в зависимости от скорости осколка, угла падения осколка на преграду, материала и конструкции преграды.

NUMERICAL SIMULATIONS RESULTS CONCERNING SHIELD PENETRATIONS BY 3D DEBRISES

O. S. Ilyutina, M. Yu. Sakharov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: m.yu.sakharov@vniitf.ru, o.s.ilyutina@vniitf.ru

Numerical simulation results concerning processes of shield penetration by 3D debris are in scope. Simulations are made by MAX-3 program complex. Some conclusions are made concerning penetration regime dependence on debris material, velocity, incident angle as well shield material and construction.

6-18

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ РЕШЕНИЙ
СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ
ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ ПРИ УЧЕТЕ
ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ КОРИОЛИСА**

А. О. Казачинский

Снежинский физико-технический институт Национального
исследовательского ядерного университета «МИФИ»,
Снежинск, Россия

E-mail: a.kazachinskij@gmail.com

В данной работе для системы уравнений газовой динамики при учете действия силы Кориолиса рассмотрена одна конкретная характеристическая задача Коши с начальными условиями на горизонтальной плоскости $z = 0$ [1]. Полагается равным нулю значение вертикальной составляющей ω вектора скорости газа при $z = 0$. В случае общих пространственных изэнтропических течений непроницаемая плоскость $z = 0$ является контактной характеристикой кратности 2.

Для того, чтобы рассматриваемая задача с начальными данными при $z = 0$ имела единственное решение, необходимо на другой поверхности задать два дополнительных условия. Исходя из газодинамического смысла задачи взят случай, когда радиальная составляющая u вектора скорости газа положена постоянным отрицательным числом, а окружная v – нулем. При этом полагается, что на некотором цилиндре ненулевого радиуса u имеет постоянное отрицательное значение, а $v = 0$.

Решение задачи строится в виде начальных отрезков ряда со степенями z , коэффициенты которого зависят от остальных независимых переменных t, r, φ . Нулевые коэффициенты ряда удовлетворяют гиперболической системе уравнений с частными производными и не зависят от φ , что позволяет численно построить нулевые коэффициенты методом характеристик. Остальные коэффициенты ряда определяются из линейных уравнений с частными производными. Это позволяет частично разделить переменные: зависимость от полярного угла φ задается в явном виде через конечное число гармоник с соответствующими частотами. Для искоемых коэффициентов, стоящих перед этими гармониками также получаются свои гиперболические системы уравнений с частными производными. Это тоже позволяет свести построение этих коэффициентов к численному решению соответствующих систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

**THE ANALYTICAL DECISION
OF THE CHARACTERISTIC TASK CAUCHY
WITH INITIAL DATA DESCRIBING
THE TURNING OF GAS**

A. O. Kazachinsky

Snezhinsk Institute of Physics and Technology National
Research Nuclear University “MEPhI”, Snezhinsk, Russia

E-mail: a.kazachinskij@gmail.com

In this operation for a system of equations of gas dynamics one specific characteristic objective of Cauchy with initial conditions on the horizontal $z = 0$ plane is considered. At the same time value of a vertical component ω a gas velocity vector is necessary equal to zero in case of $z = 0$, that is, gas through the $z = 0$ plane doesn't flow. In case of the general spatial isentropic currents the impenetrable $z = 0$ plane is the contact characteristic of a multiplicity 2.

In order that the considered task with initial data in case of $z = 0$ had the single decision, it is necessary to set 2 additional conditions on other surface. For simplicity of reviewing the case when radial component u of a velocity vector of gas relies with a constant negative number, and environing v – zero will be taken. At the same time it is necessary that on some cylinder of nonzero radius of u has constant negative value, and $v = 0$.

The decision of the task is built in the form of initial segments of a row with z levels. Coefficients of a row depend on remaining independent variables of t, r, φ . Zero coefficients of a row satisfy to a hyperbolic system of equations with private derivatives and don't depend from φ . It allows to construct numerically zero coefficients by method of characteristics. Remaining coefficients of a row decide from the linear equations on private derivatives. It allows to separate variables partially: dependence on vectorial angle φ is set in an explicit form through a finite number of harmonicas with the corresponding frequencies. For the required coefficients facing these harmonicas also the hyperbolic systems of equations with private derivatives turn out. It allows to reduce creation of these coefficients to the numerical solution of the appropriate systems of ordinary differential equations too.

6-19

**МОДЕЛЬ И ОДНОМЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ
МИШЕНИ В СФЕРИЗОВАННОМ ХОЛЬБРАУМЕ
С УЧЕТОМ ПОТЕРЬ РЕНТГЕНОВСКОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ
ДЛЯ ВВОДА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Н. Г. Карлыханов, В. А. Лыков

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забахина,
Снежинск, Россия

E-mail: n.g.karlykhanov@vniitf.ru, v.a.lykov@vniitf.ru

Предложена и в одномерной программе радиационной газовой динамики ЭРА [1] реализована модель учета потерь рентгеновского излучения через отверстия для ввода лазерного излучения в бокс-конвертор, которая может использоваться для проведения «сквозных» одномерных расчетов сферизованных боксов с мишенью непрямого облучения, помещенной в его центре. Эта модель верифицирована с использованием опубликованных экспериментальных данных [2], полученных на установке NIF при сжатии газонаполненных оболочек из алюминия,

помещенных в регби-хольраум. Расчеты проводились по программе ЭРА с учетом спектрального переноса излучения, нелокального электронного теплопереноса и обратно-тормозного поглощения лазерного излучения (ЛИ) внутри бокса. Использовались табличные УРС и пробеги излучения для материалов мишени и стенок бокса, рассчитанные ранее по программе RESEOS [3]. Получено хорошее согласие результатов расчетов с экспериментальными данными по зависимости от времени температуры излучения в боксе-конвертере и моменту генерации ДТ-нейтронов в мишени. По программе ЭРА проведены «сквозные» расчеты сферического бокса-конвертера с двухкаскадной мишенью в центре. Показано, что в сферических боксах-конвертерах из золота диаметром $\sim 1,0$ см с 6 отверстиями диаметром $\sim 3,5$ мм каждое, при использовании лазерного импульса с длительностью ~ 6 нс и мощностью $P_L \approx 400$ ТВт во 2 гармонике излучения Nd-лазера температура излучения может достигать $\sim 250\text{--}300$ эВ на поверхности мишени. В этих расчетах в центре бокса находилась двухкаскадная мишень: Au-оболочка с внешним диаметром 0,48 мм и толщиной стенки 0,04 мм заполнена ДТ-жидкостью и помещена внутрь Al-оболочки с внешним диаметром 2,2 мм и толщиной стенки 0,11 мм, между оболочками – CH-пена с плотностью 30 мг/см³. В 1D-расчетах, проведенных по программе ЭРА для приведенных выше условий без учета турбулентного перемешивания, были получены запасы по зажиганию мишени $W_Q \approx 3$ и выход нейтронов $N_{DT} \approx 3,7 \cdot 10^{17}$.

Литература

1. Барышева, Н. М. [Текст] / Н. М. Барышева, А. И. Зуев, Н. Г. Карлыханов, В. А. Лыков, В. Е. Черняков // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1982. – 22, 401.
2. Ping, Y. [Text] / Y. Ping, V. A. Smalyuk, P. Amendt, et al. // Phys. Plasmas. – 2020. – 27, 100702.
3. Ovechkin, A. A. [Text] / A. A. Ovechkin, P. A. Loboda, V. G. Novikov, et al. // High Eng. Dens. Phys. – 2014. – 13, 20.

THE MODEL AND THE 1D-SIMULATIONS OF A TARGET IN SPHERE-SHAPED HOHLRAUM WITH THE CONSIDERATION OF THE X-RAY RADIATION LOSSES THROUGH LASER ENTRANCE HOLES

N. G. Karlykhanov, V. A. Lykov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: n.g.karlykhanov@vniitf.ru, v.a.lykov@vniitf.ru

The model that taking into account a losses of the X-ray radiation through laser entrance holes (LEH) for input of a laser light into a hohlraum is proposed and realized at the 1D- ERA code of radiation hydrodynamic [1]. This model could be used for a carrying out a “through” 1D-calculations of sphere-shaped hohlraum with indirect-drive target placed in its center. This model was verified

with use of the published data [2] obtained at the NIF facility in experiments with gas-filled Al-shells placed in rugby-hohlraum. Calculations were performed by ERA code with taking into account a spectral kinetic radiation transfer, nonlocal electron transport and inverse bremsstrahlung absorption of laser light in plasma of hohlraum walls. The tabular EOS and opacities for materials of a target and a hohlraum were used, which were calculated earlier under RESEOS code [3]. The good agreement was obtained between results of calculations and experiments on the time-dependence of radiation temperature in hohlraum and the moment of DT-neutron generation in a target. The “through” calculations of sphere-shaped hohlraum with double-shell target placed in its center were performed by ERA code. It is shown that radiation temperature of $\sim 250\text{--}300$ eV could be achieved in the spherical gold hohlraum with diameter of ~ 1.0 cm that has 6 LEH with diameter of ~ 3.5 mm each if the laser pulse with duration ~ 6 ns, power $P_L \approx 400$ TW in the 2-nd harmonic of the Nd-laser would be used. The following double-shell target was used in these calculations: Au-shell with diameter of 0.48 mm and wall thickness of 0.04 mm is filled by a DT-liquid and placed in Al-shell with diameter of 2.2 mm and wall thickness of 0.11 mm, CH-foam with density of 30 mg/cc was in gap between shells. The ignition margin $W_Q \approx 3$ and neutron yield $N_{DT} \approx 3.7 \cdot 10^{17}$ were obtained in the 1D ERA code simulations performed for described above conditions without allowance for turbulent mixing.

References

1. Barysheva, N. M. [Text] / N. M. Barysheva, A. I. Zuev, N. G. Karlykhanov, V. A. Lykov, V. E. Chernyakov // Journal of Computational mathematics and mathematical physics. – 1982. – 22, 401.
2. Ping, Y. [Text] / Y. Ping, V. A. Smalyuk, P. Amendt, et al. // Phys. Plasmas. – 2020. – 27, 100702.
3. Ovechkin, A. A. [Text] / A. A. Ovechkin, P. A. Loboda, V. G. Novikov, et al. // High Eng. Dens. Phys. – 2014. – 13, 20.

6-20

АЛГОРИТМ ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ В ЗАДАЧАХ МСС С СУЩЕСТВЕННЫМ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ПРОЦЕССАМИ

А. В. Карпеев

Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия

E-mail: a.v.karpeev@vniitf.ru

Существует класс задач, в которых происходит существенное изменение пространственного распределения вычислительной нагрузки во времени. Для эффективного использования параллельных вычислительных систем с распределенной памятью при

решении таких задач в работе предложен и исследован новый алгоритм динамической балансировки. Он позволяет повысить эффективность загрузки в счете модельной задачи до значений выше 70% при частоте балансировки $\nu_{\text{bal}} \sim 0,1$. В результате работы алгоритма получается разбиение, которое обладает несколькими полезными свойствами:

- В задачах с несущественным отклонением в распределении вычислительной нагрузки от равномерного будет получено разбиение, сохраняющее коммуникационный шаблон регулярного разбиения.
- Отсутствует необходимость выполнения дорогостоящей процедуры перевыделения памяти на этапе балансировки.
- Определение подходящих параметров разбиения позволяет улучшить пространственную локализацию данных, что снижает нагрузку на коммуникационную среду.

DYNAMIC LOAD BALANCING ALGORITHM FOR CONTINUUM MECHANICS PROBLEMS WITH ESSENTIAL REDISTRIBUTION OF COMPUTING LOADS AMONG THE PROCESSES

A. V. Karpeev

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: a.v.karpeev@vniitf.ru

A number of important applications have computational requirements that vary over time in an unpredictable way. For the efficient usage of distributed-memory parallel systems when solving such problems a new dynamic load balancing algorithm is suggested and explored. It allows to raise the load efficiency for model task up to 70% with balancing frequency $\nu_{\text{bal}} \sim 0.1$. As a result of algorithm execution we get load splitting that have a few useful properties:

- For tasks with a weak deviation of workloads from a uniform distribution the partitioning will have the same communication pattern as for the regular case.
- There is no an expensive memory allocation procedure on the workloads redistribution stage.
- Definition of appropriate splitting parameters allows improving spatial data locality that reduces the loading on the network.

²Южно-Уральский государственный университет, Озёрск, Россия

³ФГУП «ПО «Маяк», Озёрск, Россия

E-mail: spbautin@mail.ru

Представлен вариант численного решения одной газодинамической задачи в цилиндрической системе координат. Состояние газа задано полной системой уравнений Навье–Стокса в безразмерной форме [1, 2]. Уравнение неразрывности учитывает сжимаемость газа. Уравнения для трех составляющих скорости воздуха учитывают влияние его вязкости, а так же силы тяжести и силы Кориолиса. Уравнение энергии включает в себя диссипативную составляющую и учитывает теплопроводность газа. В начальный момент времени воздух находится в состоянии покоя. Температура линейно падает с ростом высоты, давление изменяется по формуле, достаточно точно описывающей эмпирическое результаты для атмосферы. На нижней границе цилиндра расположено концентрическое с границами области круглое пятно нагрева. Решение такой сложной газодинамической задачи аналитически можно найти только для некоторых состояний. Состояние покоя является одним из известных точных решений заданной системы. Остальные случаи решаются численными методами.

Поставленная задача решалась с помощью явной схемы с использованием центральных конечно-разностных уравнений. Расчеты на оси цилиндра и по радиусу в направлении нулевого угла (область замыкания) велись отдельно. Предложенное решение в дальнейшем позволило значительно ускорить вычисления за счет их распараллеливания [3]. После модификаций счет стало возможно вести с использованием мощностей GPU.

Проверка составленной схемы проводилась на состоянии покоя газа. Счет устойчиво продолжался 10^5 шагов, состояние покоя передается с точностью не хуже 10^{-10} [4].

Предложенная газодинамическая задача с подогревом решалась ранее в численном виде в декартовых координатах [5]. Устойчивая на известном точном решении схема в цилиндрических координатах так же использовалась для расчета состояния газа при нагреве пятна подстилающей поверхности. По трем составляющим скорости были построены линии тока воздуха. Так же выведены поверхности одного уровня для плотности газа и температуры. Сопоставление с результатами расчетов в случае прямоугольной системы показало, что в данных расчетах газодинамические параметры определяются достаточно точно.

Литература

1. Баутин, С. П. Газодинамическая теория восходящих закрученных потоков [Текст] / С. П. Баутин, И. Ю. Крутова, А. Г. Обухов. – Екатеринбург : УрГУПС, 2020. – 400 с.
2. Баутин, С. П. Разрушительные атмосферные вихри и вращение Земли вокруг своей оси: монография [Текст] / С. П. Баутин, С. Л. Дерябин, И. Ю. Крутова, А. Г. Обухов. – Екатеринбург : УрГУПС, 2017. – 216 с.
3. Баутин, С. П. Оптимизация счета явной схемы ПСУНС в цилиндрических координатах [Текст] / С. П. Баутин,

6-21

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСХОДЯЩЕГО ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА ГАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КООРДИНАТ

С. Н. Кононов^{1,2}, С. П. Баутин¹, Э. С. Левунина^{1,3}

¹Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Снежинск, Россия

С. Н. Кононов, Э. С. Левунина // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2019 по направлению «Инновационные ядерные технологии». Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции. – М. : НИЯУ МИФИ; Снежинск : СФТИ НИЯУ МИФИ, 2019.

4. **Баутин, С. П.** Адаптация для кластера расчета по явной схеме одной газодинамической задачи в цилиндрических координатах [Текст] / С. П. Баутин, С. Н. Кононов, Э. С. Левунина // Сборник трудов IX международной конференции «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике». – Новосибирск : ИГИЛ СО РАН, 2020.

5. **Баутин, С. П.** Численное моделирование трехмерных нестационарных течений сжимаемого вязкого теплопроводного газа [Текст] / С. П. Баутин, А. Г. Обухов. – Екатеринбург : УрГУПС, 2020. – 290 с.

NUMERICAL SIMULATION USING CYLINDRICAL COORDINATES OF AN RISING SWIRLING FLOW

S. N. Kononov^{1,2}, S. P. Bautin¹, E. S. Levunina^{1,3}

¹Snezhinsk Institute of Physics and Technology National Research Nuclear University “MEPhI”, Snezhinsk, Russia

²South Ural State University, Ozersk, Russia

³FSUE “PO “Mayak”, Ozersk, Russia

E-mail: spbautin@mail.ru

A variant of the numerical solution of one gas-dynamic problem in a cylindrical coordinate system is presented. The state of the gas is given by the complete system of Navier–Stokes equations in dimensionless form [1, 2]. The continuity equation consider the compressibility of the gas. The equations for the three components of air velocity consider the effects of viscosity, as well as gravity and Coriolis forces. The energy equation includes a dissipative component and consider the thermal conductivity of gas. At the initial moment of time, the air is at rest. The temperature decreases linearly with increasing altitude, the pressure changes according to the formula describing the empirical results for the atmosphere. A round heating spot is located on the lower boundary of the cylinder. Solution to this gas-dynamic problem can be found analytically only for some conditions. Quiescent state is one of the known exact solutions of a given system. In other states, solutions are found by numerical methods.

The stated gas-dynamic problem was solved using an explicit scheme. Calculations on the axis of the cylinder and along the X-direction (the area of closure) were carried out separately. Then the computations were accelerated due to their parallelization [3]. After the modifications, it became possible to carry out computations using the GPU.

The test of the compiled scheme was carried out for the quiescent state of gas. The counting continued steadily 10^5 steps, the quiescent state was obtained with an accuracy of 10^{-10} .

The proposed gas-dynamic problem with heating was previously solved numerically in Cartesian coordinates [5]. The scheme in cylindrical coordinates, stable on the known exact solution, was also used to calculate the state of the gas when the underlying surface spot is heated. The air stream lines were built according to the

three components of the velocity. Surfaces of the same level for the density and temperature of the gas are plotted. Comparison with the results of calculations in the case of a rectangular system showed that in these calculations the gas-dynamic parameters are determined quite accurately.

References

1. **Bautin, S. P.** Gas-dynamic theory of ascending swirling current [Text] / S. P. Bautin, I. Y. Krutova, A. G. Obukhov. – Ekaterinburg : USURT, 2020.

2. **Bautin, S. P.** Destructive atmospheric vortices and the Earth’s rotation around its axis: a monograph [Text] / S. P. Bautin, S. L. Deryabin, I. Y. Krutova, A. G. Obukhov. – Ekaterinburg : USURT, 2017.

3. **Bautin, S. P.** Optimization of the computation of an explicit CSNSE scheme in cylindrical coordinates [Text] / S. P. Bautin, S. N. Kononov, E. S. Levunina // Scientific Session NRNU MEPhI-2019 in the direction “Innovative nuclear technologies”. Collected Scientific Papers of the All-Russian scientific-practical conference. – М. : NRNU MEPhI; Snezhinsk : SPTI NRNU MEPhI, 2019.

4. **Bautin, S. P.** Adaptation for a cluster of calculations according to the explicit scheme of one gas-dynamic problem in cylindrical coordinates [Text] / S. P. Bautin, S. N. Kononov, E. S. Levunina // Collected Scientific Papers IXth International Conference Dedicated to the 120th Anniversary of Birth of Academician Mikhail Alekseevich Lavrentyev “Lavrentyev Readings on Mathematics, Mechanics and Physics” September 7–11. – Novosibirsk, Russia. – 2020.

5. **Bautin, S. P.** Numerical modeling of three-dimensional unsteady flows of a compressible viscous heat-conducting gas [Text] / S. P. Bautin, A. G. Obukhov. – Ekaterinburg : USURT, 2020.

6-22

МЕТОДИКА ЛЭГАК РАСЧЕТА МНОГОМЕРНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЛОЧНО-СТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТОК СПЕЦИАЛЬНОГО ВИДА

С. А. Краюхин, Н. А. Володина, А. О. Наумов,
С. В. Стародубов, Т. В. Резвова, К. В. Циберев,
М. О. Ширшова, Е. В. Шувалова

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

E-mail: sankrayukhin@vniief.ru

В докладе приводится описание алгоритмов расчета многомерных нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды с использованием блочно-структурированных сеток специального вида в методике ЛЭГАК [1]. Под сетками специального вида подразумевается сетки с элементами нерегулярной стыковки на границах блоков, а именно сопряжение квазисферической и кубической сеток и кратное соотношение ячеек на границах блоков.

Основными преимуществами использования блочно-структурированных сеток специального вида в методике ЛЭГАК являются:

- возможность выбора более адаптированной к течению расчетной сетки в значительной части счетной области для прикладных задач;
- возможность локального увеличения подробности расчетной сетки при моделировании разномаштабных конструкций и для более точного описания отдельных физических процессов (подробная сетка используется только в выделенных частях вычислительной области);
- возможность значительного сокращения количества счетных точек в тех частях вычислительной области, где к качеству решения не предъявляется высоких требований по точности;
- существенное сокращение календарных сроков расчета задач за счет изменения топологии сетки в центральных и осевых частях системы (уход от особенностей, связанных с наличием осей и центра при использовании квазисферических сеток).

В работе представлено описание методов организации вычислений на блочно-структурированных сетках специального вида, алгоритмы модификации счетных программ и технологии распараллеливания.

Для демонстрации работоспособности методики в докладе приведены результаты расчетов методических задач с использованием блочно-структурированных сеток.

Литература

1. Бахрах, С. М. Методика ЛЭГАК-3D расчета трехмерных нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды и принципы ее реализации на многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью [Текст] / С. М. Бахрах, С. В. Величко, В. Ф. Спиридонов, П. А. Авдеев, М. В. Артамонов, Е. А. Бакулина и др. // ВАНТ: сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2004. – Вып. 4. – С. 41–50.

THE LEGAK COMPUTATION METHOD FOR 3D NONSTATIONARY FLOWS OF MULTI-COMPONENT CONTINUUM USING SPECIAL TYPE OF BLOCK-STRUCTURED MESH

S. A. Krayukhin, N. A. Volodina, A. O. Naumov,
S. V. Starodubov, T. V. Rezvova, K. V. Tsiberev,
M. O. Shirshova, E. V. Shuvalova

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific
Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

E-mail: sankrayukhin@vniief.ru

The paper describes algorithms for computing multi-dimensional non-stationary flows of multi-component continuum using special type of block-structured mesh in the LEGAK code developed and used at RFNC – VNIIEF. Special type mesh is block-structured mesh with elements of irregular joining at the boundaries of blocks – a combination of spherical and cubic mesh and multiple ratios of cells at the boundaries of blocks.

The paper presents a description of methods for organizing computations using special type of block-structured

mesh, algorithms for modifying computational programs and parallelization technologies.

To demonstrate the efficiency of the method, the report presents the results of computations of methodological problems using block-structured mesh.

References

1. Бахрах, С. М. Методика ЛЭГАК-3D расчета трехмерных нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды и принципы ее реализации на многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью [Текст] / С. М. Бахрах, С. В. Величко, В. Ф. Спиридонов, П. А. Авдеев, М. В. Артамонов, Е. А. Бакулина и др. // ВАНТ: сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2004. – Вып. 4. – С. 41–50.

6-23

АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА В ВОСХОДЯЩИХ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКАХ

И. Ю. Крутова

Снежинский физико-технический институт Национального
исследовательского ядерного университета «МИФИ»,
Снежинск, Россия

E-mail: IYKrutova@mephi.ru

В природе довольно часто встречается интересное явление – восходящий закрученный поток воздуха. В качестве примеров таких потоков можно привести многочисленные смерчи и торнадо, регулярно наблюдаемые на юге США и в других достаточно теплых и ровных местностях. К подобным явлениям относятся и периодически возникающие тропические циклоны, а также огненные вихри, часто наблюдаемые в сезон сельскохозяйственных палов.

Актуальность исследования обусловлена тем, что изучение восходящих закрученных потоков не только позволяет раскрыть механизм возникновения и функционирования этих потоков, а также приводит: 1) к прогнозу возникновения торнадо и циклонов; 2) к рекомендациям по способам уничтожения подобных природных потоков; 3) к рекомендациям по практическому использованию энергии природных восходящих закрученных потоков.

Литература

1. Баутин, С. П. Газодинамическая теория восходящих закрученных потоков [Текст] / С. П. Баутин, И. Ю. Крутова, А. Г. Обухов. – Екатеринбург : УрГУПС, 2020. – 399 с.
2. Баутин, С. П. Аналитическое и численное моделирование течений газа при учете действия силы Кориолиса [Текст] / С. П. Баутин, И. Ю. Крутова. – Екатеринбург : УрГУПС, 2019. – 181 с.
3. Казачинский, А. О. Построение течений в придонной части восходящих закрученных потоков как решение одной характеристической задачи Коши : Препринт [Текст] / А. О. Казачинский, И. Ю. Крутова. – Снежинск : изд-во СФТИ НИЯУ МИФИ, 2016. – 60 с.

4. Крутова, И. Ю. Расчет кинетической энергии течений в придонной части торнадо и тропического циклона : Препринт [Текст] / И. Ю. Крутова, О. В. Опрышко. – Снежинск : изд-во СФТИ НИЯУ МИФИ, 2018. – 45 с.

ANALYTICAL AND NUMERICAL SIMULATION GAS FLOWS IN UPLINING SWIRLED STREAMS

I. Yu. Krutova

Snezhinsk Institute of Physics and Technology National Research Nuclear University “MEPhI”, Snezhinsk, Russia

E-mail: IYKrutova@mephi.ru

An interesting phenomenon is quite common in nature – an ascending swirling stream of air. Examples of such streams are numerous tornadoes and tornadoes that are regularly observed in the southern United States and in other fairly warm and flat areas. Such phenomena include periodic tropical cyclones, as well as fire whirlwinds, often observed during the season of agricultural burns.

The relevance of the study is due to the fact that the study of ascending swirling flows not only makes it possible to reveal the mechanism of the emergence and functioning of these flows, but also leads to: 1) predicting the occurrence of tornadoes and cyclones; 2) recommendations on methods for the destruction of such natural streams; 3) to recommendations for the practical use of the energy of natural ascending swirling flows.

The report addresses issues related to the study of natural swirling updrafts such as tornadoes, tropical cyclones and fire whirlwinds. For the system of equations of gas dynamics taking into account the action of gravity and Coriolis forces, the existence and uniqueness of the solution of specific characteristic Cauchy problems of the standard form, modeling non-one-dimensional flows with a drain, an inflow, and near a heating cylinder, is substantiated. The fact of the absence of swirling is established if the rotation of the Earth around its axis is not taken into account in the initial initial-boundary value problem. Three-dimensional stationary flows of an ideal gas in the vicinity of an impenetrable horizontal plane under the action of gravity and Coriolis forces are approximately constructed by numerical methods, and their geometric, velocity and energy characteristics are determined.

References

1. **Bautin, S. P.** Gas-dynamic theory of upward swirling flows [Text] / S. P. Bautin, I. Yu. Krutova, A. G. Obukhov. – Yekaterinburg : UrGUPS, 2020. – 399 p.
2. **Bautin, S. P.** Analytical and numerical modeling of gas flows taking into account the action of the Coriolis force [Text] / S. P. Bautin, I. Yu. Krutova. – Yekaterinburg : UrGUPS, 2019. – 181 p.
3. **Kazachinsky, A. O.** Construction of flows in the bottom part of ascending swirling flows as a solution to one characteristic Cauchy problem: Preprint [Text] / A. O. Kazachinsky, I. Yu. Krutova. – Snezhinsk: publishing house SPTI NRNU MEPhI, 2016. – 60 p.
4. **Krutova, I. Yu.** Calculation of the kinetic energy of currents in the bottom part of a tornado and a tropical cyclone: Preprint [Text] / I. Yu. Krutova, O. V. Opryshko. – Snezhinsk: publishing house SPTI NRNU MEPhI, 2018. – 45 p.

6-24

УСВОЕНИЯ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ АЛЬТИМЕТРИИ В МОДЕЛИ ЦИРКУЛЯЦИИ ОКЕАНА NEMO

К. П. Беляев¹, А. А. Кулешов², И. Н. Смирнов³

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук, Россия, Москва

E-mail: kosbel55@gmail.com

² Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша Российской академии наук, Россия, Москва

E-mail: andrew_kuleshov@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики, Россия, Москва

E-mail: ismirnov@cs.msu.ru

Приведены результаты расчетов основных характеристик океана в Атлантике с помощью модели циркуляции океана Nucleus for European Modelling of the Ocean (NEMO) [1] с применением разработанного авторами метода усвоения данных наблюдений Generalized Kalman Filter (GKF) [2]. В качестве данных наблюдений берутся данные спутниковых наблюдений альтиметрии. Анализируется состояние и изменчивость уровня океана, поверхностной температуры воды, зональной и меридиональной компонент скорости течений. Результаты расчетов после усвоения данных сравниваются с аналогичными расчетами по исходной модели без усвоения. Отдельно оцениваются характеристики течений после усвоения и показывается, что расчетные величины становятся более динамичными, имеют большую изменчивость и лучше соответствуют данным наблюдений.

Литература

1. **Madec, G.,** Delecluse P., Imbard M., Levy C. [Текст]. – OPA 8 Ocean General Circulation Model – Reference Manual, Technical report, LODYC/IPSL Note 11, 1998.
2. **Belyaev, K.,** Kuleshov A., Tuchkova N., Tanajura C.A.S. [Text]. – An optimal data assimilation method and its application to the numerical simulation of the ocean dynamics // Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems. 2018. Vol. 24, No. 1. P. 12–25.

ASSIMILATION OF ALTIMETRY DATA IN TO THE OCEAN CIRCULATION MODEL NEMO

K. P. Belyaev¹, A. A. Kuleshov², I. N. Smirnov³

¹ Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: kosbel55@gmail.com

² Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Science, Russia, Moscow,

E-mail: andrew_kuleshov@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Moscow, Russia
E-mail: ismirnov@cs.msu.ru

The results of calculations of the main characteristics of the ocean in the Atlantic using the model of ocean circulation Nucleus for European Modelling of the Ocean (NEMO) [1] with the application of data assimilation method Generalized Kalman Filter (GKF) [2] are presented. Altimetry satellite observations are taken as observational data. The state and variability of the ocean level, surface and subsurface water temperature, zonal and meridional components of current velocity are analyzed. The results of calculations after data assimilation are compared with the corresponding calculations using the initial model without data assimilation. Separately, the characteristics of currents after data assimilation are estimated and it is shown that the calculated quantities become more dynamic, have a higher variability and better match to observed data.

References

1. Madec G., Delecluse P., Imbard M., Levy C. OPA 8 Ocean General Circulation Model - Reference Manual, Technical report, LODYC/IPSL Note 11, 1998.
2. Belyaev K., Kuleshov A., Tuchkova N., Tanajura C.A.S. An optimal data assimilation method and its application to the numerical simulation of the ocean dynamics // *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. 2018. Vol. 24. No. 1. PP. 12-25.

6-25

ПОСТРОЕНИЕ ВОСХОДЯЩИХ ЗАКРУЧЕННЫХ ВИХРЕЙ В ОКРЕСТНОСТИ ВНЕШНИХ ГРАНИЦ ЦИКЛОНА

А. В. Мезенцев, С. Л. Дерябин

Уральский государственный университет путей сообщения,
Екатеринбург, Россия

E-mail: amezentsev@usurt.ru, sderybin@usurt.ru

Рассматривается течение газа в некоторой окрестности вертикальной контактной поверхности, разделяющей восходящий закрученный поток и фоновое течение. Подобные течения наблюдаются в природных восходящих закрученных потоках типа торнадо и тропического циклона. В работе [1] предложена и обоснована схема течения в восходящем закрученном потоке. Границами восходящего закрученного потока в этом случае являются внутренняя и внешняя контактные поверхности. Внутренняя контактная поверхность, разделяет неоднородный покоящийся газ (глаз циклона) и течение в восходящем закрученном потоке. Решение такой задачи построено в работе [2]. На внешнюю границу циклона, набегает стационарный поток газа. В работе строится течение в окрестности внешней границы циклона.

В качестве математической модели используется система уравнений газовой динамики для трехмерных изэнтропических течений политропного газа, учитывающая действие сил тяжести и Кориолиса. У системы находится стационарное решение, далее

используемое как фоновое течение. Для системы на контактной поверхности ставится начально-краевая задача, для которой доказывается теорема существования и единственности. В виде системы дифференциальных уравнений с частными производными выписывается закон движения внешней границы, и находятся значения параметров газа на ней. В виде отрезков ряда строится приближенное решение этой системы. В частном случае с помощью характеристического параметра система с частными производными сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений.

Литература

1. Баутин, С. П. Торнадо и сила Кориолиса [Текст]. – Новосибирск : Наука, 2008. – С. 96.
2. Баутин, С. П. Математическое моделирование стационарных восходящих закрученных потоков газа в окрестности контактной поверхности [Текст] / С. П. Баутин, С. Л. Дерябин, А. В. Мезенцев // *Вычислительные технологии*. – Новосибирск : 2018. – Т. 23, № 1. – С. 19–32.

CONSTRUCTION OF DESCENDING SWIRLING VORTICES IN THE VICINITY OF THE OUTER BOUNDARIES OF THE CYCLONE

A. V. Mezentsev, S. L. Deryabin

Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg,
Russia

E-mail: amezentsev@usurt.ru, sderybin@usurt.ru

The gas flow in a certain neighborhood of the vertical contact surface separating the ascending swirling flow and the background flow is considered. Similar currents are observed in natural ascending swirling streams such as tornadoes and tropical cyclones. In [1], a flow scheme in an ascending swirling flow is proposed and justified. In this case, the boundaries of the ascending swirling flow are the internal and external contact surfaces. The internal contact surface separates the inhomogeneous resting gas (the eye of the cyclone) and the flow in the ascending swirling flow. The solution of such a problem is constructed in [2]. A stationary gas flow runs over the outer boundary of the cyclone. In this paper, the flow in the vicinity of the outer boundary of the cyclone is constructed.

As a mathematical model, a system of gas dynamics equations for three-dimensional isentropic flows of a polytropic gas is used, taking into account the action of gravity and Coriolis forces. The system has a stationary solution, which is then used as a background flow. For a system on a contact surface, an initial boundary value problem is posed, for which the existence and uniqueness theorem is proved. In the form of a system of partial differential equations, the law of motion of the external boundary is written out, and the values of the gas parameters on it are found. An approximate solution of this system is constructed in the form of segments of a series. In the special case, using the characteristic parameter, the system with partial derivatives is reduced to a system of ordinary differential equations.

References

1. **Bautin, S. P.** Tornado and the Coriolis force. – Novosibirsk : Nauka, 2008. – С. 96.
2. **Bautin, S. P.** Mathematical modeling of stationary ascending swirling gas flows in the vicinity of the contact surface [Text] / S. P. Bautin, S. L. Deryabin, A.V. Mezentsev // Computing Technologies. – Novosibirsk : 2018. – Vol. 23, No. 1. – С. 19–32.

6-26

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ РЕАКЦИОННОСПОСОБНЫХ ГАЗОВЗВЕСЕЙ ПРИ ЗАКРУТКЕ ПОТОКА

К. М. Моисеева, А. Ю. Крайнов

Томский государственный университет, Томск, Россия

E-mail: Moiseeva_KM@t-sk.ru

В докладе представлены физико-математические модели, методики и результаты решения задач горения реакционноспособных газовзвесей в канале с внезапным расширением при закрутке потока на входе в канал.

Исследования являются актуальными для разработки новых видов энергетических устройств. В частности, данная проблема экспериментально исследовалась в [1] с целью последующих рекомендаций к конструированию новых видов камер сгорания.

В работах ряда авторов для моделирования закрученного течения используются уравнения Навье–Стокса. В данной работе использовалась система уравнений, состоящая из уравнений сохранения массы, импульса и энергии газа и частиц, дополненная уравнением счетной концентрации частиц и уравнением состояния идеального газа и записанная в цилиндрической системе координат. Уравнения записаны в консервативной форме. В этом случае для двухмерной осесимметричной постановки задачи в правых частях уравнений сохранения будут оставаться слагаемые, определяемые угловой составляющей скорости движения газа и частиц [2].

Допущения, использованные для построения физико-математической модели, изложены в работах [3, 4]. Для расчета задачи использован метод С. К. Годунова. Из расчетов получены характеристики стабилизации пламени в газовзвесей в зависимости от состава газовзвесей, массового расхода и величины закрутки потока на входе в канал.

Работа выполнена при финансовой поддержке задания Министерства науки и высшего образования, номер проекта 0721-2020-0036.

Литература

1. **Егоров, А. Г.** Горение дисперсного алюминия в потоке воздуха [Текст] : Монография. – Самара : Изд-во СНЦ РАН, 2008.
2. **Лойцянский, Л. Г.** Механика жидкости и газа [Текст]. – Москва, Ленинград : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1950.

3. **Крайнов, А. Ю.** Численное моделирование горения аэрозвеси порошка алюминия в камере сгорания с закруткой потока [Текст] / А. Ю. Крайнов, К. М. Моисеева, Э. П. Шрагер // Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и ствольных системах (ICOC'2020). – Сборник трудов Десятой Всероссийской конференции. – Ижевск, 17–19 марта 2020 г. – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук». – 2020. – С. 163–174.
4. **Моисеева, К. М.** Горение аэрозвеси угольной пыли в закрученном потоке [Текст] / К. М. Моисеева, А. Ю. Крайнов, Е. И. Рожкова // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2021. – № 71. – С. 139–147.

SIMULATION OF COMBUSTION OF REACTIVE GAS SUSPENSIONS DURING FLOW SWIRLING

К. М. Moiseeva, A. Yu. Krainov

Tomsk State University, Tomsk, Russia

E-mail: Moiseeva_KM@t-sk.ru

The report presents physical and mathematical models, methods and results of solving the problems of combustion of reactive gas suspensions in a channel with a sudden expansion when swirling the flow at the channel inlet.

Research is relevant for the development of new types of energy devices. In particular, this problem was experimentally investigated in [1] with the aim of further recommendations for the design of new types of combustion chambers.

In the works of a number of authors, the Navier-Stokes equations are used to model the swirling flow. In this work, we used a system of equations consisting of the equations of conservation of mass, momentum, and energy of gas and particles, supplemented by the equation of the countable concentration of particles and the equation of state for an ideal gas and written in a cylindrical coordinate system. The equations are written in conservative form. In this case, for a two-dimensional axisymmetric formulation of the problem, the right-hand sides of the conservation equations will contain the terms determined by the angular component of the velocity of the gas and particles [2].

The assumptions used to construct the physical and mathematical model are set out in papers [3, 4]. To calculate the problem, the method of S. K. Godunov was used. From the calculations, the characteristics of flame stabilization in the gas suspension were obtained depending on the composition of the gas suspension, mass flow rate, and the amount of flow swirling at the channel inlet.

This work was financially supported by the state order of the Ministry of Science and Higher Education, project number 0721-2020-0036.

References

1. **Egorov, A. G.** Combustion of dispersed aluminum in a stream of air [Text] : Monograph. – Samara : SSC RAS, 2008.

2. **Loytsyansky, L.G.** Mechanics of liquid and gas [Text]. – Moscow, Leningrad : State publishing house of technical and theoretical literature, 1950.
3. **Krainov, A. Yu.** Numerical modeling of the combustion of air suspension of aluminum powder in the combustion chamber with swirling flow [Text] / A. Yu. Krainov, K. M. Moiseeva, E. R. Shrager // Intra-chamber processes and combustion in solid fuel installations and barrel systems (ICOC'2020). – Collection of Proceedings of the Tenth All-Russian Conference. – Izhevsk, March 17–19, 2020. – Federal State Budgetary Institution of Science “Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences”. – 2020. – P. 163–174.
4. **Moiseeva, K. M.** Combustion of a gas suspension of coal dust in a swirling flow [Text] / K. M. Moiseeva, A. Yu. Krainov, E. I. Rozhkova // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. – 2021. – No. 71. – P. 139–147.

6-27

**РЕШЕНИЕ
УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
НА АДАПТИВНО-ВСТРАИВАЕМЫХ СЕТКАХ
МЕТОДОМ ПРОГОНКИ**

А. М. Мустафин, С. Н. Лебедев, Н. Н. Пашенцева

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: geologtema@mail.ru

В работе рассмотрены две конечно-разностные схемы для численного решения уравнения теплопроводности в одномерной плоской постановке: классическая трехточечная схема с весами и схема «Ромб». Данные схемы модифицированы для взаимодействия с адаптивно-встраиваемыми сетками. Использование адаптивности приводит к тому, что матрица системы разностных уравнений становится нерегулярной. Для обращения таких матриц обычно используют итерационные методы. В данной работе для обращения матрицы используются различные варианты прогонки – прямого метода решения системы линейных разностных уравнений.

Выполнена программная реализация разностных схем на адаптивных сетках. Для работы с адаптивной сеткой была разработана гибридная структура данных, совмещающая в себе двусвязный список и бинарные деревья.

Для выбранных схем проведено численное исследование сходимости на сгущающихся пространственных сетках с учетом динамической адаптации сетки. На основе полученных результатов показано преимущество адаптивно-встраиваемых сеток перед использованием основных неадаптивных разностных сеток.

**SOLVING HEAT CONDUCTION
ON ADAPTIVELY EMBEDDED MESHES
BY SUBSTITUTION**

A. M. Mustafin, S. N. Lebedev, N. N. Pashentseva

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

E-mail: geologtema@mail.ru

The paper discusses two finite-difference schemes for solving the heat conduction equation in 1D plane geometry: the classical three-point scheme and the ROMB scheme. The schemes are modified to allow work with adaptively embedded meshes. The use of adaptive meshes makes the matrix of the system of difference equations irregular. Such matrices are usually inverted iteratively. In this work we use different variants of substitution – a direct method for solving linear difference equations.

The schemes were implemented on adaptive meshes. To allow work with such meshes we developed a hybrid data structure which combined the double-linked list and binary trees.

The schemes were tested for convergence on refining spatial meshes with dynamic mesh adaptation. The results we obtained suggest that adaptively embedded meshes perform better than the basic non-adaptive ones.

6-28

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА И ПЛАВЛЕНИЯ
МИКРОЧАСТИЦЫ ЖЕЛЕЗА ПРИ
ИНТЕНСИВНОМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ
ВОЗДЕЙСТВИИ**

А. М. Мустафин, С. Н. Лебедев, Н. Н. Пашенцева

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: geologtema@mail.ru

В работе рассматривается моделирование процесса распространения тепла в результате интенсивных высокотемпературных воздействий. В модели учитываются фазовые переходы, влияние нелинейной поглотительной способности материала и потери, связанные с кондуктивным и радиационным теплообменом с окружающей средой. В данных задачах границы фазовых переходов являются подвижными, их положение зависит от решения задачи. На этих границах температура фаз одинаковая и равна температуре фазового перехода (задача Стефана).

В докладе приводится численное решение задачи в одномерной постановке, рассматривающей только процесс теплопередачи при фазовых переходах. С помощью δ -функции задача, описываемая разными уравнениями для разных фаз состояния вещества, сводится к решению единого уравнения

теплопроводности. Таким образом, отпадает необходимость явно определять положение границ фазовых переходов. Для решения задачи используется разностная схема «Ромб» на адаптивно-встраиваемых сетках. Адаптация производится в окрестности границ фазовых переходов.

Метод применялся как для решения плоских низкотемпературных задач, так и для задачи нагрева и плавления микрочастицы железа под воздействием лазерного излучения в сферической одномерной постановке. В задаче плавления микрочастицы учитывается нелинейность граничных условий, описывающих потери тепла.

Проведено численное исследование сходимости результатов на сгущающейся пространственной сетке с учетом динамической адаптации сетки по границам фазовых переходов.

Полученные результаты показывают, что использование адаптивных сеток при решении задач со смешанной фаз состояния вещества имеет явные преимущества в соотношении точности и скорости вычислений.

SIMULATION OF IRON MICROPARTICLE HEATING AND MELTING UNDER INTENSIVE HIGH-TEMPERATURE IMPACTS

A. M. Mustafin, S. N. Lebedev, N. N. Pashentseva

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: geologtema@mail.ru

The paper discusses simulation of heat conduction in response to intensive high-temperature impacts. Our model considers phase transitions, the effect of nonlinear absorption capacity, and losses due to conductive and radiation heat exchange with the environment. In these problems, the boundaries of phase transitions are movable and their specific position depends on the solution. The temperatures of phases on these boundaries are identical and equal to the phase transition temperature (Stefan problem).

The paper provides a numerical solution to a 1D problem which only allows for heat transfer during phase transitions. With the δ -function, the problem where different phases are described with different equations reduces to a unique heat transfer equation which is solved with no need to explicitly determine the position of phase transition boundaries. The problem is solved with the ROMB difference scheme on adaptively embedded meshes. The mesh is adapted near the phase transition boundaries.

The method was used to solve low-temperature problems in plane geometry and a problem of iron microparticle heating and melting under the action of laser radiation in 1D spherical geometry with nonlinear boundary conditions for heat losses.

Numerical results were tested for convergence on refining spatial meshes with account for dynamic mesh adaptation near phase transition boundaries.

The results we obtained suggest that adaptive meshes in problems with phase transitions are more preferable as

giving a better ratio between the accuracy and speed of calculation.

6-29

РЕАЛИЗАЦИЯ И ТЕСТИРОВАНИЕ МНОГОТЕМПЕРАТУРНОГО ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ В ТРЕХМЕРНОЙ ПРОГРАММЕ ФОКУС

К. С. Назаров, И. В. Глазырин, Н. А. Михайлов

Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия

При сжатии вещества в задачах инерциально-го термоядерного синтеза возникают условия, когда температуры ионов и электронов не совпадают. Для описания таких течений используется система уравнений многотемпературной газовой динамики. В работе представлены численные алгоритмы решения системы, реализованные в трехмерной эйлеровой программе Фокус [1]. Приведены результаты тестовых расчетов для квазинейтральной идеальной плазмы – двухтемпературная задача Сода и задача Шафранова [2]. Показана близость численных результатов, полученных по Фокус, с аналитическим решением и с численным, рассчитанным программой FLASH [3].

Литература

1. **Глазырин, И. В.** Конечно-объемная схема для многокомпонентных течений на неструктурированной сетке в трехмерной программе Фокус [Текст] / И. В. Глазырин, Н. А. Михайлов // ЖВМиМФ. – 2021. – Т. 61, № 6. – С. 135–149.
2. **Shafranov, V. D.** The Structure of Shock Waves in a Plasma [Text] // Soviet Physics JETP. – 1957. – No. 5. – P. 1183–1188.
2. www.flash.uchicago.edu

IMPLEMENTATION AND TESTING OF A MULTI-TEMPERATURE HYDRODYNAMIC APPROXIMATION IN A THREE-DIMENSIONAL FOCUS PROGRAM

K. S. Nazarov, I. V. Glazyrin, N. A. Mikhailov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

In the problems of inertial thermonuclear fusion while the matter is compressed, conditions can appear when ion and electron temperatures are differed. To describe the flows set of equations for multi-temperature gas dynamic is used. The paper presents numerical algorithms for the equations solution realized in the 3D Euler code Focus [1]. Results of test simulations for quasineutral perfect plasma are submitted – two-temperature Sode problem and Shafranof task [2]. It is shown that numerical data obtained by Focus are close to analytic data and to numerical results given by FLASH [3] code.

References

1. **Glazyrin, I. V.** Finite-Volume Scheme for Multicomponent Compressible Flow on Unstructured Meshes in the Focus 3D Code [Text] / I. V. Glazyrin and N. A. Mikhailov // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – Vol. 61, No. 6 – 2021. – pp. 1015–1029.
2. **Shafanov, V. D.** The Structure of Shock Waves in a Plasma [Text] // Soviet Physics JETP. – 1957. – No. 5. – P. 1183–1188.
3. www.flash.uchicago.edu.

6-30

АЛГОРИТМЫ ВОКСЕЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ НАУЧНЫХ ДАННЫХ

В. С. Натыньчик, А. В. Климов

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Значимым сегментом разработки ПО является визуализация научных данных, где важными характеристиками являются скорость и информативность представления обрабатываемой информации. Использование воксельной визуализации позволяет повысить эти характеристики по сравнению с полигональным отображением.

Воксельная визуализация – это метод, позволяющий отображать внутренний объем трехмерных данных без ограничений по количеству данных.

Целью настоящего доклада является обзор возможностей реализованной воксельной визуализации.

В докладе кратко описан способ формирования воксельного объема, в том числе и с использованием распределенных вычислений. Описан способ отображения воксельного объема (классический и по максимальной интенсивности).

Продемонстрированы возможности данного метода визуализации с различными дополнительными параметрами.

Продемонстрированы возможности работы элемента графического пользовательского интерфейса, позволяющего менять параметры отображения в реальном времени.

VOXEL REPRESENTATION ALGORITHMS OF SCIENTIFIC DATA

V. S. Natynchik, A. V. Klimov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

Scientific data visualization is an important part of the software development process. Key parameters are the following: processed information representation rate and information completeness. Voxel visualization improves these parameters greatly as compared to polygonal representation.

Voxel visualization is a method that allows us to show the inner volume of 3-D data without considering the amount of the data.

The work considers the opportunities of created voxel visualization.

The paper provides the summary of voxel volume creation technique using distributed computing as well. Voxel volume representation method is described (conventional and maximum intensity).

The work also shows the opportunities of the visualization technique with various extra parameters.

Real-time representation parameters tool (the element of the graphic user interface) operation is also shown.

6-31

ОБ ОДНОЙ ФОРМЕ ИСКУССТВЕННОЙ ВЯЗКОСТИ ТЕНЗОРНОГО ВИДА ДЛЯ РАСЧЕТА ТРЕХМЕРНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ

А. О. Наумов

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия
E-mail: aonaumov@vniief.ru

Представлена формулировка тензорной искусственной вязкости для сквозного счета ударных волн, которая нашла применение в методике ЛЭГАК, предназначенной для расчета сложных газодинамических течений с сильным деформациями контактных границ.

Аппроксимация уравнений движения и энергии за счет действия вязкости строится на основе аппроксимации операторов дивергенции и градиента произвольного тензора, представленного векторами-проекциями на линии счетной сетки. В состав вязкого тензора входит скалярный множитель, построенный на основе вязкости в форме Куропатенко, и функция-ограничитель, которая отключает действие вязкости при безударном сжатии или вращении как твердого тела.

В качестве демонстрации положительных свойств предложенной вязкости приводятся результаты расчетов трех задач: трехмерного варианта задачи Зальцмана, сферического теста Ноха и задачи об обжатии газа тяжелой оболочкой.

Литература

1. **Von Neuman, J.** F method for the numerical calculation of hydrodynamics shocks [Text] / J. Von Neuman, R. D. Richtmyer // Journal of Applied Physics. – 1950. – Vol. 21. – No. 3. – P. 232–237.
2. **Бахрах, С. М.** Методика ЛЭГАК-3D расчета трехмерных нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды и принципы ее реализации на многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью [Текст] / С. М. Бахрах, С. В. Величко, В. Ф. Спиридонов, П. А. Авдеев, М. В. Артамонов, Е. А. Бакулина, И. Ю. Безрукова, и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 2004. – Вып. 4. – С. 41 – 50.
3. **Caramana, E. J.** Formulation of Artificial Viscosity for Multi-dimensional Shock Wave Computations [Text] / E. J. Caramana,

- M. J. Shashkov, P. P. Whalen // *Journal of Computational Physics*. – 1998. – Vol. 144. – P. 70–97.
4. **Campbell, J. A.** Tensor Artificial Viscosity Using a Mimetic Finite Difference Algorithm [Text] / J. Campbell, M. J. Shashkov // *Journal of Computational Physics*. – 2001. – Vol. 172. – P. 739–765.
5. **Куропатенко, В. Ф.** Метод построения разностных схем для численного интегрирования уравнений газодинамики [Текст] // *Известия ВУЗов. Математика*. – 1962. – № 3. – С. 75–83.
6. **Noh, W. F.** Errors for calculations of strong shocks using artificial viscosity and artificial heat flux [Text] // *Journal of Computational Physics*. – 1987. – Vol. 72. – No. 1. – Pp. 78–120.
7. **Янилкин, Ю. В.** Тесты для гидрокодов, моделирующих ударноволновые течения в многокомпонентных средах [Текст] / Ю. В. Янилкин, Ю. А. Бондаренко, Е. А. Гончаров, А. Р. Гужова, В. Ю. Колобянин, В. Н. Софронов, В. П. Стаценко. – Саров : ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ». – 2017. – Том 1.
8. **Янилкин, Ю. В.** Математическое моделирование турбулентного перемешивания в сжимаемых средах [Текст] / Ю. В. Янилкин, В. П. Стаценко, В. И. Козлов. – Саров : ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ». – 2019. – Том 1.

ABOUT ONE TYPE OF TENSOR ARTIFICIAL VISCOSITY FOR SIMULATION OF 3D GAS DYNAMIC FLOWS

A. O. Naumov

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

E-mail: aonaumov@vniief.ru

The paper presents the description of the tensor-form artificial viscosity for computations with the shock-capturing method, it is applied in the LEGAK code developed and used at RFNC – VNIIEF for the simulation of complex gas dynamic flows with severely strained contact boundaries.

The motion and energy equation approximation owing to the viscosity effect is based on the approximation of continuous divergence operators and the arbitrary tensor gradient represented by vector projections on the computational grid lines. The viscous tensor includes a scalar factor which is based on the Kurapatenko-type viscosity and contains a function that eliminates the effect of viscosity under the conditions of shock-free compression, or rotation of a medium as a rigid body.

To demonstrate advantages of the proposed viscosity, simulation results are presented for the three problems: the 3D version of Zaltsman’s problem, the Noh spherical test, and the problem of gas compressing by a heavy shell.

References

1. **Von Neuman, J.** F method for the numerical calculation of hydrodynamics shocks [Text] / J. Von Neuman, R. D. Richtmyer // *Journal of Applied Physics*. – 1950. – Vol. 21. – No. 3. – P. 232–237.
2. **Бахрах, С. М.** Методика ЛЭГАК-3D расчета трехмерных нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды и принципы ее реализации на многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью [Текст] / С. М. Бахрах,

- С. В. Величко, В. Ф. Спиридонов, П. А. Авдеев, М. В. Артамонов, Е. А. Бакулина, И. Ю. Безрукова, и др. // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов*. – 2004. – Вып. 4. – С. 41 – 50.
3. **Caramana, E. J.** Formulation of Artificial Viscosity for Multi-dimensional Shock Wave Computations [Text] / E. J. Caramana, M. J. Shashkov, P. P. Whalen // *Journal of Computational Physics*. – 1998. – Vol. 144. – P. 70–97.
4. **Campbell, J. A.** Tensor Artificial Viscosity Using a Mimetic Finite Difference Algorithm [Text] / J. Campbell, M. J. Shashkov // *Journal of Computational Physics*. – 2001. – Vol. 172. – P. 739–765.
5. **Куропатенко, В. Ф.** Метод построения разностных схем для численного интегрирования уравнений газодинамики [Текст] // *Известия ВУЗов. Математика*. – 1962. – № 3. – С. 75–83.
6. **Noh, W. F.** Errors for calculations of strong shocks using artificial viscosity and artificial heat flux [Text] // *Journal of Computational Physics*. – 1987. – Vol. 72. – No. 1. – Pp. 78–120.
7. **Янилкин, Ю. В.** Тесты для гидрокодов, моделирующих ударноволновые течения в многокомпонентных средах [Текст] / Ю. В. Янилкин, Ю. А. Бондаренко, Е. А. Гончаров, А. Р. Гужова, В. Ю. Колобянин, В. Н. Софронов, В. П. Стаценко. – Саров : ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ». – 2017. – Том 1.
8. **Янилкин, Ю. В.** Математическое моделирование турбулентного перемешивания в сжимаемых средах [Текст] / Ю. В. Янилкин, В. П. Стаценко, В. И. Козлов. – Саров : ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ». – 2019. – Том 1.

6-32

ЗАДАЧА ОБ ОТРАЖЕНИИ ЦЕНТРИРОВАННОЙ ВОЛНЫ РАЗРЕЖЕНИЯ ОТ «МЯГКОГО» ПОРШНЯ

В. Н. Ногин

Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия

E-mail: v.n.nogin@vniitf.ru

Получено аналитическое решение задачи об отражении центрированной волны разрежения в идеальном газе от поршня, на котором задано постоянное давление. Волна разрежения отражается от поршня волной сжатия, которая движется по спадающему профилю плотности и на некотором расстоянии от поршня превращается в ударную волну. Рассмотрена структура течения в отраженной волне для случая, когда показатель адиабаты равен $\gamma = (2r + 3)/(2r + 1)$, где r – целое положительное число. Для значений $r = 0, 1, 2$ решение представлено в виде аналитических формул. Найдены условия возникновения разрыва в решении. Показано, что в зависимости от величины давления на левой границе разрыв возникает либо в области общего решения, либо в отраженной постоянной волне. Полученное решение может быть использовано в качестве теста для численных методик.

THE PROBLEM OF CENTERED RAREFACTION WAVE REFLECTED FROM A “SOFT” PISTON

V. N. Nogin

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: v.n.nogin@vniitf.ru

An exact solution has been found for the problem of a centered rarefaction wave reflected in ideal gas from a piston with constant pressure on it. The rarefaction wave is reflected from the piston as a compression wave moving along the decreasing density profile and transforming into a shock wave at some distance to the piston. The flow structure in the reflected wave is considered for the ratio of specific heat $\gamma = (2r + 3)/(2r + 1)$, where r is a positive integer. For $r = 0, 1, 2$ the solution is represented by analytical formulas. The conditions leading to a solution discontinuity have been found. It is shown that depending on the pressure on the pressure at the left boundary such discontinuity occurs either in the general solution region, or in the reflected simple wave. The solution found can be used to test computational codes.

6-33

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОГО ИСТОЧНИКА НА ТЕЧЕНИЕ ГАЗА В ВОСХОДЯЩЕМ ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ

А. Г. Обухов

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

E-mail: agobukhov@inbox.ru

Исходя из результатов проведенных экспериментов, были численно смоделированы и рассчитаны все газодинамические параметры [1–3], включая скоростные и энергетические характеристики трехмерного нестационарного восходящего закрученного течения газа конкретного масштаба, вызванного вертикальным продувом. Численные расчеты подобного течения газа позволили дать конкретные предложения и рекомендации по возможному проведению крупномасштабного эксперимента по закрутке больших масс воздуха – искусственного торнадо.

Полученные ранее численные результаты [4] дают хорошую основу для дальнейших исследований в газодинамической теории разрушительных атмосферных вихрей. В частности весьма интересным представляется исследование влияния локального одномоментного тепловыделения внутри сформировавшегося вихря на его газодинамические характеристики.

В работе приведены результаты численного моделирования теплового воздействия на трехмерные нестационарные течения воздуха, в восходящем закрученном потоке искусственно созданного торна-

до, находящегося в стационарном режиме функционирования.

С использованием явной разностной схемы и соответствующих начальных и граничных условий численно получены решения полной системы уравнений Навье–Стокса в прямоугольной расчетной области. В фиксированные моменты времени рассчитаны все газодинамические характеристики течений газа в условиях действия сил тяжести и Кориолиса, а также при наличии в центре расчетной области источника тепла.

Численные расчеты показали, что возникающие градиенты плотности, температуры и давления приводят к соответствующим изменениям трех компонентов скоростей течений воздуха в различные моменты времени и в различных точках расчетной области. Установлено, что воздействие теплового источника в центре вихря сводится к появлению противоположно направленных скоростей, соответствующих разлету газа от области нагрева. С течением времени эти дополнительные составляющие скоростей уменьшаются по величине и поглощаются соответствующими по знаку основными окружающими составляющими скорости вихря. В результате наличие источника нагрева в центре вихревого течения газа не влияет на изменение окружной скорости его течения в вихре.

Таким образом, наличие источника тепла в центральной части вихря приводит к расширению его вращающейся вертикальной части и одновременным течением газа в вертикальном направлении от центра вверх и вниз.

Литература

1. **Баутин, С. П.** Газодинамическая теория восходящих закрученных потоков [Текст] / С. П. Баутин, И. Ю. Крутова, А. Г. Обухов. – Екатеринбург : УрГУПС. – 2020. – С. 399.
2. **Абдубакова, Л. В.** Численный расчет скоростных характеристик трехмерного восходящего закрученного потока газа [Текст] / Л. В. Абдубакова, А. Г. Обухов // Известия вузов. Нефть и газ. – 2014. – № 3. – С. 88–94.
3. **Абдубакова, Л. В.** Численный расчет термодинамических параметров закрученного потока газа, инициированного холодным вертикальным продувом [Текст] / Л. В. Абдубакова, А. Г. Обухов // Известия вузов. Нефть и газ. – 2014. – № 5. – С. 57–62.
4. **Волков, Р. Е.** Параллельные вычисления в исследованиях зависимости газодинамических параметров восходящего закрученного потока газа от скорости продува [Текст] / Р. Е. Волков, А. Г. Обухов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2016. – № 1. – С. 92–97.

NUMERICAL SIMULATION OF THE IMPACT OF A HEAT SOURCE ON THE FLOW OF GAS IN AN ASCENDING SWIRLING FLOW

A. G. Obukhov

Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

E-mail: agobukhov@inbox.ru

Based on the results of the experiments, all gas dynamic parameters were numerically modeled and calculated

[1–3], including the velocity and energy characteristics of a three-dimensional unsteady ascending swirling gas flow of a specific scale caused by vertical purging. Numerical calculations of such a gas flow made it possible to give concrete proposals and recommendations for the possible conduct of a large – scale experiment on swirling large masses of air-an artificial tornado.

The numerical results obtained earlier [4] provide a good basis for further research in the gas-dynamic theory of destructive atmospheric vortices. In particular, it is very interesting to study the influence of local simultaneous heat release inside the formed vortex on its gas-dynamic characteristics.

The paper presents the results of numerical modeling of the thermal effect on three-dimensional non-stationary air flows in the ascending swirling flow of an artificially created tornado that is in a stationary mode of operation.

Using an explicit difference scheme and the corresponding initial and boundary conditions, solutions of the complete system of Navier–Stokes equations in a rectangular computational domain are numerically obtained. All gas-dynamic characteristics of gas flows under the action of gravity and Coriolis forces, as well as in the presence of a heat source in the center of the calculated region, are calculated at fixed time points.

Numerical calculations have shown that the resulting gradients of density, temperature and pressure lead to corresponding changes in the three components of the air flow velocities at different times and at different points in the computational domain. It is established that the effect of a heat source in the center of the vortex is reduced to the appearance of oppositely directed velocities corresponding to the expansion of the gas from the heating region. Over time, these additional components of the velocities decrease in magnitude and are absorbed by the corresponding sign of the main circumferential components of the vortex velocity. As a result, the presence of a heating source in the center of the gas vortex flow does not affect the change in the circumferential velocity of its flow in the vortex.

Thus, the presence of a heat source in the central part of the vortex leads to the expansion of its rotating vertical part and the simultaneous flow of gas in the vertical direction from the center up and down.

References

1. **Bautin, S. P.** Gas-dynamic theory of ascending swirling flows [Text] / Bautin S. P., Krutova I. Yu., A. G. Obukhov. – Yekaterinburg: USURT. – 2020. – P. 399.
2. **Abdubakova, L. V.** Numerical calculation of the velocity characteristics of a three-dimensional ascending swirling gas flow [Text] / L. V. Abdubakova, A. G. Obukhov // Izvestiya vuzov. Oil and gas. – 2014. – No. 3. – P. 88–94.
3. **Abdubakova, L. V.** Numerical calculation of thermodynamic parameters of a swirling gas flow initiated by cold vertical blowing [Text] / L. V. Abdubakova, A. G. Obukhov // Izvestiya vuzov. Oil and gas. – 2014. – No. 5. – P. 57–62.
4. **Volkov, R. E.** Parallel calculations in studies of the dependence of the gas-dynamic parameters of an ascending swirling gas flow on the purge velocity [Text] / R. E. Volkov, A. G. Obukhov // News of higher educational institutions. Oil and gas. – 2016. – No. 1. – P. 92–97.

6-34

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИДОННЫХ ЧАСТЕЙ ТОРНАДО И ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА В СТАЦИОНАРНОМ СЛУЧАЕ

О. В. Опрышко

Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»,
Снежинск, Россия

E-mail: OpryshkoOV@gmail.com

В работе используется математическая модель – система уравнений газовой динамики в условиях действия сил тяжести и Кориолиса, представляющая собой квазилинейную систему дифференциальных уравнений с частными производными гиперболического типа. В рамках этой модели ставится одна конкретная характеристическая задача Коши с начальными данными на горизонтальной плоскости $z = 0$, являющейся контактной характеристикой кратности два [1].

Математически моделируется [2, 3] течение газа в придонной части торнадо, с использованием данных натуральных наблюдений за торнадо, собранных в шкале Фудзиты.

С помощью метода Рунге–Кутты четвертого порядка точности рассчитываются газодинамические параметры стационарного потока. Проведен анализ газодинамических характеристик.

Представлена численно-аналитическая процедура нахождения кинетической энергии трех частей потока: радиальной, окружной и вертикальной.

Показаны и проанализированы результаты расчетов кинетической энергии различных частей потока при учете нескольких коэффициентов ряда.

Литература

1. **Баутин, С. П.** Газодинамическая теория восходящих закрученных потоков: монография [Текст] / С. П. Баутин, И. Ю. Крутова, А. Г. Обухов. – Екатеринбург : УрГУПС, 2020. – С. 399.
2. **Опрышко, О. В.** Расчет параметров специальных трехмерных стационарных потоков // Математические структуры и моделирование. – 2018, № 3(47). – С. 45–60.
3. **Крутова, И. Ю.** Расчет кинетической энергии течений в придонной части торнадо и тропического циклона [Текст] / И. Ю. Крутова, О. В. Опрышко // Препринт. – Снежинск : СФТИ НИЯУ МИФИ. – 2018. – С. 45.

NUMERICAL SIMULATION OF BOTTOM PARTS OF A TORNADO AND A TROPICAL CYCLONE IN A STATIONARY CASE

O. V. Opryshko

Snezhinsk Physics and technology Institute National Research Nuclear University “MEPhI”, Snezhinsk, Russia

E-mail: OpryshkoOV@gmail.com

The paper presents a set of gas-dynamic equations under the gravitational force and the Coriolis force. The mathematical model represents a quasilinear system of partial differential hyperbolic equations. For a system of equations of gas-dynamics, one specific characteristic Cauchy problem with initial data on the horizontal plane $z = 0$, which is a contact characteristic of multiplicity two, is considered [1].

To make a mathematical model [2, 3] of gas flow in the bottom part of a tornado the Fujita scale data is used.

The gas-dynamic parameters are found using the fourth-order Runge–Kutta method. The gas-dynamic characteristics have been analyzed.

The paper presents a method of approximate analytical and numerical calculation of kinetic energy in circumferential, radial and vertical parts of a flow.

The results of calculation of kinetic energy in various parts of a flow are presented. Several coefficients of power series are taken into account.

References

1. **Bautin, S. P.** Gas-dynamic theory of upward swirling flows: monograph [Text] / S. P. Bautin, I. Yu. Krutova, A. G. Obuhov. – Yekaterinburg : USURT, 2020. – P. 399.
2. **Opryshko, O. V.** Calculation of the parameters of special three-dimensional stationary flows // Mathematical structures and modeling. – 2018, No. 3(47). – P. 45–60.
3. **Krutova, I. Yu.** Calculation of the kinetic energy of currents in the bottom part of a tornado and a tropical cyclone [Text] / I. Yu. Krutova, O. V. Opryshko // Preprint. – Snezhinsk : SPTI NRNU MEPhI. – 2018. – P. 45.

Представлены результаты расчетов ряда задач, с использованием регулярных и нерегулярных сеток. В частности, метод опробован на расчетах Lambda методом установления. Приведено сравнение с решением, полученным в цилиндрических координатах.

THE SOLUTION OF THE NEUTRON MULTI-GROUP TRANSPORT EQUATION IN SPHERICAL COORDINATES ON 2D UNSTRUCTURED MESHES

T. V. Ponomaryova, E. M. Vaziev, A. D. Gadzhiev

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

The paper presents a nonlinear DS_N method for solving 2D multi-group neutron transport in axially symmetric geometry in spherical coordinates. The difference equations are invariant for one-dimensional spherical symmetry. The method is effective to neutralize the beam effect typical of two-dimensional DS_N methods.

The domain is broken into unstructured triangular and quadrangular cells. In angular directions the mesh is constructed by ES_M quadratures. The difference equations are solved by a sweeping procedure. The mesh is ordered to produce the effect of boundary conditions.

Test calculations with structured and unstructured meshes are presented. In particular, the method was tested by calculating Lambda through cycle convergence. The methods in spherical and cylindrical coordinates were compared.

6-35

РЕШЕНИЕ МНОГОГРУППОВОГО УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА НЕЙТРОНОВ В СФЕРИЧЕСКИХ КООРДИНАТАХ НА ДВУМЕРНЫХ НЕРЕГУЛЯРНЫХ СЕТКАХ

Т. В. Пономарёва, Э. М. Вазиев, А. Д. Гаджиев

Российский Федеральний Ядерный Центр – ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия

В докладе представлен нелинейный DS_N метод решения двумерного уравнения переноса нейтронов в многогрупповом приближении в осесимметричном случае в сферических координатах. При таком подходе система разностных уравнений инвариантна относительно одномерной сферической симметрии. Это помогает существенно снизить лучевой эффект, характерный для двумерных DS_N методов.

Расчетная область в пространстве (r, z) покрывается нерегулярной сеткой из четырехугольных и треугольных ячеек. В пространстве направлений полета нейтронов сетка строится согласно ES_M -квадратуре. Система разностных уравнений переноса решается методом бегущего счета. Для этого сетка в пространстве (r, z) упорядочивается для передачи влияния граничных условий.

6-36

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ РАССТАНОВКИ ЧАСТИЦ НА СФЕРИЧНОСТЬ УДАРНО-НАГРУЖЕННОЙ ГРАНИЦЫ ВЕЩЕСТВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РИХТМАЙЕРА–МЕШКОВА SPH-МЕТОДОМ

Ф. А. Сапожников, В. С. Рыкованов

Российский Федеральний Ядерный Центр – ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия

E-mail: f.a.sapozhnikov@vniitf.ru

Неустойчивость Рихтмайера–Мешкова (RMI) появляется, когда возмущенная граница двух веществ различной плотности подвергается ударному ускорению, такому как ударная волна. Изучение RMI важно для понимания процесса инерциального термоядерного синтеза, где сферическая твердая дейтерий-третиевая (DT) оболочка, заполненная DT-газом, обжимается с использованием мощных лазеров. Взрывная ударная волна, двигаясь к центру сферической оболочки, порождает RMI на ее внутренней поверхности из-за большого перепада плотности между твердой и газовой фазами DT, приводя к быстрому росту начальных случайных возмущений.

Целью нашей работы является нахождение наилучшего начального расположения частиц, которое

не вносило бы искусственных возмущений на сферическую границу двух веществ при моделировании методом SPH. Сферическая симметрия ударно нагруженной границы должна сохраняться, если не было наложено возмущений.

В нашей работе исследуются два способа построения начальных условий (НУ): решетчатый – с использованием Гранецентрированной Кубической решетки, сферический – с использованием концентрических сфер.

После прохождения ударной волны через границу веществ можно заметить явную разницу в сферичности для различных НУ.

Адаптация НУ необходима, чтобы уменьшить количество частиц, необходимое для достижения требуемого пространственного разрешения рядом с границей слоев. Расщепление частиц – это типичный способ увеличения локального разрешения. Для решетчатых НУ использовался произвольно повернутый и не повернутый икосаэдрический шаблон из частиц, а для сферических – постепенное изменение радиуса.

Было показано, в задачах моделирования сферических образцов, состоящих из сферических слоев с высокими перепадами плотности важно использовать такие начальные условия, которые не привносят искусственные возмущения. Часто применяемые в плоских задачах решетчатые НУ с расщеплением частиц показали плохие результаты при моделировании сферического обжатия. Рекомендуется использовать сферические НУ с постепенным изменением радиуса. Такие НУ сохраняют локальный порядок частиц и при ударном нагружении привносят наименьшее паразитное возмущение.

INFLUENCE OF INITIAL PARTICLE CONFIGURATION UPON SPHERICITY OF SHOCK LOADED DENSITY INTERFACE DURING SPH MODELING OF RICHTMYER–MESHKOV INSTABILITY

F. A. Sapozhnikov, V. S. Rykovanov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: f.a.sapozhnikov@vniitf.ru

The Richtmyer–Meshkov instability (RMI) occurs when a perturbed interface between two fluids of different densities undergoes an impulsive acceleration, such as a shock wave. The study of RMI is important for understanding of the inertial confinement fusion process, where a spherical capsule containing solid deuterium-tritium (DT) and an inner space filled with gaseous DT is compressed using powerful lasers. The imploding shock moving towards the center of the spherical shell induces the RMI on its inner surface due to the large density difference between the solid and gaseous DT, resulting in a rapid growth of initially present random perturbations.

The purpose of our work is to find to best initial particle configuration that does not introduce artificial per-

turbations of spherical density interface during smoothed particle hydrodynamic (SPH) modelling. Spherical symmetry of shock loaded interface must be preserved if no perturbations were applied.

In our work two ways of generating initial conditions (IC) are investigated: lattice – using Face Centered Cubic lattice, spherical – using concentric spheres.

After shock wave passing through the interface one can see obvious differences in its sphericity for different IC.

Adaptive IC are needed to provide for minimal particles quantity to get desired spatial resolution near the layers boundaries. Particle splitting is the typical way to increase local resolution. For lattice IC randomly rotated and not rotated icosahedron template was applied, for spherical IC – gradual radius changing was used.

We have demonstrated that in the simulation of spherical samples compiled of spherical layers which strongly differ in density, it is important to use initial conditions that do not induce artificial perturbations. The lattice IC with splitting which are often used in plane problems showed poor results when applied to spherical compression. We suggest that the spherical IC with radial adaptation should be used in this case because the preserve local particle ordering and induce the least spurious perturbation under shock loading.

6-37

ЭГИДА-ТЕСТ-GPU. АДАПТАЦИЯ МЕТОДИКИ ЭГАК К СЧЕТУ НА GPU

Е. А. Сизов, А. М. Ерофеев

Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

E-mail; sizove@mail.ru, amekrym@yandex.ru

В докладе излагаются результаты работы по адаптации методики ЭГАК для счета на графических ускорителях (GPU). В качестве испытательного полигона для исследования кода выбрана тестовая программа ЭГИДА-ТЕСТ, являющаяся упрощенной реализацией методики ЭГАК. Первоначальной целью работы являлся вопрос принципиальной возможности счета данной методикой на таком типе ЭВМ. После того, как это было доказано, цель была переформулирована на полный перевод методики на GPU. В докладе представлены итоги промежуточного этапа работ. В них вошли результаты по адаптации к GPU программ расчета процессов лагранжевой и эйлеровой газовой динамики и процесса теплопроводности. Газодинамический код ЭГИДА-ТЕСТ, аппроксимируя уравнений газовой динамики, использует ALE-подход, при котором аппроксимация уравнений происходит в два этапа. На первом решаются уравнения газодинамики в лагранжевых переменных, а на втором производится аппроксимация конвективных членов уравнений. Теплопроводность основана на схеме расщепления по направлениям и распараллеливания

прогонки. Каждый процесс разбит на этапы, которые удобно анализировать с точки зрения качества адаптации кода на ускорительном устройстве.

Приведены практические подходы к адаптации существующих кодов для работы на GPU. Представлены пути решения следующих проблем: использование нескольких GPU; задействования для расчета простаивающих ядер центрального процессора (схема счета MPI×CUDA + MPI×OMP); использование одного и того же кода как для GPU, так и для центрального процессора. Проведены замеры эффективности тестовых задач, демонстрирующие положительный эффект от использования GPU.

EGIDA-TEST-GPU. ADAPTATION OF THE EGAK METHOD TO GPU COUNTING

E. A. Sizov, A. M. Erofeev

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

E-mail; sizove@mail.ru, amekrym@yandex.ru

The report presents the results of work on adapting the EGAK methodology for counting on graphics accelerators (GPU). As a testing polygon for code research the test program EGIDA-TEST was chosen, which is a simplified implementation of the methodology EGAK. The initial purpose of the work was the question of the fundamental possibility of counting this technique on this type of computer. After this was proven, the goal was reformulated for a complete transfer of the technique to the GPU. The report presents the results of the intermediate stage of work. They include the results of adapting programs for calculating Lagrangian and Euler gas dynamics and thermal conduction process. The gas dynamic code EGIDA-TEST, approximating the equations of gas dynamics, uses the ALE approach, in which the equations are approximated in two stages. At the first stage, the equations of gas dynamics are solved in Lagrangian variables, and the second is used to approximate the convective terms equations. Thermal conductivity is based on a splitting scheme in directions and parallelization sweep. Each process is divided into stages that can be conveniently analyzed with from the point of view of the quality of code adaptation on the accelerating device.

Practical approaches to adapting existing codes to work on a GPU are presented. The ways of solving the following problems are presented: using multiple GPUs; use for calculating idle cores of the central processor (counting scheme MPI×CUDA + MPI×OMP); using the same code for both the GPU and central processor. Measurements of the effectiveness of test problems have been carried out, demonstrating the positive effect of using the GPU.

6-38

ВЛИЯНИЕ МАКСИМУМА ПЛОТНОСТИ ВОДЫ НА ОХЛАЖДЕНИЕ ВОДОНАСЫЩЕННОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

О. А. Симонов¹, Л. Н. Филимонова²

¹ФГБУН ФИЦ «Тюменский научный центр СО РАН», Тюмень, Россия

²Тюменский филиал ФГБУН Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Тюмень, Россия

E-mail: s_o_a@gambler.ru, filimonovaln@mail.ru

При проектировании, строительстве и эксплуатации инженерных сооружений (зданий, скважин, трубопроводов, дорог и пр.) в арктических и субарктических районах, необходимо учитывать процессы промерзания и оттаивания грунтов. Особенно это актуально в областях распространения многолетнемерзлых пород, от состояния которых напрямую зависит безопасность эксплуатации техногенных объектов. Для охлаждения грунта под опорами сооружений (под всем сооружением) тепло из грунта отводится при помощи труб, заполненных веществами, которые вскипают при температуре грунта, пары их поднимаются в конденсатор, где из-за контакта с низкой внешней температурой пары превращаются в жидкость, которая стекает обратно в грунт. Верхний слой грунта, чаще всего это высокопористый песок, подстилаемый многолетнемерзлыми породами, в теплый период оттаивает и образует переувлажненный слой породы. В грунте возникают конвективные течения жидкости, оказывающие существенное воздействие на тепло-массоперенос. Из-за трудностей исследования конвективных течений путем прямого физического эксперимента, оправдано применение математического моделирования.

Влияние конвективного переноса тепла в пористых средах хорошо изучено, но недостаточное внимание уделяется исследованию влияния инверсии плотности воды на конвективные течения в пористых средах. Хорошо известно, что при атмосферном давлении максимальная плотность воды (999,9720 кг/м³) наблюдается при температуре 3,984°C. Это явление приводит к полной структурной перестройке всего течения и изменяет темп охлаждения (нагрева) пористой среды. При определенных условиях холодная жидкость начинает подниматься, охлаждая верхние слои пористой среды, что приводит к изменению характера теплопереноса и возникновению гидродинамической неустойчивости.

В настоящей работе в численном эксперименте проведена оценка влияния инверсии плотности воды на тепло-массоперенос в водонасыщенной пористой среде в окрестности вертикально расположенной трубы охлаждающего устройства. Показано, что максимум плотности воды приводит к перестройке конвективного течения вследствие чего уменьшается интенсивность конвективных потоков и замедляется темп охлаждения водонасыщенной пористой среды.

INFLUENCE OF THE MAXIMUM WATER DENSITY ON THE COOLING OF A WATER-SATURATED POROUS MEDIUM

O. A. Simonov¹, L. N. Filimonova²

¹Federal State Institution Federal Research Center Tyumen Scientific Center of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russia

²Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Tyumen Branch, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russia

E-mail: s_o_a@rambler.ru, filimonovaln@mail.ru

When designing, constructing, and operating engineering structures (buildings, wells, pipelines, roads, etc.) in the Arctic and Subarctic regions, it is necessary to take into account the processes of freezing and thawing of soils. This is especially true in the areas of permafrost distribution, on the condition of which the safety of operation of man-made objects directly depends. To cool the ground under the supports of structures (under the entire structure), heat from the ground is removed by means of pipes filled with substances that boil at the ground temperature, their vapors rise into the condenser, where, due to contact with a low external temperature, the vapors turn into a liquid that flows back into the ground. The top layer of the soil, most often highly porous sand, underlain by permafrost, thaws during the warm period and forms a waterlogged layer of rock. Convective fluid flows occur in the ground, which have a significant effect on heat and mass transfer. Due to the difficulties of studying convective flows by direct physical experiment, the use of mathematical modeling is justified.

The effect of convective heat transfer in porous media is well studied, but insufficient attention is paid to the study of the effect of water density inversion on convective flows in porous media. It is well known that at atmospheric pressure, the maximum water density (999.9720 kg/m³) is observed at a temperature of 3.984°C. This phenomenon leads to a complete structural rearrangement of the entire flow and changes the rate of cooling (heating) of the porous medium. Under certain conditions, the cold liquid begins to rise, cooling the upper layers of the porous medium, which leads to a change in heat transfer and the appearance of hydrodynamic instability.

In this report, the effect of water density inversion on heat and mass transfer in a water-saturated porous medium in the vicinity of a vertically positioned cooling device pipe is estimated in a numerical experiment. It is shown that the maximum water density leads to a rearrangement of the convective flow, which reduces the intensity of the convective flows and slows down the rate of cooling of the water-saturated porous medium.

6-39

АЛГОРИТМ РЕТРОСПЕКТИВНОГО АНАЛИЗА МЕСТНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

Н. А. Теплых^{1,2}, А. Л. Карманов¹,
В. В. Власов¹, В. В. Фёдоров^{1,2}

¹Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия

²Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Снежинск, Россия

E-mail: teaplykhna@yandex.ru

Ретроспективный анализ (РА) является эффективным инструментом, который используется в различных областях, таких как сельскохозяйственный мониторинг, городское планирование, мониторинг окружающей среды, разведка и т. д. Результатом РА является информационный слой для серии разновременных изображений одной местности, который отражает изменения, произошедшие в каждом пикселе анализируемого изображения по сравнению с предыдущими изображениями серии. Изменения могут характеризоваться степенью выраженности (величина от 0 до 100%) и принадлежностью к конкретным значимым классам изменений (дороги, строения, лесные массивы и т.д.).

В данной работе предлагается алгоритм, основанный на технологии глубокого обучения [1], для проведения ретроспективного анализа местности. Разработанный алгоритм использует нейронную сеть с сиамской архитектурой [2], которая реализует идею параллельной обработки пары изображений идентичными операциями преобразования данных.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности разработанного алгоритма.

Литература

1. **Траск, Э.** Грокаем глубокое обучение [Текст] : пер. с англ. А. Киселев. – СПб. : Питер, 2019. – 352 с., ISBN 978-5-44-61-1334-7.
2. **Zhan, Y.** Change detection based on deep siamese convolutional network for optical aerial images [Text] / Y. Zhan, K. Fu, M. Yan, X. Sun, H. Wang, and X. Qiu // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2017. – Vol. 14, No. 10. – P. 1845–1849.

ALGORITHM OF RETROSPECTIVE ANALYSIS OF TERRAIN USING DEEP LEARNING TECHNOLOGY

N. A. Teplykh^{1,2}, A. L. Karmanov¹,
V. V. Vlasov¹, V. V. Fyodorov^{1,2}

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

²Snezhinsk Institute of Physics and Technology National Research Nuclear University “MEPhI”, Snezhinsk, Russia

E-mail: teaplykhna@yandex.ru

Retrospective analysis (RA) is an effective tool that is used in various fields such as agricultural monitoring, urban planning, environmental monitoring, exploration, etc. The result of RA is an information layer for a series of multi-temporal images of the same terrain, which reflects the changes that have occurred in each pixel of the analyzed image compared to the previous images of the series. Changes can be characterized by degree of expression (value from 0 to 100%) and belonging to specific significant classes of changes (roads, buildings, forest massifs, etc.)

In this paper, we propose an algorithm based on deep learning technology [1] to perform a retrospective analysis of the terrain. The developed algorithm uses a neural network with Siamese architecture [2], which implements the idea of parallel processing of a pair of images by identical data transformation operations.

The results show the effectiveness of the developed algorithm.

References

1. **Trask, Andrew W.** Grokking Deep Learning [Text]. – MANNING, 2019. – 352 с. ISBN: 9781617293702.
2. **Zhan, Y.** Change detection based on deep siamese convolutional network for optical aerial images [Text] / Y. Zhan, K. Fu, M. Yan, X. Sun, H. Wang, and X. Qiu // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2017. – Vol. 14, No. 10. – P. 1845–1849.

6-40

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ С УЧЕТОМ АБЛЯЦИОННОГО УНОСА МАССЫ В МОДУЛЕ «ЛОГОС ТЕПЛО»

Р. А. Тришин, В. А. Глазунов, Ю. Д. Серяков

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия
E-mail: vaglazunov@vniief.ru, yudseryakov@vniief.ru,
ratrishin@vniief.ru

В программном модуле «Логос Тепло» [1] реализован подход для моделирования трехмерной задачи теплопроводности с учетом поверхностного уноса вещества. Актуальность данной работы продиктована необходимостью определения толщины теплозащитного покрытия летательного аппарата в процессе его эксплуатации.

В данной работе для расчета перемещения граничных узлов сеточной модели решается внешняя задача Стефана. Движение внутренних узлов сетки рассчитывается по методу упругого сглаживания. Условием применения подхода является сохранение качества сеточной модели на протяжении расчета. В работе рассматриваются критерии качества ячеек сетки, а также дополнительные возможности по сохранению сеточной топологии.

Верификация реализованной методики проводилась на задаче с аналитическим решением, а также на экспериментальной задаче высокоинтенсивного теплового воздействия на теплозащитный материал PICA, разработанного в NASA. На примере решения экспериментальной задачи предложен поэтапный алгоритм расчета, включающий в себя расчет до выполнения критерия остановки, перестроение сеточной модели и продолжение расчета.

Литература

1. **Дерюгин, Ю. Н.** Многофункциональный пакет программ ЛОГОС: физико-математические модели расчета задач аэро-, гидродинамики и теплопереноса [Текст] : препринт / Ю. Н. Дерюгин, Д. К. Зеленский, В. А. Глазунов и др. – Саров : РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2013. – С. 111.

METHOD OF SOLVING HEAT CONDUCTION PROBLEMS TAKING INTO ACCOUNT ABLATIVE MASS LOSS IN THE “LOGOS HEAT” MODULE

R. A. Trishin, V. A. Glazunov, Yu. D. Seryakov

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific
Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia
E-mail: vaglazunov@vniief.ru, yudseryakov@vniief.ru,
ratrishin@vniief.ru

The Logos Heat [1] software module implements an approach for modeling a three-dimensional thermal conductivity problem taking into account the surface ablation of matter. The relevance of this work is dictated by the need to determine the thickness of the heat-protective coating of the aircraft during its operation.

In this paper, the external Stefan problem is solved to calculate the displacement of the boundary nodes of the grid model. The movement of the internal nodes of the grid is calculated using the elastic smoothing method. The condition for applying the approach is to preserve the quality of the grid model during the calculation. The paper considers the criteria for the quality of grid cells, as well as additional possibilities for preserving the grid topology.

Verification of the implemented methodology was carried out on the problem with an analytical solution, as well as on the experimental problem of high-intensity thermal exposure to PICA heat-shielding material developed at NASA. Using the example of solving an experimental problem, a step-by-step calculation algorithm is proposed, including the calculation before the stop criterion is met, the reconstruction of the grid model and the continuation of the calculation.

References

1. **Deryugin, Yu. N.** Multifunctional software package LOGOS: physical and mathematical models for calculating problems of aero-, hydrodynamics and heat transfer [Text] : preprint / Yu. N. Deryugin, D. K. Zelensky, V. A. Glazunov and other. – Sarov : RFNC – VNIIEF, 2013 – P. 111.
-

6-41

ПРОЧНОСТЬ ГЕРМОКАПСУЛЫ ПРИ АВАРИЙНОМ ПАДЕНИИ С ВЫСОТЫ 9 МЕТРОВ

Н. Н. Тулаева, М. А. Липатников, И. В. Минаев,
М. В. Никульшин, А. А. Табатчиков

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: natulya.tulaeva@mail.ru

В работе представлены результаты численного моделирования аварийного падения гермокапсулы с высоты 9 метров. Гермокапсула является элементом системы экологической безопасности, предназначенной для локализации аэрозолей после проведения экспериментов по исследованию динамических свойств специальных материалов на прецизионных нагружающих установках баллистического типа. Конструкция гермокапсулы должна обеспечивать герметичность внутренней полости при проведении транспортно-технологических операций после экспериментов.

В данной работе с помощью метода конечных элементов моделируется аварийное падение гермокапсулы с высоты 9 метров. Проведен анализ напряженно-деформированного состояния элементов сборки. Проведена оценка работоспособности системы герметизации по сохранению прочности основных силовых элементов конструкции, включая болтовые соединения, и анализ зон установки герметизирующих уплотнений.

Анализ состояния гермокапсулы при автономном падении и в составе транспортного контейнера показал, что конструкция гермокапсулы сохраняет герметичность.

PRESSURE CAPSULE STRENGTH AT ACCIDENTAL FALLING FROM 9 METERS HEIGHT

N. N. Tulaeva, M. A. Lipatnikov, I. V. Minaev,
M. V. Nikulshin, A. A. Tabatchikov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

E-mail: natulya.tulaeva@mail.ru

The work presents numerical simulation results of a pressure capsule falling from 9 meters height. The pressure capsule is an element of an environmental safety system. The capsule is needed to localize aerosols after the experiments on special materials dynamic properties at the ballistic type precision loading facilities. The pressure capsule design must provide containment of the inner volume in the course of transportation-technological operations after the experiments.

The work provides the results of the simulation of pressure capsule accidental falling from 9 meters height using finite elements method. Stress-strain distribution of

the assembly elements has been analyzed. Containment system performance has been assessed. The key parameters of the assessment were main structural elements strength retention, including bolted joints, and analysis of seal mounting areas.

Pressure capsule state analysis alone and as part of the transportation complex has shown that pressure capsule construction remains air-tight.

6-42

УЧЕТ СПЕКТРАЛЬНЫХ И КИНЕТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В ПРИБЛИЖЕНИИ ЛУЧИСТОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ ЗАДАЧ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ В ДВУМЕРНОМ ОСЕСИММЕТРИЧНОМ СЛУЧАЕ НА ПРЯМОУГОЛЬНОЙ СЕТКЕ

А. Д. Хмельницкая, Н. Г. Карлыханов

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Реализован метод для решения спектрального кинетического уравнения переноса излучения совместно с уравнением баланса энергии в двумерном осесимметричном случае на прямоугольной сетке. Данный подход сводит усредненное по угловым переменным спектральное кинетическое уравнение и уравнение баланса энергии к уравнению для приближения лучистой теплопроводности. Метод включает три этапа. На первом этапе решается спектральное кинетическое уравнение при известной температуре вещества с использованием монотонной разностной схемы первого порядка точности. На втором этапе находится решение уравнения диффузионного типа при известной температуре по методу из работы [1] по схеме второго порядка точности. Рассчитываются коэффициенты связи спектральной плотности энергии излучения с температурой в центрах счетных ячеек. На третьем этапе по данным коэффициентам связи находятся усредненные спектральные пробеги излучения и эффективная плотность энергии излучения. По данным параметрам решается нелинейное уравнение в постановке лучистой теплопроводности относительно температуры. Данная работа является развитием одномерного подхода, предложенного в работе [2].

Литература

1. Карлыханов, Н. Г. Учет кинетических эффектов в диффузионном приближении для расчета задач переноса излучения [Текст] / Н. Г. Карлыханов, М. Ю. Козманов // ВАНТ: сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2010. – Вып. 4. – С. 3–8.
2. Карлыханов, Н. Г. Учет спектральных и кинетических эффектов в приближении лучистой теплопроводности для расчета задач переноса излучения [Текст] // ВАНТ: сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2019. – Вып. 4. – С. 21–32.

**INCORPORATING SPECTRAL
AND KINETIC EFFECTS IN THE RADIATIVE
HEAT TRANSFER APPROXIMATION FOR
RADIATIVE TRANSFER SIMULATIONS
IN TWO-DIMENSIONAL AXISYMMETRIC CASE
ON RECTANGULAR MESH**

A. D. Khmel'nitskaya, N. G. Karlykhanov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk,
Russia

The method for the solution of the spectral kinetic equation of radiation transport together with the equation of energy balance in a two-dimensional cylindrically symmetric case on a rectangular mesh is realized. This approach reduces spectroscopic kinetic equation averaged on angular variables and equation of energy balance to the equation for approach of radiant thermal conduction. The method includes three stages. At the first step the spectral kinetic equation is solved at known temperature of substance using the monotonous difference scheme of the first order of accuracy. At the second stage the equation of diffusion type is solved at known temperature in accordance with [1] employing the scheme of the second order of accuracy. Coefficients coupling spectral density of radiant energy to the temperature in the centers of the calculation cells are defined. The third step is dedicated to calculation of averaged spectral lengths of radiation and effective density of radiation energy at the coupling coefficients. On the given parameters the non-linear equation directed by a radiant thermal conduction concerning the temperature is solved. This research work is the development of the one-dimensional approach offered in work [2].

References

1. **Karlykhanov, N. G.** Incorporating kinetic effects in the equation for diffusion approach for radiative transfer simulations [Text] / N. G. Karlykhanov, M. Yu. Kozmanov // QNST: ser. Mathematical modeling of physical processes. – 2010. – Rel. 4. – P. 3–8.
2. **Karlykhanov, N. G.** Incorporating spectral and kinetic effects in the radiative heat transfer approximation for radiative transfer simulations [Text] // QNST. : ser. Mathematical modeling of physical processes. – 2019. – Rel. 4. – P. 21–32.

6-43

**ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ
ОБОБЩЕННОЙ МОДЕЛИ ИЗИНГА НА
КВАДРАТНОЙ РЕШЕТКЕ КОМБИНАТОРНЫМ
МЕТОДОМ ВДОВИЧЕНКО–ФЕЙНМАНА**

Е. С. Цуварев, Ф. А. Кассан-Оглы

Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН,
Екатеринбург, Россия
E-mail: egunov@mail.ru

Рассмотрена модель Изинга на обобщенной квадратной решетке. В отличие от обычной квадратной

решетки, которая обладает только двумя взаимодействиями между спинами – J_1 в горизонтальном и J_2 в вертикальном направлениях, на обобщенной квадратной решетке [1] встречаются четыре различных обменных взаимодействия между спинами – J_1 и J_3 в горизонтальном, а также J_2 и J_4 в вертикальном направлениях. Таким образом, на обобщенной квадратной решетке можно выделить две независимые подрешетки.

Следуя алгоритму комбинаторного метода Вдовиченко–Фейнмана [2, 3], получено точное аналитическое решение обобщенной модели Изинга на квадратной решетке в отсутствие магнитного поля

$$\ln \frac{\lambda_g}{2} = \frac{1}{16\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \ln \left[\frac{1}{2} \left(\operatorname{ch} \frac{J_1}{T} \operatorname{ch} \frac{J_2}{T} \operatorname{ch} \frac{J_3}{T} \operatorname{ch} \frac{J_4}{T} + \right. \right. \\ \left. \left. + \operatorname{sh} \frac{J_1}{T} \operatorname{sh} \frac{J_2}{T} \operatorname{sh} \frac{J_3}{T} \operatorname{sh} \frac{J_4}{T} + 1 - \right. \right. \\ \left. \left. - \operatorname{sh} \frac{J_1}{T} \operatorname{sh} \frac{J_3}{T} \cos(\omega_1 + \omega_2) - \right. \right. \\ \left. \left. - \operatorname{sh} \frac{J_2}{T} \operatorname{sh} \frac{J_4}{T} \cos(\omega_1 - \omega_2) - \right. \right. \\ \left. \left. - \left(\operatorname{sh} \frac{J_1}{T} \operatorname{sh} \frac{J_4}{T} + \operatorname{sh} \frac{J_2}{T} \operatorname{sh} \frac{J_3}{T} \right) \cos \omega_1 - \right. \right. \\ \left. \left. - \left(\operatorname{sh} \frac{J_1}{T} \operatorname{sh} \frac{J_2}{T} + \operatorname{sh} \frac{J_3}{T} \operatorname{sh} \frac{J_4}{T} \right) \cos \omega_2 \right] d\omega_1 d\omega_2.$$

В данной работе выведены точные аналитические выражения нуль-температурных энтропий обобщенной квадратной решетки при различных знаках и величинах обменных взаимодействий. Исследованы термодинамические и фрустрационные свойства обобщенной квадратной решетки. Обнаружено совершенно новое явление, при котором во фрустрированном состоянии наблюдается два широких пика теплоемкости. Причем малый дополнительный пик теплоемкости ($T^* = 1,232\dots$) не изменяется ни по положению, ни по размеру в зависимости от изменения одного из параметров обменного взаимодействия!

Важность данной работы заключается в том, что рассмотрение обобщенной модели Изинга с различными обменами приводит не только к существованию множества фрустрационных состояний и фрустрационных эффектов, по сравнению с обычной моделью Изинга, но и позволяет описать нетривиальную картину магнитного упорядочения, а также температурные зависимости энтропии и прочих наблюдаемых величин.

Литература

1. **Syozi, I.** Phase Transitions and Critical Phenomena [Text] / I. Syozi, C. Domb, M. Green. – N.Y. : Academic, 1972.
2. **Vdovichenko, N. V.** [Text]. – JETP V.20 (2), 477 (1965).
3. **Feynman, R. P.** [Text]. – Statistical Mechanics. A Set of Lectures. – N.Y. : Benjamin-Cummings, 1972.

TEXACT SOLUTION OF GENERALIZED ISING MODEL ON A SQUARE LATTICE BY VDOVICHENKO–FEYNMAN COMBINATORIAL METHOD

E. S. Tsvarev, F. A. Kassin-Ogly

M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

E-mail: eguny@mail.ru

The Ising model on a generalized square lattice is considered. In contrast to the classic square lattice which has two interactions between spins only: J_1 in the horizontal and J_2 in the vertical directions on the generalized square lattice [1] there are four different exchange interactions between spins: J_1 and J_3 in the horizontal direction as well as J_2 and J_4 in vertical directions. Thus, two independent sublattices can be distinguished on a generalized square lattice.

Following the algorithm of the Vdovichenko–Feynman combinatorial method [2, 3] an exact analytical solution of the generalized Ising model on a square lattice in the absence of a magnetic field is obtained

$$\ln \frac{\lambda_g}{2} = \frac{1}{16\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \ln \left[\frac{1}{2} \left(\operatorname{ch} \frac{J_1}{T} \operatorname{ch} \frac{J_2}{T} \operatorname{ch} \frac{J_3}{T} \operatorname{ch} \frac{J_4}{T} + \operatorname{sh} \frac{J_1}{T} \operatorname{sh} \frac{J_2}{T} \operatorname{sh} \frac{J_3}{T} \operatorname{sh} \frac{J_4}{T} + 1 - \operatorname{sh} \frac{J_1}{T} \operatorname{sh} \frac{J_3}{T} \cos(\omega_1 + \omega_2) - \operatorname{sh} \frac{J_2}{T} \operatorname{sh} \frac{J_4}{T} \cos(\omega_1 - \omega_2) - \left(\operatorname{sh} \frac{J_1}{T} \operatorname{sh} \frac{J_4}{T} + \operatorname{sh} \frac{J_2}{T} \operatorname{sh} \frac{J_3}{T} \right) \cos \omega_1 - \left(\operatorname{sh} \frac{J_1}{T} \operatorname{sh} \frac{J_2}{T} + \operatorname{sh} \frac{J_3}{T} \operatorname{sh} \frac{J_4}{T} \right) \cos \omega_2 \right] d\omega_1 d\omega_2.$$

In this paper, exact analytical expressions are derived for the zero-temperature entropies of a generalized square lattice for different signs and values of exchange interactions. The thermodynamic and frustration properties of the generalized square lattice are investigated. A completely new phenomenon has been discovered in which two wide peaks of heat capacity in the frustrated state are observed. Moreover, the small complementary peak of heat capacity ($T^* = 1.232\dots$) does not change either in position or in size depending on the change in one of the parameters of the exchange interaction!

The importance of this work lies in the fact that the consideration of the generalized Ising model with different parameters of the exchange interactions leads to the existence of a variety of frustration states and frustration effects compared with the usual Ising model and its allows us to describe a non-trivial pattern of magnetic ordering as well as the temperature dependence of the entropy and other observed quantities.

References

1. **Syozi, I.** Phase Transitions and Critical Phenomena [Text] / I. Syozi, C. Domb, M. Green. – N.Y. : Academic, 1972.

2. **Vdovichenko, N. V.** [Text]. – JETP V.20 (2), 477 (1965).

3. **Feynman, R. P.** [Text]. – Statistical Mechanics. A Set of Lectures. – N.Y. : Benjamin-Cummings, 1972.

6-44

МОНОТОННЫЙ МЕТОД ДРОБНЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ДВУМЕРНЫХ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ

И. Е. Чередниченко, В. А. Шмелёв, Ю. В. Янилкин

Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

E-mail: cherednichenko-ilma@rambler.ru

Необходимость корректного расчета движения многокомпонентной среды является одной из важнейших задач для лагранжево-эйлеровых и эйлеровых методик. Наиболее остро данная проблема проявляется в смешанных ячейках. Одним из способов решения данной проблемы является использование метода частиц [1]. В этом случае потоки веществ между элементами счетной сетки определяются частицами, которые несут в себе дискретные количества веществ с отнесенными к ним термодинамическими параметрами. Основным недостатком классического метода частиц является сильная немонотонность решения, связанная с дискретностью переноса указанных величин.

Упругопластические процессы, особенно при наличии разрушений, представляют собой важные с практической точки зрения явления, требующие точного описания при численном моделировании течений с использованием неподвижных счетных сеток.

В работе [2] был предложен метод дробных частиц (МДЧ), в котором минимизирована проблема немонотонности классического метода частиц. Метод реализован в составе методики ЭГАК [3]. Его монотонность улучшается путем дробления частиц таким образом, чтобы вытекающий из ячейки объем стал равен объему, вычисленному сеточным методом.

В настоящей работе предлагается развитие МДЧ для моделирования разрушения материалов при хрупком отколе и их компактировании и для реализации модели Канеля. Использование метода позволяет сохранить историю данных процессов и уменьшить влияние как погрешности эйлеровых методов, так и немонотонности классического метода частиц. Проведен ряд тестовых расчетов, результаты которых свидетельствуют о том, что МДЧ может успешно применяться для решения описанных выше классов задач.

Литература

1. **Харлоу, Ф. Х.** Численные методы частиц в ячейках для задач газодинамики [Текст] // Вычислительные методы в газодинамике. – М. : Мир, 1967. – С. 316–342.
2. **Янилкин, Ю. В.** Монотонный метод частиц для моделирования двумерных газодинамических течений [Текст] / Ю. В. Янилкин, В. А. Шмелёв, В. Ю. Колобянин, С. П. Беляев // ВАНТ: сер. ММФП. – 2012. – Вып. 3. – С. 3–14.

3. Дарова, Н. С. Комплекс программ ЭГАК. Лагранжево-эйлерова методика расчета двумерных газодинамических течений многокомпонентной среды [Текст] / Н. С. Дарова, О. А. Дибиров, Г. В. Жарова, А. А. Шанин, Ю. В. Янилкин // ВАНТ: сер. ММФП. – 1994. – Вып. 2. – С. 51–58.

MONOTONOUS METHOD OF FRACTIONAL PARTICLES FOR TWO-DIMENTIONAL ELASTOPLASTIC FLOWS

I. E. Cherednichenko, V. A. Smelyov, Yu. V. Yanilkin
Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific
Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia
E-mail: cherednichenko-ilma@rambler.ru

Necessary of correct calculation of many-component medium motion is one of central problem for Lagrange–Euler’s and Euler’s methods. It is especially important for mixed cells. The particle method using [1] is solution for this problem. In that case matter flows between countable grid elements are determinated by particles carrying in themselves discrete substances amount with these substance thermodynamic parameters. The classical particle method main drawback is strong solve nonmonotony involved with these values transport discontinuity.

Elastoplastic process, especially at fracture availability, represents important as a practical matter phenomenon needing of accurate description under flow numerical simulation with fixed countable grid using.

In work [2] was proposed the method of fractional particles (MFP) in which the problem of classical particle method nonmonotony was minimized. The method was realized in the composition of technique EGAK [3]. Its monotony is improved by particle fraction in such a way that subsequent upon a cell volume was equal to volume calculating of grid method.

In this work is proposed MFP development to material fracture simulation under brittle split and their compaction and to Kanel’s model realization. Using of method enable to save a these process history and depreciate influence both Euler’s methods and classical particle methods nonmonotonies. Test results show that MFP can be successfully use to solve the above problem classes.

References

1. Harlow, F. H. Numerical particle methods in cells to gasdynamic problems [Text] // Computational methods in gasdynamic. – M. :World, 1967. – P. 316–342.
2. Yanilkin, Yu. V. Monotonous method of fractional particles for two-dimensional gasdynamic flow simulation [Text] / Yu. V. Yanilkin, V. A. Smelev, V. Yu. Kolobyanin, S. P. Belyaev // VANT: ser. MMFP. – 2012. – Num. 3. P. 3–14.
3. Darova, N. S. at al. Program complex EGAK. Lagrange–Euler’s technique of two-dimensional gasdynamic flow calculation of many-component medium [Text] // VANT: ser. MMFP. – 1994. – Num. 2. – P. 51–58.

6-45

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА И ПОГЛОЩЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МИШЕНЯХ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА С НЕПРЯМЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

И. С. Чубарешко, А. В. Вронский, А. А. Шестаков
Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия
E-mail: i.s.chubareshko@mail.ru

Одним из направлений работ при исследовании процессов имплозии и термоядерного зажигания мишеней на мегаджоульных лазерных установках является развитие технологии проведения численного моделирования мишеней для оптимизации постановки экспериментов на УФЛ-2М и мощных электрофизических комплексах с целью достижения условий термоядерного зажигания мишеней и получения новых экспериментальных данных. Так как теория нелинейных процессов взаимодействия лазерного излучения с плазмой далека от завершения, большую роль в изучении этих процессов играет математическое моделирование процессов имплозии. В настоящее время численное моделирование является основным, а зачастую и единственным инструментом для детального описания некоторых физических явлений при исследовании процессов термоядерного зажигания мишеней. Поэтому уверенность в оптимизации постановок экспериментов на лазерных установках определяется все более реалистическим моделированием газодинамических процессов при модернизации этих конструкций. Возникающие под воздействием сильного сжатия скачки температур в таких задачах очень резкие и для их численного моделирования требуются достаточно точные разностные методики, описывающие движение контактной границы и сжатие газа в разных физико-математических моделях уравнения переноса излучения.

В настоящей работе излагается трехмерная модель поглощения лазерного излучения. Основной целью работы является проверка и тестирование предложенной модели поглощения лазерного излучения и демонстрация полученных результатов.

SIMULATION OF LASER RADIATION TRANSFER AND ABSORPTION IN ICF INDIRECT IRRADIATION TARGETS

I. S. Chubareshko, A. V. Vronsky, A. A. Shestakov
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia
E-mail: i.s.chubareshko@mail.ru

One of the thrust areas in research into the processes that govern implosion and ignition in MJ lasers implies the development of target simulation technology

which will help optimize the setup of experiments on the UFL-2M facility and powerful electrophysical complexes aimed to attain target ignition conditions and collect new experimental evidence. Since the theory of nonlinear processes in laser interaction with plasma is far from completion, a great role is given to mathematical modeling which is now the main, and often the only instrument for getting a detailed description of some physical phenomena in target ignition studies. What gives us confidence in the success of experimental setup optimization for modernized facilities is more realistic simulation of hydrodynamic processes. Temperature jumps in these calculations are very sharp because of high compression and their simulation requires such difference techniques that provide a rather accurate description of interface movement and gas compression in different radiative transfer models.

The paper describes a 3D laser absorption model. The main goal is to validate and verify the model and demonstrate results.

6-46

**ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ
ЭФФЕКТОВ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ
В РАЗЛИЧНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЯХ
НА РАЗВИТИЕ КОРОТКОВОЛНОВЫХ
ВОЗМУЩЕНИЙ В МИШЕНЯХ ИТС**

А. А. Шестаков, В. А. Лыков, Е. Л. Лягина

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

В докладе рассматривается влияние спектральных эффектов переноса излучения в различных приближениях на развитие коротковолновых возмущений в оболочечных мишенях ИТС. Показано, что динамика полета оболочки и скорость роста возмущений при сжатии оболочечной мишени существенно зависят от модели переноса излучения. Рассмотрено влияние М-полосы рентгеновского излучения хольраума на прогрев мишени и развитие коротковолновых возмущений для условий опубликованных экспериментов с мишенями непрямого облучения, проведенных на установке NIF. Отмечается, что прогрев оболочки квантами М-переходов ионов золота снижает плотность оболочки, градиенты плотности и давлений на фронте абляции, что приводит к более слабому росту возмущений. Результаты двумерных расчетов роста возмущений с номерами сферических гармоник 60 и 90, которые были выполнены в спектральных приближениях по переносу излучения, находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными, полученными в опытах с оболочечными мишенями на установке NIF.

**SPECTRAL EFFECTS
OF RADIATIVE TRANSFER IN DIFFERENT
APPROXIMATIONS AND THE DEVELOPMENT
OF SHORT-WAVE PERTURBATIONS
IN ICF TARGETS**

A. A. Shestakov, V. A. Lykov, E. L. Lyagina

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

The paper considers how the spectral effects of radiative transfer in different approximations influence the development of short-wave perturbations in ICF shell targets. Shell expansion dynamics and perturbation growth rate are shown to be strongly dependent on the radiative transfer model. The effect of the M-band of X-rays on target heating and development of short-wave perturbations is studied for the conditions of published experiments with indirect irradiation targets of the NIF facility. Shell heating by quanta from the M-transitions of gold ions is shown to reduce the shell density and density and pressure gradients on the ablation front thus weakening the growth of perturbations. 2D perturbation growth calculations with spherical harmonics 60 and 90 which were done in spectral approximations to radiative transfer are in a good agreement with experimental evidence for the shell targets of the NIF facility.

6-47

**О ПРОБЛЕМЕ ПЛОХОЙ ОБУСЛОВЛЕННОСТИ
ПРИ РЕШЕНИИ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ
ПЕРЕНОСА ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

А. А. Шестаков

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

В вычислительной математике встречаются ситуации, когда устойчивые алгоритмы приводят к большим погрешностям. В этом случае вводят понятие плохой обусловленности. Рассмотрение плохой обусловленности системы уравнений переноса теплового излучения является актуальной задачей, так как моделирование переноса излучения является одной из самых сложных проблем в численной математике. Достаточно сказать, что только численных эффектов, приводящих к искажению точного решения, известно более десяти. Изучать свойство плохой обусловленности в общем случае достаточно сложно. В данной работе рассмотрено несколько примеров возникновения плохой обусловленности системы уравнений переноса теплового излучения в различных приближениях.

THE PROBLEM OF ILL CONDITIONING IN SOLVING HEAT TRANSFER EQUATIONS

A. A. Shestakov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

In computing mathematics it may happen that robust algorithms give large errors. In this case we speak about their ill conditioning. Investigation of ill conditionality in heat transfer equations is of great importance because radiative transfer simulation is one of the most complicated problems in computing mathematics. Suffice it to say that only the numerical effects that distort the exact solution are known to exceed ten. It is rather difficult to study ill conditionality in the general case. This paper considers several examples of ill conditionality in differently approximated heat transfer equations.

6-48

ТЕСТОВЫЕ ЗАДАЧИ НА СЖАТИЕ СФЕРИЧЕСКИХ СЛОИСТЫХ СИСТЕМ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

A. A. Шестаков

Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия

В настоящее время численное моделирование является основным, а зачастую и единственным инструментом для детального описания некоторых физических явлений при исследовании процессов сверхсильного сжатия веществ ударными волнами на установках ЛТС. Изучение поведения ударных волн и волн разряджения на простейших модельных тестах помогает при анализе более сложных расчетов на лазерных установках. В работе предложены тестовые задачи, моделирующие сжатие ударными волнами сферической слоистой системы, состоящей из нескольких веществ. Рассмотрены режимы сжатия, когда максимальная средняя плотность в центральной области достигается после прохождения второй или третьей ударных волн. Такие режимы, когда максимум средней плотности в центральной области достигается не на первом пике, а на последующих, названы сжатием с усилением.

TEST PROBLEMS ON SHOCK COMPRESSION OF LAYERED SPHERICAL SYSTEMS

A. A. Shestakov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

Numerical modeling is currently the main, and often the only instrument for attaining a detailed description of some physical phenomena which occur in superstrong material compression by shock waves in laser fusion

facilities. Research into the behavior of shock and rarefaction waves in simple model tests helps in the analysis of more complicated problems. The paper offers test problems which simulate shock compression of a layered spherical system of several materials. It considers compression regimes where the average density in the central region reaches a maximum after the passage of the second or third shock, not the first. These regimes are referred to as compression with strengthening.

6-49

ОБ ОДНОМ ЛАГРАНЖЕВО-ЭЙЛЕРОВОМ МЕТОДЕ РАСЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ СЖИМАЕМЫХ СРЕД

Е. С. Шестаковская¹, Ф. Г. Магазов¹, И. Р. Макеева^{1,2}

¹Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

²Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

E-mail: shestakovskaiaes@susu.ru

Конечно-разностные методы расчета нестационарных течений сжимаемых сред основываются на системе законов сохранения в форме Эйлера, либо в форме Лагранжа. Лагранжевы методы отличаются меньшей дистракцией сильных и слабых разрывов и позволяют отслеживать контактные границы. Однако при переходе к моделированию дву- и трехмерных течений возникают проблемы, связанные с сильными деформациями сетки, что может увеличить общую погрешность численного решения. Поэтому представляется целесообразным объединить преимущества лагранжева и эйлера подходов [1].

В данной работе численно реализован метод расчета двумерных течений в эйлеровых координатах, в основу которого положена явная лагранжево-эйлерова разностная схема. Расчет каждого временного шага проводится в два этапа. На лагранжевом этапе применяется разностная схема [2], основанная на методе Куропатенко, который обладает нулевой диссипацией энергии на гладких решениях и минимальной дистракцией на сильных разрывах. Для расчета величин на контактных границах применяются уравнения, отличные от уравнений в регулярных точках. На эйлеровом этапе применяется перестройка сетки по методике [3] и пересчет всех параметров вещества со старой сетки на новую в соответствии с законами сохранения массы, импульса и энергии. Разработанный численный алгоритм показал работоспособность при тестировании на задачах, имеющих аналитическое решение [4].

Литература

1. Рождественский, Б. Л. Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике [Текст] /

- Б. Л. Рождественский, Н. Н. Яненко // М. : Наука, 1968. – 417 с.
2. **Куропатенко, В. Ф.** Исследование влияния пульсирующего вдува на поток возле обтекаемого тела [Текст] / В. Ф. Куропатенко, И. И. Кузнецова, И. Р. Макеева // ВАНТ: сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2001. – Вып. 3. – С. 60–71.
3. **Яловец, А. П.** Расчет течений среды при воздействии интенсивных потоков заряженных частиц [Текст] // Прикладная механика и техническая физика. – 1997. – Т. 38, № 1. – С. 151–166.
4. **Куропатенко, В. Ф.** Основы численных методов механики сплошных сред [Текст] / В. Ф. Куропатенко, Е. С. Шестаковская // Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – 256 с.

ABOUT ONE LAGRANGIAN-EULERIAN METHOD FOR CALCULATING UNSTEADY FLOWS OF COMPRESSIBLE MEDIA

E. S. Shestakovskaya¹, F. G. Magazov¹, I. R. Makeeva^{1,2}

¹South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

²Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: shestakovskaiaes@susu.ru

Finite-difference methods for calculating unsteady flows of compressible media are based on a system of conservation laws in the form of Euler, or in the form of Lagrange. Lagrangian methods are characterized by less distraction of strong and weak discontinuities and allow tracking the contact boundaries. However, in the transition to modeling two- and three-dimensional flows, problems arise associated with strong deformations of the mesh, which can increase the overall error of the numerical solution. Therefore, it seems appropriate to combine the advantages of the Lagrange and Eulerian approaches [1].

In this paper, a method for calculating two-dimensional flows in Eulerian coordinates is numerically implemented, which is based on an explicit Lagrangian-Euler difference scheme. Each time step is calculated in two stages. At the Lagrangian stage, a difference scheme is applied [2] based on the Kuropatenko method, which has zero energy dissipation on smooth solutions and minimal distraction on strong discontinuities. To calculate the quantities at the contact boundaries, equations are used that are different from the equations at regular points. At the Eulerian stage, the grid is rearranged according to the method [3] and all the parameters of the substance are recalculated from the old grid to the new one in accordance with the laws of conservation of mass, momentum and energy. The developed numerical algorithm has shown its efficiency when testing on problems with an analytical solution [4].

References

1. **Rozhdestvenskiy, B. L.** Systems of quasilinear equations and their applications to gas dynamics [Text] / B. L. Rozhdestvenskiy, N. N. Yanenko // М. : Nauka, 1968. – 417 p.
2. **Kuropatenko, V. F.** Study of the influence of pulsating injection on the flow near the streamlined body [Text] /

V. F. Kuropatenko, I. I. Kuznetsova, I. R. Makeeva // VANT: Mathematical Modeling of Physical Processes Series. – 2001. – Is. 3. – P. 60–71.

3. **Yalovets, A .P.** Calculation of medium flows under the influence of intense flows of charged particles [Text] // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 1997. – Vol. 38, No. 1. – P. 151–166.

4. **Kuropatenko, V. F.** Fundamentals of Numerical Methods in Continuum Mechanics [Text] / V. F. Kuropatenko, E. S. Shestakovskaya // Chelyabinsk : SUSU Publishing Center, 2017. – 256 p.

6-50

ДВУМЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ СЖАТИЯ И ГОРЕНИЯ ДВУХКАСКАДНОЙ МИШЕНИ ДЛЯ ЛТС С НЕПРЯМЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ

А. Н. Шушлебин, В. А. Лыков,
Л. В. Соколов, Д. В. Борецких

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

В двумерных расчетах по комплексам ТИГР-3Т и ОМЕГА-3Т [1] моделируется развитие возмущений от неоднородностей облучения и геометрии границ оболочек при сжатии двухкаскадной мишени для мегаджоулевой лазерной установки и исследуется термоядерное горение мишени. Двухкаскадная мишень состоит из двух сферических оболочек, где в центре находится термоядерное топливо, а между оболочками помещается малоплотное вещество.

Литература

1. **Шушлебин, А. Н.** Двумерные расчеты сжатия и горения двухкаскадной мишени для ЛТС с непрямым воздействием по комплексам ТИГР-3Т и ОМЕГА-3Т [Текст] : сборник трудов, часть I (на русском языке) / А. Н. Шушлебин, В. А. Лыков, Л. В. Соколов и др. – Международная конференция «V Забабахинские научные чтения», 21–25 сентября 1998. – Снежинск : Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 1999.

2D CALCULATIONS OF TWO-CASCADE TARGET COMPRESSION AND COMBUSTION IN INDIRECT-DRIVE ICF

A. N. Shushlebin, V. A. Lykov,
L. V. Sokolov, D. V. Boretskikh

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

In 2D calculations by the TIGR-3T and OMEGA-3T codes [1], we simulate the development of perturbations from irradiation inhomogeneities and the geometry of shell boundaries during the compression of a two-cascade mega-joule laser target to investigate thermonuclear combustion. The target consists of two spherical shells with

thermonuclear fuel in the center and a low-density matter in between.

References

1. Shushlebin, A. N. 2D calculations of two-cascade target compression and combustion in indirect-drive ICF by TIGR-3T and OMEGA-3T codes [Text] / A. N. Shushlebin, V. A. Lykov, L. V. Sokolov et al. – Proceedings of the V Zababakhin Scientific Talks , 21–25 September 1998, Part I (in Russian). – Snezhinsk : RFNC – VNIITF Publishing Office, 1999.
-

Секция 7
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИЗИКО-
МАТЕМАТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ
МЕДИЦИНСКИХ ЗАДАЧ

Section 7
APPLICATION OF PHYSICO-
MATHEMATICAL TECHNOLOGIES
TO SOLVING BASIC MEDICAL PROBLEMS

7-1

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ
В ЭПИДЕМИОЛОГИИ: РЕШЕНИЕ
ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ НА ПРИМЕРЕ
ЭПИДЕМИОЛОГИИ ТУБЕРКУЛЕЗА**

К. К. Авиллов

Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука
РАН, Москва, Россия
E-mail: kkavilov@gmail.com

Практическая эпидемиология включает в себя ряд задач, требующих применения математического моделирования: прогноз развития эпидемиологической ситуации, прогноз отклика эпидемического процесса на воздействия (выявление, лечение, вакцинация и т. п.), определение оптимальной стратегии борьбы с распространением инфекции и т. д.

В докладе будет представлено развитие математических моделей распространения и контроля туберкулеза, созданных в коллективе ИВМ РАН – от самых основ и до формирования и решения дополнительных задач, служащих для уточнения общей модели эпидемиологии туберкулеза. Помимо общего введения в эпидемиологию туберкулеза в докладе будут описаны:

- Базовая модель распространения и контроля туберкулеза: компартментная модель на основе обыкновенных дифференциальных уравнений, отличающаяся двухстадийной подмоделью хода активного туберкулеза (с различием инфекционных и неинфекционных больных) и явным различием выявленных и невыявленных больных (тем самым моделируются процессы выявления).
- Модель для оценки качества выявления больных туберкулезом: на основании расширенных данных о выявлении больных туберкулезом (бактериовыделение на момент выявления и метод выявления – активный или пассивный) оцениваются удельные скорости выявления, а тем самым – и доля выявляемых больных.
- Модель выявления больных с учетом социальной неоднородности: предполагается, что население делится на две группы – социально благополучную и неблагополучную. С использованием данных по выявлению туберкулеза среди лиц, попадающих в СИЗО (и, по предположению, относящихся преимущественно к социально неблагополучным), и данных по выявлению туберкулеза в «гражданской» системе со стратификацией по социально-экономическому статусу делаются оценки заболеваемости и коэффициента выявления в обеих группах.
- Оценка параметров хода нелеченного (невыявленного, а потому ненаблюдаемого) туберкулеза на основании данных регулярных флюорографических обследований: для уточнения как общей эпидемиологической модели, так и оценок качества выявления больных необходимо актуализировать оценки параметров хода нелеченного туберкулеза. Для этого предлагается использовать данные ретроспективного пересмотра флюорографических снимков, предше-

ствующих выявлению больного. Это дает ограничения на время возникновения и развития болезни, что позволяет косвенно оценить динамику развития нелеченного туберкулеза.

**MATHEMATICAL MODELS
IN EPIDEMIOLOGY: SOLVING PRACTICAL
PROBLEMS IN EPIDEMIOLOGY
OF TUBERCULOSIS**

K. K. Avilov

Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian
Academy of Sciences, Moscow, Russia
E-mail: kkavilov@gmail.com

Practical epidemiology comprises a number of problems that require mathematical modelling: forecasting of the development of an epidemic process, forecasting the response of the epidemic process to impacts (case detection, treatment of cases, vaccination, etc.), determining the optimal strategy of controlling the spread of an infection, etc.

In the talk, presented will be the development of mathematical models of spread and control of tuberculosis that were created in INM RAS – from the very basics and till the formulation and solution of additional problems that serve to adjust the global tuberculosis epidemiology model. Besides a general introduction to the epidemiology of tuberculosis, the talk will cover:

- The basic model of spread and control of tuberculosis: a compartmental model on the basis of ordinary differential equations that features a two-stage submodel of the course of active tuberculosis (it differentiates infectious and non-infectious cases) and an explicit differentiation of detected and undetected cases (thus, the processes of case-detection are modelled).
- The model for estimating the quality of tuberculosis case-detection: using extended tuberculosis case-detection data (bacterioexcretion status at detection and the method of detection – active or passive), the detection rate coefficients are estimated, and, hence, the case-detection rate is estimated.
- The model of case-detection with social heterogeneity: it assumes the population to be subdivided into two strata – socially adapted and socially disadapted one. By combining the data on detection of tuberculosis among the persons who go to criminal detention centres (assumed to belong mostly to the disadapted stratum) and the data on detection of tuberculosis among the general population with stratification by social status, the incidence rates and case-detection rates are estimated in both strata.
- Estimation of the parameters of the natural history of untreated (undetected and, thus, unobservable) tuberculosis on the basis of the data from regular fluorographic examinations: in order to improve both the global epidemiologic model and the quality of estimation of case-detection rate, it is necessary to update the estimations of the parameter of the natural history of tuberculosis. To do this, we suggest to use the data from retrospective re-examination of the fluorographic pictures that precede the detection of a tuberculosis case. This limits the time of the

onset of the disease and its duration, which enables us to estimate indirectly the dynamics of untreated tuberculosis.

7-2

**НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ
ПОЛУЧЕНИЯ ДАННЫХ
ДЛЯ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ МОДЕЛИ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИНФЕКЦИОННЫХ
ЗАБОЛЕВАНИЙ**

В. И. Балута

Федеральный исследовательский центр «Институт
прикладной математики им. М. В. Келдыша» РАН,
Москва, Россия

E-mail: Vbaluta@yandex.ru

Особенностью мультиагентного моделирования является необходимость описания с различной степенью подробности составных элементов системы и правил их поведения. Получение исходных данных для описания параметров модели является сложной проблемой. Прямых данных по большинству параметров нет, необходимо применять способы их получения на основании косвенных данных. В качестве таких косвенных источников могут быть предложены: базы статистических исследований, базы нормативных документов, целевые информационные системы, коммерческие базы данных.

Базовые параметры количественного и половозрастного состава искусственной популяции формируются на основании данных переписи населения, корректируемой по базе органов ЗАГС, а стратификация – с привлечением данных по структуре занятости.

Информация об общественном транспорте в конкретном городе определяется на основании двух категорий источников – данных о транспортном парке и данных о технических характеристиках соответствующих видов и типов транспорта.

Нижняя граница значений площади рабочих помещений регулируется требованиями строительных и санитарных норм и правил в зависимости от числа работников. Аналогичные же нормативные документы регулируют условия функционирования учебных заведений, предприятий общественного питания и ряд других категорий объектов.

Данные о суточных миграционных потоках в различных точках концентрации и коммуникации агентов являются динамическими и могут быть получены только из мониторинговых систем. Интернет-сервис Госуслуг «Электронный дневник и журнал» можно использовать для учета посещаемости школ. Системы видеонаблюдения – для получения релевантных данных о динамике изменения количественных показателей перемещения лиц в контрольных точках. Способствовать этому может разработанный правительством законопроект «О единой системе “Безопасный город”», предполагающий создание единого оператора, цель которого – собрать воедино разроз-

ненные аппаратно-программные комплексы, отвечающие за безопасность, заставить их работать сообща и передавать данные друг другу. В НПО «Импульс» разработана система видеонаблюдения для всех видов общественного транспорта с широким спектром возможностей, включая автоматическое ведение подсчета пассажиров, подключение к которой позволит отслеживать динамику пассажиропотоков.

Отдельной проблемой представляется учет миграционных потоков между населенными пунктами. В качестве первичного источника рассматриваются обобщенные данные по продаже билетов перевозчиками, однако в этом случае отсутствует возможность учета транзитных пассажиров, как и использование личного автотранспорта. Единственной приемлемой альтернативой можно считать получение данных о статистике роуминга от мобильных операторов.

**SOME ASPECTS OF OBTAINING DATA
FOR A MULTI-AGENT MODEL
OF THE SPREAD OF INFECTIOUS DISEASES**

V. I. Baluta

Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: Vbaluta@yandex.ru

A special feature of multi-agent modeling is the need to describe the components of the system and the rules of their behavior with varying degrees of detail. Obtaining the initial data to describe the parameters of the model is a difficult problem. There is no direct data for most parameters, it is necessary to use methods for obtaining them based on indirect data. As such indirect sources can be offered: databases of statistical research, databases of regulatory documents, target information systems, commercial databases.

The basic parameters of the quantitative and gender-and-age composition of the artificial population are formed on the basis of population census data, adjusted according to the registry office database, and stratification – with the involvement of data on the employment structure.

Information about public transport in a particular city is determined on the basis of two categories of sources – data on the transport fleet and data on the technical characteristics of the corresponding types and types of transport.

The lower limit of the values of the area of working premises is regulated by the requirements of construction and sanitary norms and rules, depending on the number of employees. Similar regulatory documents regulate the conditions for the functioning of educational institutions, public catering enterprises and a number of other categories of objects.

Data on daily migration flows at various points of concentration and communication of agents are dynamic and can only be obtained from monitoring systems. The Internet service of Public Services “Electronic diary and journal” can be used to record school attendance. Video surveillance systems-to obtain relevant data on the dynamics

of changes in quantitative indicators of the movement of persons at control points. The draft law “On the unified Safe City System” developed by the government, which assumes the creation of a single operator, can contribute to this. The goal is to bring together disparate hardware and software complexes responsible for security, make them work together and transmit data to each other. The company “Impulse” has developed a video surveillance system for all types of public transport with a wide range of features, including automatic passenger counting, connecting to which will allow you to track the dynamics of passenger traffic.

A separate problem is the accounting of migration flows between settlements. Generalized data on ticket sales by carriers are considered as the primary source, but in this case there is no possibility of accounting for transit passengers, as well as the use of personal vehicles. The only acceptable alternative is to obtain data on roaming statistics from mobile operators.

7-3

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ CIR РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭПИДЕМИИ COVID-19

Ю. Е. Балыкина, В. В. Захаров

Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: j.balykina@spbu.ru, v.zaharov@spbu.ru

В работе изучается возможность использования альтернативного подхода к прогнозированию показателей распространения эпидемии COVID-19. В рамках исследования получены оценки точности камерной модели SIR при прогнозировании весенней волны эпидемии COVID-19 в России. Вместо классической модели SIR предлагается использование новой дискретной стохастической модели распространения эпидемии, основанной на балансе характеристик эпидемии в текущий и прошлые моменты времени. Сформулирован принцип динамического баланса эпидемиологического процесса. Показано, что в общем случае динамическая характеристика эпидемиологического процесса не является постоянной величиной. Предложенная модель CIR распространения эпидемии описывает динамику общего количества заболевших (C), числа активных случаев (I) и общего количества выздоровевших и умерших (R) с учетом случайных параметров процентного прироста и использованием характеристики динамического баланса. Для прогнозирования значений общего количества заболевших применяется CBRR-модель, ранее предложенная и апробированная авторами. На основе разработанной модели реализован алгоритм построения среднесрочных прогнозов показателей эпидемиологического процесса на промежутках стационарности эпидемиологического процесса. Исследован вопрос о точности такого прогноза на промежутках не стационарности. Приве-

дены примеры построения прогнозов на основе модели CIR распространения коронавирусной инфекции COVID-19 в России мае–июне 2020 г. На интервале с 6 по 30 июня отклонение расчетной траектории от фактической траектории числа активных больных составило, в среднем, 3,63%. На пике эпидемии по количеству активных случаев (15 июня) отклонение достигало 6,38%. Значение MAPE для данного прогноза составило 4,14%. В случае уточнения характеристики динамического баланса, отклонение от фактической траектории числа активных больных составляло, в среднем 1,13%. При этом на пике эпидемии (15 июня 2020 г.) отклонение было равно 1,01%.

CIR MATHEMATICAL MODEL OF THE COVID-19 EPIDEMIC SPREAD

Y. E. Balykina, V. V. Zakharov

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

E-mail: j.balykina@spbu.ru, v.zaharov@spbu.ru

The research examines the possibility of using an alternative approach to predicting the spread of the COVID-19 epidemic. As part of the study, estimates of the traditional SIR compartment model accuracy were obtained while predicting the spring 2020 wave of the COVID-19 epidemic in Russia. Instead of the SIR model, it is proposed to use a new discrete stochastic model of the epidemic spread based on the balance of the characteristics of the epidemic at the current and past points in time. The principle of the dynamic balance of the epidemiological process is formulated in the study. It is shown that in the general case the dynamic characteristics of the epidemiological process are not constant. The proposed CIR model of the epidemic spread describes the dynamics of the total number of cases (C), the number of active cases (I), and the total number of the recovered and the dead (R), taking into account the random parameters of the percentage increase and using the dynamic balance characteristic. To predict the values of C , the CBRR model is used, which was previously developed and tested by the authors. An algorithm for constructing medium-term forecasts of indicators of the epidemiological process at intervals of stationarity of the epidemiological process is implemented. The question of the forecast accuracy on intervals of non-stationarity is investigated. Examples of forecasts based on the CIR model of the COVID-19 spread in Russia in May–June 2020 are given. From June 6 to June 30, the average deviation of the calculated trajectory from the actual trajectory of the number of active cases was 3.63%. At the peak of the epidemic in terms of the number of active cases (June 15, 2020) the deviation reached 6.38%. The MAPE value for that forecast was 4.14%. In case of specifying the dynamic balance characteristic, the average deviation from the actual trajectory of the number of active cases was 1.13%, with the deviation 1.01% at the peak of the epidemic (June 15, 2020).

7-4

ТЕХНОЛОГИЯ СБОРА И ОБРАБОТКИ НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ ДАННЫХ ИЗ СЕТИ ИНТЕРНЕТ

С. С. Варыханов, А. А. Карандеев

Федеральный исследовательский центр «Институт
прикладной математики им. М. В. Келдыша» РАН,
Москва, Россия

E-mail: masmx64@gmail.com, KarAlex755@gmail.com

Решается задача поиска и систематизации информации по заданным параметрам из неструктурированных источников сети Интернет. В качестве примера решаемой задачи рассмотрен сбор данных и параметров для наполнения имитационной модели повышенной детализации по распространению коронавирусных инфекций. В докладе изложена технология сбора, анализа и систематизации полученной информации с последующей ее обработкой подготовкой для использования в имитационной модели. Обсуждаются передовые методы обработки неструктурированной и слабо определенной информации. Используются комбинации методов регулярных выражений, поиска по ключевым словам, технологии сбора больших объемов данных, а также методы искусственного интеллекта. Предварительный поиск источников информации производится с помощью поисковых машин Яндекс и Google. Найденные неструктурированные источники валидируются на соответствие предметной области и заносятся в базу данных. Поиск параметров из источников производится с помощью анализа текста на естественном языке. Идея анализа заключается в том, что интересующие значения параметров расположены вблизи ключевых слов или их синонимов, с учетом инвариантов естественного языка. Для поиска связи значения параметра с ключевыми словами используется нейронная сеть для поиска связей между словами в тексте.

COLLECTING AND PROCESSING TECHNOLOGY OF UNSTRUCTURED DATA FROM THE INTERNET

S. S. Varykhanov, A. A. Karandeev

Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: masmx64@gmail.com, KarAlex755@gmail.com

The presented article solves the problem of finding and organizing information according to given parameters from unstructured sources on the Internet. As an example, the problem of collecting data and parameters for filling a simulation model of increased detail on the spread of coronavirus infections is considered. The report describes the technology of collecting, analyzing and systematizing the obtained information with its subsequent processing and preparation for use in the simulation model. Advanced methods of processing unstructured and poorly defined information are considered. Artificial intelligence

techniques used, with combinations of regular expression techniques, keyword searches and large data collection technologies. A preliminary search for information sources carried out using the search engines of Yandex and Google API. The unstructured sources validated for compliance with the subject area and entered into the database. The search for parameters from sources performed using natural language text analysis. The idea of the analysis is that the values of the parameters of interest are located near the keywords or their synonyms, taking into account the invariants of the natural language. To find the connections between the parameter value and keywords, a neural network used to find connections between words in the text. Neural network used to find relationships between words in the text which helps to find the connections between keywords and the parameter value.

7-5

ФОРМУЛА ЭПИДЕМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВИЧ-ИНФЕКЦИИ

Е. И. Веселова¹, Э. В. Карамов^{1,2}, Ю. И. Простов³,
Д. А. Семёнова¹, А. С. Тургиев^{1,2}, Г. Д. Каминский¹¹Национальный медицинский исследовательский центр
фтизиопульмонологии и инфекционных заболеваний
Министерства здравоохранения РФ, Москва, Россия²Национальный исследовательский центр эпидемиологии
и микробиологии имени почетного академика Н. Ф. Гамалеи
Министерства здравоохранения РФ, Москва, Россия³Научно-исследовательский институт организации
здравоохранения и медицинского менеджмента
Департамента здравоохранения города Москвы,
Москва, Россия

E-mail: drveselovae@mail.ru

ВИЧ-инфекция в настоящий момент не имеет лечения, также нет вакцины для профилактики распространения указанной инфекции. В то же время имеются эффективные механизмы выявления заболевших и пожизненного лечения, что делает ВИЧ-инфекцию потенциально управляемой на организменном и популяционном уровне. Тем не менее, успехи по управлению заболеваемостью ВИЧ-инфекцией до сих пор незначительны, и эпидемия продолжается в мировом масштабе.

Дифференциальное уравнение распространения ВИЧ-инфекции в группе риска может быть описано формулой

$$Y' = R\alpha(1-Y)Y - \beta Y - \mu Y - p(t), \quad (1)$$

где Y – число инфицированных и неконтролируемых источников возбудителя инфекции; R – контактное число инфекции; α – интенсивность заражения; μ – интенсивность убыли источников возбудителя инфекции за счет естественного движения населения; β – интенсивность выздоровления: при ВИЧ-инфекции $\beta = 0$; $p(t)$ – функция управления – выявление и лечение с прекращением заразительности. Предполагается, что пациенты, которые выявлены и взяты на

лечение, удаляются из группы риска. При наличии управления численность группы риска уменьшается. Доконтактная профилактика может быть учтена путем введения поправочного коэффициента к R .

Положим функцию управления,

$$p(t) = \delta_1 Y + \delta_2, \quad (2)$$

δ_1 – элемент пропорционального управления, δ_2 – элемент непропорционального управления.

Обозначим

$$A = R^2 \alpha^2 - 2R(\mu + \beta + \delta_1 + 2\delta_2)\alpha + (\mu + \beta + \delta_1)^2. \quad (3)$$

Решением уравнения (1) является функция

$$Y = \frac{R\alpha + \text{th} \left(\frac{\sqrt{A}}{2} \left(\frac{2 \operatorname{arcth} \left(\frac{2R\alpha Y_0 - R\alpha + \beta + \mu + \delta_1}{\sqrt{A}} \right) + t}{\sqrt{A}} \right) \right)}{2R\alpha} \sqrt{A - \mu - \beta - \delta_1}, \quad (4)$$

где th и arcth – гиперболические функции; Y_0 – начальное значение пораженности.

Приравниваем Y к нулю и получаем время прерывания T , которое принимает действительные значения, если пересечение с осью абсцисс имеется (эффективное управление), и комплексные значения, если пересечение с осью абсцисс отсутствует (неэффективное управление)

$$T = - \frac{2 \left(\operatorname{arcth} \left(\frac{2Y_0 R\alpha - R\alpha + \beta + \delta_1 + \mu}{\sqrt{A}} \right) \right) + \operatorname{arcth} \left(\frac{R\alpha - \beta - \delta_1 - \mu}{\sqrt{A}} \right)}{\sqrt{A}}. \quad (5)$$

Закономерность фазового перехода от неэффективного к эффективному управлению задается формулой

$$\delta_2 = \frac{(R\alpha - \beta - \delta_1 - \mu)^2}{4R\alpha}. \quad (6)$$

Время достижения прерывания эпидемического процесса необходимо обязательно проверять по формуле (5), так как вблизи фазового перехода время прерывания значительно.

Коэффициенты δ_1 и δ_2 позволяют спланировать интервенционные кампании по выявлению и ликвидации ВИЧ-инфекции в территориальном и страновом масштабе, в группах риска и на территориях риска, причем в зависимости от их значения время от начала интервенции до ликвидации эпидемического процесса различно.

Наличие аналитической формулы позволяет рассчитывать на основании реальных кривых параметры (интенсивность) эпидемического процесса методом множественной логистической регрессии, а также «стоимость – эффективность» интервенционной кампании.

THE FORMULA OF THE EPIDEMIC PROCESS OF HIV INFECTION

E. I. Veselova¹, E. V. Karamov^{1,2}, Y. I. Prostov³,
D. A. Semenova¹, A. S. Turgiev^{1,2}, G. D. Kaminskiy¹

¹National Medical Research Center of Phthisiopulmonology and Infectious Diseases of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

²The National Research Center for Epidemiology and Microbiology named after Honorary Academician N. F. Gamaleya of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

³Research Institute for Healthcare and Medical Management of Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia

E-mail: drveselovae@mail.ru

Nowadays there is no cure for HIV infection, and there is also no vaccine to prevent the spread of this infection. At the same time, there are effective ways of new cases detection and lifelong treatment, which makes HIV infection potentially manageable at the organizational and population levels. However, progress in the managing the incidence of HIV infection is still insignificant, and the epidemic continues on a global scale.

The differential equation of the spread of HIV infection in the core group can be described by the formula

$$Y' = R\alpha(1-Y)Y - \beta Y - \mu Y - p(t), \quad (1)$$

where Y is the number of infected and uncontrolled sources of the causative agent of infection, R is the contact rate of infection, α is the intensity of infection, μ is the intensity of the loss of sources of the causative agent of infection due to the natural movement of the population, β is the intensity of recovery: in HIV infection $\beta = 0$, $p(t)$ is the control function which describes detection and treatment with the cessation of infection. Patients diagnosed with HIV and started treatment are supposed to be excluded from the core group. In the presence of control, the number of the core group members decreases. Pre-exposure prophylaxis can be taken into account by introducing correction factor to R .

Let's put the control function,

$$p(t) = \delta_1 Y + \delta_2, \quad (2)$$

δ_1 is an element of proportional control, δ_2 is an element of disproportionate control.

We denote

$$A = R^2 \alpha^2 - 2R(\mu + \beta + \delta_1 + 2\delta_2)\alpha + (\mu + \beta + \delta_1)^2. \quad (3)$$

The solution of equation (1) is the function

$$Y = \frac{R\alpha + \text{th} \left(\frac{\sqrt{A}}{2} \left(\frac{2 \operatorname{arcth} \left(\frac{2R\alpha Y_0 - R\alpha + \beta + \mu + \delta_1}{\sqrt{A}} \right) + t}{\sqrt{A}} \right) \right)}{2R\alpha} \sqrt{A - \mu - \beta - \delta_1}, \quad (4)$$

where th and arcth are hyperbolic functions, Y_0 is the initial value of prevalence.

We equate Y to zero and get the interruption time T , which takes real values if there is an intersection with the abscissa axis (effective control), and complex values if there is no intersection with the abscissa axis (inefficient control).

$$T = - \frac{2 \left(\operatorname{arcth} \left(\frac{2Y_0 R\alpha - R\alpha + \beta + \delta_1 + \mu}{\sqrt{A}} \right) \right) + \operatorname{arcth} \left(\frac{R\alpha - \beta - \delta_1 - \mu}{\sqrt{A}} \right)}{\sqrt{A}}. \quad (5)$$

The regularity of the phase transition from inefficient to effective control is given by the formula

$$\delta_2 = \frac{(R\alpha - \beta - \delta_1 - \mu)^2}{4R\alpha}. \quad (6)$$

The time of reaching the interruption of the epidemic process must be verified according to the formula (5), since the interruption time is significant near the phase transition.

The coefficients δ_1 and δ_2 make it possible to plan intervention campaigns for the detection and elimination of HIV infection on a territorial and state scale in risk groups and in risk territories and depending on their value, the time from the beginning of the intervention to the elimination of the epidemic process is different.

The analytical formula let us calculate the parameters (intensity) of the epidemic process using the multiple logistic regression as well as the “cost – effectiveness” of the intervention campaign.

7-6

КОНЦЕПЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКА ТЕМАТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В СЕТИ ИНТЕРНЕТ

В. В. Власов

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: v.v.vlasov@vniitf.ru

Информационный поиск является одной из важных задач в любом научном исследовании. Сегодня существуют различные информационные системы, которые позволяют по набору ключевых слов предоставлять исследователю рекомендации источников искомой информации. Конечное решение о релеванности предлагаемых источников информации принимает человек. Современные тенденции в области искусственного интеллекта ставят перед разработчиками методов поиска полезного контента создание полностью автоматизированных средств выбора из множества источников только тех, которые содержат значимую для исследователя информацию.

Первые информационные системы представляли собой электронные копии картотечных карт, по которым поиск выполнялся по точно сформулированному запросу. Современные системы предлагают результат поиска как статистическую рекомендацию в виде усреднения по группе похожих запросов, релеванность которых также оценивается некоторой группой пользователей [1]. Внешне такой статистический результат выглядит как имитация деятельности человека. Однако усреднение дает только иллюзию понимания истинных намерений человека и часто предлагаемые источники информации требуют дополнительного анализа для выбора наиболее значимых. Другие системы позволяют описать контекст поиска через систему онтологий, которая задает модель предметной области искомой информации [2]. Описание предметной

области в целом также не может отражать истинную модель намерений поиска информации исследователем. Задача состоит в разработке математической модели описания контекста поиска в текущем моменте, с целью построения алгоритма выбора и анализа только максимально релевантных источников информации. Такая модель позволила бы полностью автоматизировать процесс анализа больших объемов информации в «бесконечном» пространстве Интернет с целью поиска значимой информации. Например, при моделировании распространения быстропотекающих вирусных инфекций такой информацией является только та, которая содержит входные данные для модели.

В докладе предложена концепция построения модели для описания контекста поиска исследователя с целью построения алгоритмов автоматизированного поиска и анализа источников. Так как современные информационные системы поиска информации при формировании запросов оперируют ключевыми словами, как базовыми единицами описания искомого контекста, в предлагаемой концепции разрабатываемая модель опирается на применение неявных методов в контексте тех же единиц. Для уменьшения множества допустимых значений свободных параметров модели предлагается применить апостериорное знание из современных поисковых систем.

Литература

1. **Сегаран, Т.** Программируем коллективный разум [Текст]. – СПб : Символ-Плюс, 2008. – 368 с.
2. **Бова, В. В.** Компьютерная онтология: задачи и методология построения [Текст] / В. В. Бова, Д. Ю. Кравченко, Д. В. Лещанов, А. А. Новиков // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. – 2014. – № 4(19).

CONCEPT OF AUTOMATIC SEARCH OF SUBJECT INFORMATION IN THE INTERNET

V. V. Vlasov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: v.v.vlasov@vniitf.ru

Information retrieval is one of the important tasks in any scientific research. Today, there are various information systems that allow a set of keywords to provide the researcher with recommendations on the sources of the information he is looking for. The final decision on the relevance of the proposed sources of information is made by a person. Current trends in artificial intelligence challenge developers of methods for finding useful content to create fully automated selection tools from a variety of sources, only those that contain information relevant to the researcher.

The first information systems were electronic copies of the card index, which were searched for by a clearly formulated request. Modern systems offer a search result in the form of a statistical recommendation in the form of averaging over a group of similar queries, the relevance

of which is also assessed by a group of users [1]. Outwardly, such a statistical result looks like an imitation of human activity. However, averaging gives only the illusion of understanding the true intentions of a person and often offered sources of information require additional analysis to select the most significant ones. Other systems allow you to describe the search context through an ontology system that defines the domain model of the required information [2]. The description of the subject area as a whole also cannot reflect the model of information that the researcher needs. The task is to develop a mathematical model for describing the search context in order to build an algorithm for selecting and analyzing only the most relevant information sources. Such a model would make it possible to fully automate the process of analyzing large amounts of information in the “infinite” space of the Internet in order to search for meaningful information. For example, when simulating rapidly spreading viral infections, this information is only information that contains the input data for the model.

The report proposes a concept of building a model to describe the search context in order to build algorithms for automatic search and analysis of information sources. Since modern information retrieval systems, when forming queries, operate with keywords as basic units, in the proposed concept the developed model relies on the use of implicit methods using the same units. To reduce the set of admissible values of free parameters of the model, it is proposed to use a posteriori knowledge obtained from modern search engines.

References

1. **Segaran, T.** Programming Collective Intelligence [Text]. – O’Reilly, 2007.
2. **Bova, V. V.** Computational Ontology: Objectives and Methodology of Construction [Text] / V. V. Bova, D. V. Leshchanov, D. Yu. Kravchenko, A. A. Novikov // Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoye obrazovaniye. – 2014. – No. 4(19).

7-7

УЧЕТ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ В АГЕНТНОЙ МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ ЭПИДЕМИИ ВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИИ

А. М. Дерябин, А. А. Брагин, В. В. Власов,
О. В. Зацепин, А. Л. Карманов, С. Н. Лебедев,
Г. Н. Рыкованов, С. И. Самарин, А. В. Соколов,
Н. А. Соломин, Н. А. Теплых,
М. С. Ураков, К. Е. Хатунцев

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: o.v.zatsepin@vniitf.ru

В РФЯЦ – ВНИИТФ разработана агентная модель эпидемии вирусной инфекции в мегаполисе [1]. Для расширения модели с целью описания развития ситуации в масштабах региона или страны необхо-

димо корректно описывать потоки населения между городами. Учет потоков сказывается как на описании распространения инфекции, так и на описании статистических данных о количестве зарегистрированных случаев заболевания или смертности, которые используются для калибровки констант модели и построения прогноза. В настоящее время разработаны алгоритмы, позволяющие учитывать перемещение населения между городами, и построена модель сети городов для расчета распространения инфекции в мегаполисе и близлежащих регионах. Рассмотрены различные способы моделирования потоков жителей для описания маятниковой и сезонной миграции. Проведены расчеты развития ситуации с COVID-19 в Москве и Московской области. Полученные результаты согласуются со статистическими данными. Модифицированная модель позволила проанализировать сценарии распространения инфекции в зависимости от потоков населения между мегаполисом и городами-спутниками.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России: грант № 075-11-2020-011 (13.1902.21.0040)

Литература

1. **Адарченко, В. А.** Моделирование развития эпидемии коронавируса по дифференциальным и статистическим моделям [Текст] : препринт 264 / В. А. Адарченко, С. А. Бабань, А. А. Брагин, К. Ф. Гребёнкин, О. В. Зацепин, А. С. Козловских, В. В. Легоньков, Е. Н. Липилина, И. А. Литвиненко, П. А. Лобода, А. А. Овечкин, Г. Н. Рыкованов, С. И. Самарин, М. С. Ураков, А. Л. Фальков, К. Е. Хатунцев. – Снежинск : Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2020. – 28 с.

POPULATION TRANSFER IN AN AGENT-BASED VIRAL EPIDEMIC MODEL

A. M. Deryabin, A. A. Bragin, V. V. Vlasov,
O. V. Zatsepin, A. L. Karmanov, S. N. Lebedev,
G. N. Rykovanov, S. I. Samarin, A. V. Sokolov,
N. A. Solomin, N. A. Teplykh,
M. S. Urakov, K. E. Khatuntsev

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: o.v.zatsepin@vniitf.ru

RFNC – VNIITF developed an agent-based model of viral infection in a megalopolis [1]. In order to extend the model so as to describe how the situation develops within the region or country, it is necessary to make a proper account for population transfer. Accounting for population transfer influences both the description of infection transmission, and the description of statistical data on the registered incidence and death cases which are used to adjust model constants and do predictions. We developed algorithms which allow for population transfer between towns and constructed a model network of towns to simulate infection transmission in a megalopolis and its neighbor regions. Pendulum and seasonal migrations are considered. Calculations were done to predict the course of

COVID-19 in Moscow and Moscow Region. Their results agree with statistical data. The modified model helped analyze different scenarios of infection transmission with respect to population transfer between the megalopolis and its satellite towns.

The work was financially supported by Russian Ministry of Science and Education's Grant No 075-11-2020-011 (13.1902.21.0040)

References

1. **Adarchenko, V. A.** COVID-19 epidemic simulation with differential and statistical models [Text] : Preprint 264 / V. A. Adarchenko, V. A. Baban, A. A. Bragin, K. F. Grebyonkin, O. V. Zatsepin, A. S. Kozlovskikh, V. V. Legonkov, E. N. Lipilina, I. A. Litvinenko, P. A. Loboda, A. A. Ovechkin, G. N. Rykovanov, S. I. Samarin, M. S. Urakov, A. L. Falkov, and K. E. Khatuntsev. – Snezhinsk : RFNC – VNIITF Publishing Office, 2020. – 28 p.

7-8

АГЕНТНАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ ЭПИДЕМИИ COVID-19

О. В. Зацепин¹, А. А. Брагин¹, В. В. Власов¹,
А. М. Дерябин¹, Г. Д. Каминский², Э. В. Карамов^{2,3},
А. Л. Карманов¹, С. Н. Лебедев¹, Г. Н. Рыкованов¹,
С. И. Самарин¹, А. В. Соколов¹, Н. А. Соломин¹,
Н. А. Теплых¹, А. С. Тургиев^{2,3},
М. С. Ураков¹, К. Е. Хатунцев¹

¹Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия

²Национальный медицинский исследовательский центр фтизиопульмонологии и инфекционных заболеваний Министерства здравоохранения РФ, Москва, Россия

³Национальный исследовательский центр эпидемиологии и микробиологии имени почетного академика Н. Ф. Гамалеи Министерства здравоохранения РФ, Москва, Россия
E-mail: o.v.zatsepin@vniitf.ru

Вспыхнувшая в 2020 г. пандемия заболевания COVID-19, вызываемого коронавирусом нового типа SARS-CoV-2, поставила перед многими странами серьезные задачи, которые требовали оперативных, продуманных и обоснованных действий. Помимо необходимых и очевидных решений: закрытие сухопутных границ с зараженными странами, прекращение авиасообщения, мобилизация системы здравоохранения, одной из приоритетных задач стало прогнозирование развития ситуации и составление плана превентивных мероприятий с целью недопущения наиболее неблагоприятного сценария. Значительную роль в этом играют различные математические модели, которые используют накопленный массив данных как о прошедших эпидемиях, так и о текущей, чтобы предсказывать дальнейшее развитие эпидемиологической ситуации. В 2020 г. в РФЯЦ – ВНИИТФ были разработаны стохастическая агентная модель и модифицированная дифференциальная мо-

дель SEIRD, позволяющие описывать распространение вирусной инфекции в мегаполисе [1]. В дальнейшем с участием специалистов НИЦЭМ им. Н. Ф. Гамалеи и НМИЦ ФПИ развитие получила первая модель, описание которой приводится в докладе.

Агентная модель мегаполиса включает в себя алгоритмы генерации популяции и городской среды, алгоритмы описания динамики состояния агентов, сценарии посещения агентами общественных мест и инфицирования при эпидемически значимых контактах. Учитываются приток и отток населения в близлежащие регионы. В динамике состояния агентов отражаются процессы протекания болезни и изменения заразности, формирования и снижения уровня иммунитета, приобретенного в результате болезни или вакцинации. Модель позволяет учитывать регулирующие меры, вводимые для уменьшения негативных последствий эпидемии, и выделять наиболее значимые каналы распространения инфекции для выработки таких мер.

Проведено моделирование развития эпидемии COVID-19 в Москве с целью предсказания ее параметров. Определены длительность эпидемии, наличие последовательности пиков заболеваемости, максимальная нагрузка на систему здравоохранения. Модель продемонстрировала неплохие прогностические свойства. Проведенные расчеты позволили проанализировать сценарии развития ситуации в зависимости от ограничительных мер и действий медицинской системы. В частности, сделана оценка темпов вакцинации населения, необходимых для сдерживания или прекращения эпидемии.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России: грант № 075-11-2020-011 (13.1902.21.0040)

Литература

1. **Адарченко, В. А.** Моделирование развития эпидемии коронавируса по дифференциальным и статистическим моделям [Текст] : препринт 264 / В. А. Адарченко, С. А. Бабань, А. А. Брагин, К. Ф. Гребёнкин, О. В. Зацепин, А. С. Козловских, В. В. Легонок, Е. Н. Липилина, И. А. Литвиненко, П. А. Лобода, А. А. Овечкин, Г. Н. Рыкованов, С. И. Самарин, М. С. Ураков, А. Л. Фальков, К. Е. Хатунцев. – Снежинск : Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2020. – 28 с.

A COVID-19 AGENT-BASED MODEL

O. V. Zatsepin¹, A. A. Bragin¹, V. V. Vlasov¹,
A. M. Deryabin¹, G. D. Kaminsky², E. V. Karamov^{2,3},
A. L. Karmanov¹, S. N. Lebedev¹, G. N. Rykovanov¹,
S. I. Samarin¹, A. V. Sokolov¹, N. A. Solomin¹,
N. A. Teplykh¹, A. S. Turgyev^{2,3},
M. S. Urakov¹, K. E. Khatuntsev¹

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

²National Medical Research Center of Phthisiopulmonology and Infectious Diseases of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

³The National Research Center for Epidemiology and Microbiology named after Honorary Academician N. F. Gamaleya of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia
E-mail: o.v.zatsepin@vniitf.ru

The COVID-19 pandemic caused by a new coronavirus of type SARS-CoV-2 has become a challenge for many countries because to prevent its spread required prompt, reasoned and well-founded measures. Besides the clearly seen solutions such as contact restrictions and mobilization of public health services it was necessary to predict how the situation would develop and compile a plan of actions to prevent the worst scenario. Here a great role is played by mathematical models which provide their predictions using accumulated data on past and current epidemics. In 2020, RFNC – VNIITF developed a stochastic agent-based model and a modification to the SEIRD differential model which are capable of reproducing viral infection transmission in a megalopolis [1]. Later, in cooperation with experts from Gamaleya NEMRC and NPIDRC, we have come to a model we are presenting in this paper.

Our agent-based megalopolis model includes population and urban environment generation algorithms, and algorithms which describe agent state dynamics and scenarios of agent visits to public accommodation facilities and infection in epidemiologically significant contacts. Population transfer to/from the near regions is taken into account. Agent state dynamics reflex how the disease runs and transmissibility changes, and how immunity acquired after the disease or vaccination forms and degrades. Our model allows for interventions aimed at reducing the negative consequences of the epidemic, and identifies the most significant infection transmission channels for these interventions.

We have simulated the course of COVID-19 in Moscow to predict its parameters. We determined its duration, the presence of a sequence of peaks in the disease rate, and the maximum load to public health service. Our model demonstrated quite good prognostic properties. Calculated results helped analyze different scenarios with respect to the effect of interventions. In particular, we estimated the rate of vaccination at which the epidemic can be inhibited or stopped.

The work was financially supported by Russian Ministry of Science and Education's Grant No 075-11-2020-011 (13.1902.21.0040)

References

1. **Adarchenko, V. A.** COVID-19 epidemic simulation with differential and statistical models [Text] : Preprint 264 / V. A. Adarchenko, V. A. Baban, A. A. Bragin, K. F. Grebyonkin, O. V. Zatsepin, A. S. Kozlovskikh, V. V. Legonkov, E. N. Lipilina, I. A. Litvinenko, P. A. Loboda, A. A. Ovechkin, G. N. Rykovanov, S. I. Samarin, M. S. Urakov, A. L. Falkov, and K. E. Khatuntsev. – Snezhinsk : RFNC – VNIITF Publishing Office, 2020. – 28 p.

7-9

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА СИСТЕМЫ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ НА РАЗВИТИЕ ЭПИДЕМИИ

А. А. Звекков, А. В. Каленский, А. С. Зверев,
М. В. Ананьева, Е. С. Помесячная
Кемеровский государственный университет,
Кемерово, Россия

Система здравоохранения является важнейшим социальным институтом, ответственным за рост продолжительности жизни и снижение смертности населения. Недавний опыт коронавирусной эпидемии показывает следующие основные сценарии отклика системы здравоохранения на развивающуюся эпидемию: активное противодействие (открытие новых специализированных больниц и отделений в существующих, усиленные карантинные меры) и сохранение стандартного режима функционирования (борьба с эпидемией как с обычной, ничем не примечательной инфекцией). Цель работы: создание простейшей модели взаимодействия здравоохранения с развивающейся эпидемией с определением оптимальных для общества сценариев развития. Модель рассматривала развитие эпидемии как цепной реакции с инкубационным периодом. Пренебрегалось специализацией врачей. Предполагалось, что отклик заключается в переводе части врачей на борьбу с эпидемией и прекращение приема ими хронических больных с ростом их смертности. Выполнен цикл расчетов, показано, что существует три режима: 1. Недооценка опасности эпидемии (высокая смертность от распространяющейся инфекции); 2. Переоценка опасности эпидемии (повышенная смертность от хронических заболеваний); 3. Адекватный ответ (минимальная смертность). Проанализированы данные по смертности в Кемеровской области в 2020 г. Сделан вывод, что прирост смертности, связанный с коронавирусной инфекцией на порядок ниже, чем наблюдаемый. Таким образом, был реализован режим переоценки опасности эпидемии. Дальнейшее развитие модели с уточнением ее параметров необходимо для планирования адекватного отклика системы здравоохранения в будущих эпидемиях.

THE MODELING OF HEALTHCARE SYSTEM ON THE EPIDEMY PROPAGATION

A. A. Zvekov, A. V. Kalenskii, A. S. Zverev,
M. V. Anan'eva, E. S. Pomesyachnaya
Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

The healthcare system is the most important social institute responsible for the increasing in the life length and death rate decreasing. The experience of the coronavirus epidemic showed the following scenarios of the healthcare system response on the epidemic: active struggle (opening of specialized new hospitals and departments

in the existing ones, strong quarantine); the conservation of standard functioning mode (the epidemic is considered as a normal infection without extra ordinal danger). The aim of the work is development of a simple model describing health care system – epidemic interaction and elucidation of the optimal scenarios for the society. The model considers the epidemic as a branched chain reaction with an incubation period. We neglected the specialization of the medical workers. The response of the health-care system was described as redirection of a part of the medical workers to the struggling with the epidemic and ceasing taking care of the chronic patients accompanying with the increasing in their death rate. The calculations were performed. The three main scenarios were found. 1. Underestimation of the epidemic danger (high quantity of deaths due to the epidemic); 2. Overestimation of the epidemic danger (high quantity of deaths due to chronic diseases); and 3. Balanced response (minimal total deaths' quantity). The data on the death rate in Kemerovo region – Kuzbass in 2020 were analyzed. The death rate due to the coronavirus epidemic was an order of magnitude lower than the total increasing in the death rate. So the overestimation of the epidemic danger scenario took place. The following model development with its parameters estimation is essential for best planning of the health care system response in the future epidemics.

7-10

СИМУЛЯЦИЯ КЛОНОВОГО ВЗРЫВА В НЕПРЕРЫВНОЙ МОДЕЛИ ЭПИДЕМИЙ

Г. Д. Каминский

Национальный медицинский исследовательский центр
фтизиопульмонологии и инфекционных заболеваний
Министерства здравоохранения РФ, Москва, Россия
E-mail: gregkaminski.gk@gmail.com

Некоторые инфекционные заболевания не воспроизводятся в классической модели эпидемий: грипп А, дизентерия Зонне, стрептококковая инфекция (в том числе скарлатина) и другие. Наблюдение за эпидемией новой коронавирусной инфекцией COVID-19 показало, что подъемы заболеваемости летом 2021 года в Москве и Санкт-Петербурге также не могут быть описаны классической моделью. Общая черта указанных инфекций – закономерное возникновение и распространение новых клонов возбудителя, которое является существенным компонентом развития эпидемического процесса.

Динамика эпидемического процесса указанных инфекций описывается функцией прерывания $\psi(t)$ и возобновления $\varphi(t)$

$$\frac{dY}{dt} = \psi(t)R\alpha XY - \beta Y - \mu Y + \varphi(t), \quad (1)$$

где Y – доля инфицированных; X – доля восприимчивых; R – контактное число инфекции, α – интенсивность заражения; μ – интенсивность убыли источ-

ников возбудителя инфекции за счет естественного движения населения; β – интенсивность выздоровления; $\psi(t)$ – функция прерывания; $\varphi(t)$ – функция возобновления. Функция возобновления является случайной и имеет смысл цепочки молекулярных событий (мутаций, инсерций, рекомбинаций), заканчивающихся формированием «активно пассивирующего» клона, вызывающего массовую заболеваемость.

Модель со случайным компонентом (далее – случайная модель), качественно изменяющим поведение системы, имеет колоссальное значение для понимания механизма развития эпидемического процесса. Возобновление является принципиально случайным.

Отсутствие клона в течение определенного времени создает запас восприимчивости и его появление приводит к высокому подъему; серийные подъемы такого плана представляют собой автоколебания.

Мы обратили внимание на то, что вспышки в случайной модели возникают при совпадении высокой восприимчивости с событием генерации «активно пассивирующего» клона. В непрерывной модели это можно воспроизвести в виде нелинейности при определенных значениях восприимчивости. Развитие вспышки и последующее флотирование вокруг стационара можно воспроизвести «задержкой» в дифференциальном уравнении

$$\frac{dY}{dt} = e^{\frac{X_{cr}}{X(t-q)}} R\alpha XY - \beta Y - \mu Y, \quad (2)$$

где X_{cr} – значение восприимчивости, после которой возможен «клональный взрыв»; q – задержка, в течение которой клон циркулирует до элиминации. Причиной элиминации клонов являются случайные процессы в небольших популяциях (когда стационарное состояние соизмеримо с единичными случаями), истощение пролиферативного запаса (блокирование рецепторов адгезии дефектными микроорганизмами, образующимися при длительном течении инфекционного процесса), вытеснение текущего клона высокой волной последующего клона, для которого время потери иммунитета всегда меньше и возможны антигенные отличия.

Уравнение (2) воспроизводит автоколебания – серию следующих друг за другом эпидемических кривых. Особенности эпидемической кривой – крутой подъем, более пологий спуск, большая длительность «вспышки», что в целом соответствует образу «вспышки» в случайной модели.

SIMULATION OF A CLONE EXPLOSION IN A CONTINUOUS EPIDEMIC MODEL

G. D. Kaminskiy

National Medical Research Center of Phthiopulmonology and
Infectious Diseases of the Ministry of Health of the Russian
Federation, Moscow, Russia
E-mail: gregkaminski.gk@gmail.com

Some infectious diseases are not reproduced in the classical model of epidemics: influenza A, Sonne dysentery, streptococcal infection (including scarlet fever) and

others. Observation of the COVID-19 epidemic showed that the rise in the incidence of the new coronavirus infection in the summer of 2021 in Moscow and Saint-Petersburg also cannot be described by the classical model. A common feature of these infections is the regular appearance and spread of new clones of the pathogen, which is an essential component of the development of the epidemic process.

The dynamics of the epidemic process of these infections is described by the function of interruption $\psi(t)$ and resumption $\varphi(t)$

$$\frac{dY}{dt} = \psi(t)R\alpha XY - \beta Y - \mu Y + \varphi(t), \quad (1)$$

where Y is the proportion of infected, X is the proportion of susceptible, R is the contact rate of infection, α is the intensity of infection, μ is the intensity of the loss of the sources of the infectious agent due to the natural movement of the population, β is the intensity of recovery, $\psi(t)$ is the interruption function, $\varphi(t)$ is the resume function. The resume function is random and makes sense of a chain of molecular events (mutations, insertions, recombinations) that end with the formation of an “actively passing” clone that causes mass morbidity.

A model with a random component (further on, the random model) that qualitatively changes the behavior of the system is of great importance for understanding the mechanism of development of the epidemic process. The resumption is fundamentally random.

The absence of a clone for a certain time generates a reserve of susceptibility and its appearance leads to a high rise; serial rises of this plan are self-oscillations.

We noticed that outbreaks in a random model occur when a high susceptibility coincides with the generation event of an “actively passing” clone. In a continuous model, this can be reproduced in the form of non-linearity at certain values of susceptibility. The development of the outbreak and subsequent fluctuation around the stationary state can be reproduced by a “delay” in the differential equation

$$\frac{dY}{dt} = e^{X(t-q)} R\alpha XY - \beta Y - \mu Y, \quad (2)$$

where X_{cr} is the value of susceptibility, after which a “clonal explosion” is possible, q is the delay during which the clone circulates until elimination. The reason for the elimination of clones are random processes in small populations (when the stationary state is comparable to individual cases), the depletion of the proliferative reserve (blocking of adhesion receptors by defective microbes formed during a long course of the infectious process), the displacement by a high wave of the subsequent clone, for which the time of loss of immunity is always shorter and antigenic differences are possible.

The equation (2) reproduces self-oscillations – series of following epidemic curves. The features of the epidemic curve are a steep ascent, a more gentle descent, a longer duration of the outbreak, which generally corresponds to the image of the “outbreak” in a random model.

7-11

БУДУЩЕЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЭПИДЕМИОЛОГИИ: ВЗГЛЯД ВРАЧА

Г. Д. Каминский

Национальный медицинский исследовательский центр
фтизиопульмонологии и инфекционных заболеваний
Министерства здравоохранения РФ, Москва, Россия

E-mail: gregkaminski.gk@gmail.com

Классическая теория эпидемий предполагает колебания вокруг состояния равновесия, которые со временем затухают. Причиной сохранения колебаний являются сезонные изменения активности механизма передачи, «нелинейная встречаемость» («открытие» дополнительных механизмов передачи при росте заболеваемости), стохастические возмущения. Данная теория не «поддерживает» возможности появления и исчезновения новых разновидностей возбудителей инфекционных заболеваний – неравновесный процесс, к которому сейчас приковано внимание в связи с появлением «индийского» штамма коронавируса. Все это определило необходимость создания новой теории.

Теория предполагает введение функции прерывания $\psi(t)$ и возобновления $\varphi(t)$

$$\frac{dY}{dt} = \psi(t)R\alpha XY - \beta Y - \mu Y + \varphi(t), \quad (1)$$

где Y – доля инфицированных; X – доля восприимчивых; R – контактное число инфекции; α – интенсивность заражения; μ – интенсивность убыли источников возбудителя инфекции за счет естественного движения населения; β – интенсивность выздоровления.

В силу разных причин траектория эпидемической системы проходит через состояние, обозначаемое как «отдельные случаи». При этом контактное число $R(t)$ необходимо умножается на функцию прерывания $\psi(t)$, такую что

$$\psi(t) = \theta(Y(t) - Y_{cr}), \quad (2)$$

где θ – функция Хевисайда. Таким образом, функция $\psi(t)$ представляет собой переключатель, который равен 0 если $Y(t)$ меньше Y_{cr} и 1 если $Y(t)$ больше Y_{cr} . Величина Y_{cr} подбирается с учетом численности популяции, ее территориального распределения, размаха случайных колебаний, других факторов.

Современные эпидемически значимые микроорганизмы имеют резервуар возобновления (как альтернативу прерыванию), который заключается в персистенции (в том числе со встраиванием в геном хозяина), бессимптомной колонизации (носительство на слизистых без формирования выраженного иммунного ответа) и сохранения во внешней среде (в том числе в виде покоящихся форм).

Функция возобновления $\varphi(t)$ характеризует возобновление циркуляции старых и появление новых клональных линий с использованием резервуара инфекции.

Функция возобновления $\varphi(t)$ является случайной на компактном носителе, такой что

$$\varphi(t) = a \int_{-\infty}^{+\infty} f(s)k(t-s)ds. \quad (3)$$

Случайная функция $f(s)$ принимает значение 0 или 1. Эта функция имеет не более, чем счетный носитель и не более, чем конечный носитель, на любом компактном множестве.

Математическое ожидание числа точек t , на любом отрезке $[a, b]$ равно $(b-a)*p$, где p – плотность возобновляющих молекулярных событий (среднее число событий за единицу времени); $k(t)$ – ядро сглаживания. Для осуществления сглаживания применяется свертка

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(s)k(t-s)ds.$$

Величина a представляет собой интенсивность возобновляющих молекулярных событий.

Решением уравнения (1) является автономный автоколебательный процесс с чередованием участков «клоновых взрывов» с участками флотирования вдоль стационарного состояния.

NOVEL MATHEMATICAL EPIDEMIOLOGY FROM PERSPECTIVE OF INTERNIST

G. D. Kaminskiy

National Medical Research Center of Phthisiopulmonology and Infectious Diseases of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

E-mail: gregkaminski.gk@gmail.com

The classical theory of epidemics assumes fluctuations around the state of equilibrium, which fade over time. The reason for maintaining fluctuations are seasonal changes in the activity of the transmission mechanism, “nonlinear incidence” (the “discovery” of additional transmission mechanisms with incidence increase), stochastic disturbances. This theory does not support the possibility of the appearance and disappearance of new varieties of infectious agents that is non-equilibrium process, which is now in the focus of attention due to the appearance of Indian strain of COVID-19. That is why it is necessary to create a new theory.

The theory assumes the introduction of the function of interruption $\psi(t)$ and renewal $\varphi(t)$

$$\frac{dY}{dt} = \psi(t)R\alpha XY - \beta Y - \mu Y + \varphi(t), \quad (1)$$

Y is the proportion of infected, X is the proportion of susceptible, R is the contact rate of the infection, α is the intensity of the infection, μ is the intensity of the loss of sources of the infectious agents due to the natural movement of the population, β is the intensity of recovery.

Because of different reasons, the trajectory of the epidemic system passes through a state denoted as “individual cases”. In this case, the contact rate $R(t)$ must be multiplied by the interrupt function $\psi(t)$, such that

$$\psi(t) = \theta(Y(t) - Y_{cr}), \quad (2)$$

θ is the Heaviside function. Thus, the function $\psi(t)$ is a switch that is equal to 0 if $Y(t)$ is less than Y_{cr} and 1 if $Y(t)$ is greater than Y_{cr} . The value Y_{cr} is selected taking into account the population size, its territorial distribution, scope of random fluctuations and other factors.

Modern epidemically relevant microorganisms have a renewal reservoir (as an alternative to interruption) based on persistence (including integration into the host genome), asymptomatic colonization (living on mucous membranes without the formation of a pronounced immune response) and contamination of the external environment (including different forms that remain in rest).

The renewal function $\varphi(t)$ characterizes the renewal of the circulation of old and the appearance of new clonal lines using the infection reservoir.

The renewal function $\varphi(t)$ is random on a compact carrier, such that

$$\varphi(t) = a \int_{-\infty}^{+\infty} f(s)k(t-s)ds. \quad (3)$$

The random function $f(s)$ takes the value 0 or 1. This function has at most a countable medium and at most a finite medium on any compact set. The mathematical expectation of the number of points t , on any segment $[a, b]$ is equal to $(b-a)*p$, where p is the density of renewing molecular events (the average number of events per unit of time), $k(t)$ is the germ of smoothing. Convolution is used to perform smoothing

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(s)k(t-s)ds.$$

The value a represents the intensity of the renewing molecular events.

The solution to equation (1) is an autonomous self-oscillating process with alternating sections of “clone explosions” with sections of floating along the stationary state.

7-12

УПРАВЛЕНИЕ ЭПИДЕМИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ВИЧ-ИНФЕКЦИИ

Г. Д. Каминский¹, Е. И. Веселова¹, Э. В. Карамов^{1,2}, Ю. И. Простов³, А. С. Тургиев^{1,2}, Д. А. Семёнова¹

¹Национальный медицинский исследовательский центр фтизиопульмонологии и инфекционных заболеваний Министерства здравоохранения РФ, Москва, Россия

²Национальный исследовательский центр эпидемиологии и микробиологии имени почетного академика Н. Ф. Гамалеи Министерства здравоохранения РФ, Москва, Россия

³Научно-исследовательский институт организации здравоохранения и медицинского менеджмента Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

E-mail: gregkaminski.gk@gmail.com

В физических и технических системах имеется четкое понимание управления, причем эффективное управление – это всегда достижение целевого значения, получение результата. В эпидемиологических системах возникают сложности в понимании этого вопроса. Рассмотрим варианты управления эпидеми-

ческим процессом ВИЧ-инфекции в зависимости от уровня управляющих воздействий δ_1 и δ_2 , характеризующих интенсивность выявления и лечения больных с прекращением их заразности.

Дифференциальное уравнение распространения ВИЧ-инфекции и управления описывается формулой

$$Y' = R\alpha(1-Y)Y - \beta Y - \mu Y - \delta_1 Y - \delta_2,$$

где Y – число инфицированных и неконтролируемых источников возбудителя инфекции; R – контактное число инфекции; α – интенсивность заражения; μ – интенсивность убыли источников возбудителя инфекции за счет естественного движения населения; β – интенсивность выздоровления; δ_1 – элемент пропорционального управления; δ_2 – элемент непропорционального управления.

Рассмотрим значения функции решения

$$Y = \frac{R\alpha + \text{th} \left(\frac{\sqrt{A}}{2} \left(\frac{2 \operatorname{arctch} \left(\frac{2R\alpha Y_0 - R\alpha + \beta + \mu + \delta_1}{\sqrt{A}} \right) + t}{\sqrt{A}} \right) \right)}{2R\alpha},$$

где th и arctch – гиперболические функции; Y_0 – начальное значение пораженности; A определяется формулой

$$A = R^2\alpha^2 - 2R(\mu + \beta + \delta_1 + 2\delta_2)\alpha + (\mu + \beta + \delta_1)^2.$$

Базовые параметры ВИЧ-инфекции составляют: $\mu = 0,0005$; $R = 2,4$; $\alpha = 0,001$; $\beta = 0$; $Y_0 = 0,58$.

Вариант 1 «спонтанное развитие эпидемии» $\delta_1 = 0$; $\delta_2 = 0$. При указанных параметрах значение A составляет $3,61 \cdot 10^{-6}$. Решение представляет собой возрастающую функцию с насыщением – эпидемическую кривую ВИЧ-инфекции:

$$Y = 0,3958333333 + 0,3958333333 \text{th} \times \\ \times (0,5040076965 + 0,00095t).$$

Вариант 2 «неэффективное управление с ростом заболеваемости» $\delta_1 = 0,0001$; $\delta_2 = 0,000003$. При указанных параметрах значение A составляет $3,21 \cdot 10^{-6}$. Решение представляет собой возрастающую функцию с насыщением на несколько более низком, чем при отсутствии воздействия уровне.

$$Y = 0,3749999999 + 0,3733296131 \text{th} \times \\ \times (0,6171099655 + 0,00090t).$$

Вариант 3 «неэффективное управление со снижением заболеваемости» $\delta_1 = 0,0005$; $\delta_2 = 0,00005$. При указанных параметрах значение A составляет $1,48 \cdot 10^{-6}$. Решение представляет собой убывающую функцию с комплексным носителем, которая выходит на более низкие значения

$$Y = 0,2916666666 + 0,2534484387 \text{th} \times \\ \times (1,371404686 - 1,5707963271 + 0,0006082762530t).$$

Вариант 4 «эффективное управление с ликвидацией заболеваемости» $\delta_1 = 0,001$; $\delta_2 = 0,0003$. При указанных параметрах значение A составляет $-2,07 \cdot 10^{-6}$. Решение представляет собой кривую управления – убывающую функцию с пересечением оси X (и выходом на нулевые значения).

$$Y = 0,1875000000 - 0,2997394702 \text{tg} \times \\ \times (-0,9186052855 + 0,0007193747285t).$$

Значение A в данном варианте – отрицательное число, а \sqrt{A} – комплексное число. Несмотря на то, что \sqrt{A} может являться комплексным числом; Y – вещественная функция. При указанных параметрах управления достижение прерывания эпидемического процесса осуществляется за 2054 дня.

В отсутствии управления заболеваемость неумолимо растет, достигая насыщения на очень высоком уровне (вариант 1). Определено как минимум два варианта неэффективного управления (2 и 3). При достижении требуемых уровней воздействия осуществляется фазовый переход к ликвидации заболеваемости (вариант 4). Значение начально выявляемых и ограничиваемых источников возбудителя инфекции в день при указанных коэффициентах эффективного управления составляет 0,00088 (0,15% в день).

Только здесь происходит истинная окупаемость затрат за счет профилактики новых заражений и необходимости лечения новых возникающих больных.

CONTROL OF THE EPIDEMIC PROCESS OF HIV INFECTION

G. D. Kaminskiy¹, E. I. Veselova¹, E. V. Karamov^{1,2},
Y. I. Prostvov³, A. S. Turgiev^{1,2}, D. A. Semyonova¹

¹National Medical Research Center of Phthiisopulmonology and Infectious Diseases of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

²The National Research Center for Epidemiology and Microbiology named after Honorary Academician N. F. Gamaleya of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

³Research Institute for Healthcare and Medical Management of Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia

E-mail: gregkaminski.gk@gmail.com

In physical and technical systems, there is a clear understanding of management, and effective management is always the achievement of a target value, obtaining a result. In epidemiological systems, there are difficulties in understanding this issue. Let's consider the options for managing the epidemic process of HIV infection, depending on the level of control measures δ_1 and δ_2 , which characterize the intensity of detection and treatment of patients with the cessation of their contagiousness.

The differential equation of the spread of HIV infection and its control can be described by the formula

$$Y' = R\alpha(1-Y)Y - \beta Y - \mu Y - \delta_1 Y - \delta_2,$$

where Y is the number of infected and uncontrolled sources of the causative agent of infection, R is the contact rate of infection, α is the intensity of infection, μ is the intensity of the loss of sources of the causative agent of infection due to the natural movement of the population, β is the intensity of recovery, δ_1 is the element of proportional control, δ_2 is the element of disproportionate control.

Let's consider the values of the solution function

$$Y = \frac{R\alpha + \text{th} \left(\frac{\sqrt{A}}{2} \left(\frac{2R\alpha Y_0 - R\alpha + \beta + \mu + \delta_1}{\sqrt{A}} \right) + t \right)}{2R\alpha} \sqrt{A} - \mu - \beta - \delta_1$$

where th and arcth are hyperbolic functions, Y_0 is the initial value of prevalence, A is defined by the formula

$$A = R^2\alpha^2 - 2R(\mu + \beta + \delta_1 + 2\delta_2)\alpha + (\mu + \beta + \delta_1)^2.$$

The basic parameters of HIV infection are:

$$\mu = 0.0005; R = 2.4; \alpha = 0.001; \beta = 0; Y_0 = 0.58.$$

Option 1 “spontaneous development of the epidemic” $\delta_1 = 0; \delta_2 = 0$. With the specified parameters, the value of A is $3.61 \cdot 10^{-6}$. The solution is an increasing function with saturation (the epidemic curve of HIV infection):

$$Y = 0.3958333333 + 0.3958333333t \times (0.5040076965 + 0.00095t).$$

Option 2 “inefficient management with an increase in morbidity” $\delta_1 = 0.0001; \delta_2 = 0.000003$. With the specified parameters, the value of A is $3.21 \cdot 10^{-6}$. The solution is an increasing function with saturation at a slightly lower level than when the effect is removed.

$$Y = 0.3749999999 + 0.3733296131t \times (0.6171099655 + 0.00090t).$$

Option 3 “inefficient management with reduced morbidity” $\delta_1 = 0.0005; \delta_2 = 0.00005$. With the specified parameters, the value of A is $1.48 \cdot 10^{-6}$. The solution is a decreasing function with a complex carrier, which goes to lower values

$$Y = 0,2916666666 + 0,2534484387t \times (1,371404686 - 1,5707963271 + 0,0006082762530t).$$

Option 4 “effective management with the elimination of morbidity” $\delta_1 = 0.001; \delta_2 = 0.0003$. With the specified parameters, the value of A is $-2,07 \cdot 10^{-6}$. The solution is a control curve: a decreasing function with the intersection of the X axis (and the output to zero values).

$$Y = 0,1875000000 - 0,2997394702t \times (-0,9186052855 + 0,0007193747285t).$$

The value of A in this case is a negative number, and \sqrt{A} is a complex number. Despite the fact that \sqrt{A} can be a complex number, Y is a real function. With the specified control parameters, the interruption of the epidemic process is achieved in 2054 days.

In the absence of control, the incidence is inevitably increasing, reaching saturation at a very high level (option 1). At least two variants of inefficient management have been identified (2 and 3). When the required levels of exposure are reached, a phase transition to the elimination of morbidity is carried out (option 4). The value of the initially detected and limited sources of the infectious agent per day with the specified effective management coefficients is 0.00088 (0.15% per day).

Only here there is a true cost recovery due to the prevention of new infections and the need to treat new emerging patients.

НЕКОТОРЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭКОЛОГИИ ЧЕЛОВЕКА

Ф. Х. Каримов

Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН Таджикистана, Душанбе, Таджикистан

К настоящему времени достаточно хорошо известно, что геофизические поля и солнечное излучение влияют на физиологическое состояние человека, животных и растений. Например, замечено влияние солнечной активности на возникновение эпидемий и пандемий ряда опасных для здоровья людей заболеваний – оспы, холеры, чумы, гриппа и др. А. Л. Чижевский проанализировал большой исторический материал и обнаружил корреляцию максимумов солнечной активности и массовых катаклизмов на Земле, например влияние 11-летнего цикла солнечной активности (периодического увеличения и уменьшения количества пятен на Солнце) на климатические процессы на Земле: в период повышенной солнечной активности (большого количества вспышек на Солнце) на Земле происходят различные стихийные бедствия, катастрофы, эпидемии, увеличивается интенсивность роста бактерий. Согласно этим данным большинство эпидемий приходится на период, предшествующий максимуму солнечной активности – за 2–3 года до него, а часть эпидемий приходится на начальный период спада солнечной активности. Т. е. в среднем крупные эпидемии приходятся на максимум солнечной активности. Случаи последних эпидемий и пандемий, произошедших с 1981 г. до настоящего времени, противоречат этим результатам. Пандемия, продолжающаяся в настоящее время, возникла во время минимума солнечной активности – в декабре 2019/2020 г. – и от предшествующей пандемии «птичьего» гриппа 2008–2009 гг. ее отделяет 11-летний период. Это дает основание заключить, что и максимальная, и минимальная солнечные активности создают условия для роста и развития вирусов, с одной стороны, и для снижения защитных сил растений, животных и населения, с другой. Иначе говоря, экстремальные солнечные активности создают стрессовые условия для физиологического состояния растений, животных и людей – вредны как большая, так и низкая солнечные активности, снижающие их иммунитет, с одной стороны, и активизируя вирусы – с другой.

Для получения точных данных о корреляции между эпидемиями и пандемиями с солнечной активностью и принятия адекватных мер по защите населения необходимо проводить более детальные исследования действия всего спектра солнечного излучения на биологические организмы на генетическом уровне.

SOME GEOPHYSICAL ASPECTS OF HUMAN ECOLOGY

F. H. Karimov

Institute of Geology, Earthquake Engineering and Seismology
National Academy of Sciences of Tajikistan,
Dushanbe, Tajikistan

By now, it is well known that geophysical fields and solar radiation affect the physiological state of humans, animals and plants. For example, the influence of solar activity on the occurrence of epidemics and pandemics of a number of diseases dangerous to human health, such as smallpox, cholera, plague, influenza, and others, has been noticed. A. L. Chizhevsky analyzed a large amount of historical material and found a correlation between the maxima of solar activity and mass cataclysms on Earth, for example, the effect of an 11-year cycle of solar activity (periodic increase and decrease in the number of sunspots on the Sun) on climatic processes on Earth: during a period of increased solar activity (a large number of flares on the Sun) on the Earth there are various natural disasters, catastrophes, epidemics, the intensity of bacterial growth is increasing. According to these data, most epidemics occur in the period preceding the maximum solar activity 2–3 years before it, and part of the epidemics falls on the initial period of decline in solar activity. On average the large epidemics occur at maximum solar activity. The incidents of recent epidemics and pandemics from 1981 to the present contradict these results. The pandemic, which is currently ongoing, arose during the minimum solar activity, in December 2019/2020, and from the previous avian influenza pandemic of 2008–2009 it is separated by an 11-year period. This allows us to conclude that both the maximum and minimum solar activities create conditions for the growth and development of viruses, on the one hand, and for reducing the immunity of plants, animals and the population, on the other one. In other words, extreme solar activities create stressful conditions for the physiological state of plants, animals and people, both high and low solar activities are harmful, reducing their immunity, on the one hand, and activating viruses, on the other.

To obtain accurate data on the correlation between epidemics and pandemics with solar activity and to take adequate measures to protect the population, it is necessary to conduct more detailed studies of the effect of the entire spectrum of solar radiation on biological organisms at the genetic level.

7-14

ПЛАТФОРМА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ СБОРА ИНФОРМАЦИИ ИЗ ОТКРЫТЫХ ИСТОЧНИКОВ

А. Л. Карманов, В. В. Власов,
Н. А. Теплых, В. Н. Первиненко

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: v.v.vlasov@vniitf.ru

Современные технологии обеспечивают высокую скорость и доступность каналов обмена и распространения информации во всех областях деятельности человека. Это ведет к росту интенсивности открытого информационного обмена. Активно развиваются платформы и сообщества обмена научными рукописями и публикациями, мессенджеры, социальные сети, новостные ленты, тематические сайты и т. п., которые являются де-факто основными способами общения между различными социальными группами. Объем подобной информации стремительно растет, а ее структура становится разнообразнее. В тоже время эта информация является чрезвычайно полезной для принятия различных решений как на уровне коммерческих компаний, так и на уровне государственных органов. Это обусловило появление различных автоматизированных систем, позволяющих извлекать, преобразовывать, хранить и оперативно предоставлять аналитическую поддержку при принятии решений. Простейшими из таких систем являются всем известные поисковые сервисы Яндекс и Google.

В рамках исследований по разработке математической модели распространения быстропотекающих вирусных инфекций возникает необходимость анализа большого количества источников информации на предмет извлечения из них данных для модели. В докладе представлена ИТ-инфраструктура на базе пакетов программ с открытыми исходными кодами для автоматизации процессов сбора, мониторинга, обработки и визуализации данных, полученных из открытой сети Интернет.

PLATFORM FOR AUTOMATION OF COLLECTION OF INFORMATION FROM OPEN SOURCES

A. L. Karmanov, V. V. Vlasov,
N. A. Teplykh, V. N. Pervinenko

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: v.v.vlasov@vniitf.ru

Modern technologies ensure high speed and availability of channels for the exchange and dissemination of information in all areas of human life. This leads to an increase in the intensity of open exchange of information. Platforms and communities for the exchange of scientific manuscripts and publications, messengers, social networks, news feeds, thematic sites, etc. are actively developing, which are de facto the main ways of communication between various social groups. The volume of such information is growing rapidly, and its structure is becoming more and more diverse. At the same time, this information is extremely useful for making various decisions both at the level of commercial companies and at the level of government agencies. This has led to the emergence of various automated systems that allow you to extract, transform, store and quickly provide analytical support for decision making. The simplest of these systems are the well-known search services Yandex and Google.

In the framework of research on the development of a model for the spread of viral infections, it becomes necessary to analyze a large number of information sources in order to extract data from them for the model. The report presents an IT infrastructure based on open source software packages to automate the collection, monitoring, processing and visualization of data obtained from the Internet.

7-15

ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ В ОБРАТНЫХ ЗАДАЧАХ ЭПИДЕМИОЛОГИИ (ОБЗОР)

А. Б. Коновалов, В. В. Власов

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: a_konov@mail.vega-int.ru

Сделан обзор оптимизационных методов решения обратных задач эпидемиологии. Как известно [1], в эпидемиологии обратные задачи формулируются с целью уточнения параметров математических моделей распространения опасных инфекционных заболеваний. Рассмотрены как глобальные (стохастические [2, 3], методы покрытий [4, 5]), так и локальные (нулевого порядка [6], градиентные [7]) оптимизационные методы. Глобальные методы обычно используются для поиска окрестностей локальных и глобального минимумов целевого функционала, а локальные – для уточнения минимумов в уже найденных окрестностях. Приведены примеры эффективного применения оптимизационных методов для случая детерминистических моделей распространения инфекций, описываемых системами нелинейных дифференциальных уравнений. Первый пример относится к моделированию развития эпидемии туберкулеза в Сибири в начале 21 века [3, 8], а второй – к моделированию распространения коронавируса COVID-19 в Москве в первой половине 2020 года [9]. Во второй части доклада авторы уделяют внимание вопросу переложения рассмотренного оптимизационного подхода к уточнению параметров на случай разрабатываемой в РФЯЦ – ВНИИТФ статистической агентной модели, основанной на методе Монте-Карло [10]. Сформулированы проблемы реализации оптимизационных методов в ситуации, когда оператор эволюции не может быть задан явно. Намечены направления дальнейших исследований с целью решения обозначенных проблем.

Литература

1. **Кабанихин, С. И.** Оптимизационные методы решения обратных задач иммунологии и эпидемиологии [Текст] / С. И. Кабанихин, О. В. Криворотко // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 2020. – Т. 60, № 4. – С. 590–600.
2. **Banks, H. T.** A numerical algorithm for constructing an in-

dividual mathematical model of HIV dynamics at cellular level [Text] / H. T. Banks, S. I. Kabanikhin, O. I. Krivorotko, D. V. Yermolenko // J. Inverse Ill-Posed Probl. – 2018. – Vol. 26, No. 6. – P. 859–873.

3. **Kabanikhin, S. I.** A combined numerical algorithm for reconstructing the mathematical model for tuberculosis transmission with control programs [Text] / S. I. Kabanikhin, O. I. Krivorotko, V. N. Kashtanova // J. Inverse Ill-Posed Probl. – 2018. – Vol. 26, No. 1. – P. 121–131.

4. **Евтушенко, Ю. Г.** Численный метод поиска глобального экстремума функций (перебор на неравномерной сетке) [Текст] // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 1971. – Т. 11, № 6. – С. 1390–1403.

5. **Oseledets, I. V.** Breaking the curse of dimensionality, or how to use SVD in many dimensions [Text] / I. V. Oseledets, E. E. Tyrtshnikov // SIAM J. Sci. Comput. – 2009. – Vol. 31. – P. 3744–3759.

6. **Трифонов, А. Г.** Постановка задачи оптимизации и численные методы ее решения [Текст]. – М.: Дело, 2003.

7. **Гасников, А. В.** Современные численные методы оптимизации. Метод универсального градиентного спуска [Текст]. – М.: Изд-во МФТИ, 2018.

8. **Авиллов, К. К.** Математические модели распространения и контроля туберкулеза [Текст] / К. К. Авиллов, А. А. Романюха // Математическая биология и биоинформатика. – 2007. – Т. 2, № 2. – С. 188–318.

9. **Криворотко, О. В.** Математическое моделирование и прогнозирование COVID-19 в Москве и Новосибирской области [Текст] / О. В. Криворотко, С. И. Кабанихин, Н. Ю. Зятков, А. Ю. Приходько, Н. М. Прохошин, М. А. Шишленин // Сиб. журн. вычисл. математики. – 2020. – Т. 23, № 4. – С. 395–414.

10. **Адарченко, В. А.** Моделирование развития эпидемии коронавируса по дифференциальной и статистической моделям [Текст] / В. А. Адарченко, С. А. Бабань, А. А. Брагин и др. // Препринт № 264. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2020.

OPTIMIZATION METHODS FOR INVERSE PROBLEMS IN EPIDEMIOLOGY (REVIEW)

A. B. Kononov, V. V. Vlasov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

E-mail: a_konov@mail.vega-int.ru

The paper overviews optimization methods used for solving the inverse problems in epidemiology. It is known [1] that in epidemiology the inverse problems are formulated with the aim to adjust parameters of mathematical models describing the spread of severe infectious diseases. The review includes both global (stochastic [2, 3], coverage [4, 5]) and local (zero order [6], gradient [7]) optimization methods. The global ones are usually used for seeking the neighborhoods of the local and global minima in the target functional, and the local ones are used to determine minima within the found neighborhoods. We provide examples demonstrating the effective use of the optimization methods for deterministic infection trans-

mission models described by systems of nonlinear differential equations. The first of them deals with tuberculosis transmission in Siberia at the beginning of the century 21 [3, 8], and the second does with the COVID-19 situation in Moscow in the first half of 2020 [9]. We consider the issue of rendering the optimization approach so as to make it applicable to the Monte Carlo agent-based model being developed at RFNC – VNIITF [10], and formulate problems in the implementation of the optimization methods in case where the evolution operator cannot be defined explicitly. The areas of further research to solve these problems are outlined.

References

1. **Kabanikhin, S. I.** Optimization methods for solving inverse immunology and epidemiology problems [Text] / S. I. Kabanikhin, O. I. Krivorotko // *Comput. Math. Math. Phys.* – 2020. – Vol. 60, No. 4. – P. 580–589.
2. **Banks, H. T.** A numerical algorithm for constructing an individual mathematical model of HIV dynamics at cellular level [Text] / H. T. Banks, S. I. Kabanikhin, O. I. Krivorotko, D. V. Yermolenko // *J. Inverse Ill-Posed Probl.* – 2018. – Vol. 26, No. 6. – P. 859–873.
3. **Kabanikhin, S. I.** A combined numerical algorithm for reconstructing the mathematical model for tuberculosis transmission with control programs [Text] / S. I. Kabanikhin, O. I. Krivorotko, V. N. Kashtanova // *J. Inverse Ill-Posed Probl.* – 2018. – Vol. 26, No. 1. – P. 121–131.
4. **Evtushenko, Yu. G.** A numerical method of search for the global extremum of functions (scan on a nonuniform net) [Text] // *U.S.S.R. Comput. Math. Math. Phys.* – 1971. – Vol. 11, No. 6. – C. 38–54.
5. **Oseledets, I. V.** Breaking the curse of dimensionality, or how to use SVD in many dimensions [Text] / I. V. Oseledets, E. E. Tyrtyshnikov // *SIAM J. Sci. Comput.* – 2009. – Vol. 31. – P. 3744–3759.
6. **Trifonov, A. G.** Statement of the optimization problem and numerical methods for its solution [Text]. – M : Delo, 2003 (in Russian).
7. **Gasnikov, A. V.** Modern numerical optimization methods. Universal gradient descent method [Text]. – M : MIPT, 2018 (in Russian).
8. **Avilov, K. K.** Mathematical models of tuberculosis extension and control of it [Text] / K. K. Avilov, A. A. Romanyukha // *Matematicheskaya biologiya i bioinformatika.* – 2007. – Vol. 2, No. 2. – P. 188–318 (in Russian).
9. **Krivorot'ko, O. I.** Mathematical modeling and forecasting of COVID-19 in Moscow and Novosibirsk region [Text] / O. I. Krivorot'ko, S. I. Kabanikhin, N. Yu. Zyat'kov, A. Yu. Prikhod'ko, N. M. Prokoshin, M. A. Shishlenin // *Numer. Analys. Appl.* – 2020. – Vol. 13, No. 4. – P. 332–348.
10. **Adarchenko, V. A.** Modeling the development of the coronavirus epidemic using differential and statistical models [Text] / V. A. Adarchenko, S. A. Baban, A. A. Bragin et al. // *Preprint No. 264.* – Snezhinsk : RFNC – VNIITF, 2020 (in Russian).

7-16

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ИЗУЧЕНИЮ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПАНДЕМИИ КОВИД-19

С. П. Левашкин, О. И. Захарова

Научно-исследовательская лаборатория искусственного интеллекта, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия

E-mail: ai_lab@psuti.ru

Представлен системный подход к изучению новых многопараметрических моделей распространения пандемии COVID-19, конечной целью которого является оптимизация управляющих параметров моделей. Подход состоит из двух основных частей: 1) адаптивно-компарментных моделей распространения эпидемии, которые являются обобщением классической модели SEIR; и 2) модуля для автоматизированной настройки параметров моделей на основе данных об эпидемии с использованием интеллектуальных методов оптимизации. Данные для тестирования моделей распространения пандемии в регионах Российской Федерации и по всему миру собираются ежедневно из открытых источников, начиная с марта 2020 года. Для этого так называемая «ферма данных» была разработана и внедрена на локальном сервере (автоматизированная система сбора, хранения и предварительной обработки данных из разнородных источников, которая в сочетании с методами оптимизации позволяет наиболее точно настроить параметры моделей, превращая их в интеллектуальные системы для поддержки принятия управленческих решений). В результате реализации разработанной архитектуры были сформированы файлы данных *aggregation_RU* и *aggregation_World* в базе данных MongoDB. На сегодняшний день количество документов в *aggregation_RU* составило около 50 000, а в *aggregation_World* – около 100 000. Заметим, что среди всех используемых параметров модели наиболее важными являются: скорость передачи инфекции, действия правительства и реакция населения. Также был разработан и внедрен дашборд для управления фермой данных и моделями.

A SYSTEMIC APPROACH TO THE STUDY OF MULTI-PARAMETER MODELS OF THE COVID-19 SPREAD

S. P. Levashkin, O. I. Zakharova

Artificial Intelligence Lab, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia

E-mail: ai_lab@psuti.ru

We present a systemic approach to the study of a new multi-parameter models of the COVID-19 pandemic spread that has the ultimate goal of optimizing the manage parameters of the models. The approach consists of two main parts: 1) an adaptive-compartmental models of the epidemic spread that is a generalization of the classical SEIR model and 2) a module for adjusting the

parameters of this model from the epidemic data using intelligent optimization methods. Data for testing the models of the pandemic spread in the Russian Federation regions and worldwide are collected on a daily basis from open sources, starting in March 2020. For this, a so-called “data farm” was developed and implemented on a local server (data farm is an automated system for collecting, storing and preprocessing data from heterogeneous sources that in combination with optimization methods, allows most accurately tune the parameters of the models, thus turning them into intelligent systems to support management decision making). As a result of the implementation of the developed farm architecture, data files *aggregation_RU* and *aggregation_World* in MongoDB were generated. To date, the number of documents in the *aggregation_RU* is about 50,000 and in *aggregation_World* – about 100,000. Note that among all model parameters used, the most important are: the rate of infection transmission, the government actions and the population reaction. A dashboard to manage data farm and models was also developed and implemented.

7-17

**ЭМПИРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
АКТИВНОСТИ ОБЩЕСТВА
В УСЛОВИЯХ ПАНДЕМИИ COVID-19:
ПОСТРОЕНИЕ ПРОГНОСТИЧЕСКОЙ
МОДЕЛИ**

Е. М. Лоскутов, А. Ф. Селезнев, В. В. Вдовин,
Д. Н. Мухин, А. С. Гаврилов, А. М. Фейгин

Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики» РАН, Нижний Новгород, Россия

По статистическим данным из открытых источников построена динамическая модель активности общества в условиях пандемии COVID-19, описывающая динамику индексов потребительской активности и частот посещения людьми различных мест в г. Москве, в зависимости от вводимых ограничений и эпидемиологической обстановки. Динамические переменные, использовавшиеся для построения модели, и факторы внешнего воздействия, не являющиеся динамическими переменными, но существенно влияющие на динамику модели, были получены из многомерного массива данных при помощи метода главных компонент. Методика получения динамических переменных и форсингов подробно изложена в смежном докладе «Эмпирическое моделирование активности общества в условиях пандемии COVID-19: выбор динамических переменных и форсингов». Статистическая обоснованность динамической модели обеспечивается использованием байесова критерия оптимальности. В докладе демонстрируются структура модели и результаты анализа ее прогностических свойств.

**EMPIRICAL MODELING
OF SOCIETY ACTIVITY IN THE CONTEXT
OF THE COVID-19 PANDEMIC:
BUILDING A PREDICTIVE MODEL**

E. M. Loskutov, A. F. Seleznyov, V. V. Vdovin,
D. N. Mukhin, A. S. Gavrilov, A. M. Feigin

Federal research center Institute of Applied Physics of the
Russian Academy of Sciences (IAP RAS),
Nizhny Novgorod, Russia

The dynamical model of social activity in the context of the COVID-19 pandemic was built based on statistical data from open sources. The model describes dynamics of a consumer activity indices and a frequency of people visiting various places in Moscow in depending on the imposed restrictions and the epidemiological situation. Dynamical variables used to build the model and external factors, which are not dynamic variables but significantly affect the dynamics of the model, were obtained from a multidimensional dataset using the principal component analysis. The methodology for obtaining dynamic variables and forcing is detailed in the related report “Empirical Modeling of Society Activity in the Context of the COVID-19 Pandemic: selection of dynamical variables and forcing”. The statistical validity of the dynamic model is ensured by using the Bayesian criterion of optimality. The report demonstrates the structure of the model and the results of the analysis of its predictive properties.

7-18

**ЭМПИРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
АКТИВНОСТИ ОБЩЕСТВА
В УСЛОВИЯХ ПАНДЕМИИ COVID-19: ВЫБОР
ДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ
И ФОРСИНГОВ**

Д. Н. Мухин, А. Ф. Селезнев, В. В. Вдовин,
Е. М. Лоскутов, А. С. Гаврилов, А. М. Фейгин

Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики» РАН, Нижний Новгород, Россия

Моделирование поведения общества в различных категориях активности является важным элементом при прогнозировании эпидемической ситуации. Данная работа направлена на построение динамической модели, описывающей временные ряды индексов потребительской активности и частот посещения людьми различных мест в г. Москва, в зависимости от меняющегося внешнего фона (вводимые властями ограничения и эпидемическая ситуация). Ключевой шаг при построении модели – определение набора динамических переменных и переменных, описывающих внешние воздействия (форсинги), потенциально значимые для моделируемой системы. В данном докладе представлены результаты выделения таких переменных из анализируемых выборок данных, на основе анализа многокомпонентных временных рядов

методами главных компонент. Результаты построения статистически оптимальной динамической модели в пространстве найденных переменных и анализа ее прогностических свойств представлены в смежном докладе «Эмпирическое моделирование активности общества в условиях пандемии COVID-19: построение прогностической модели».

**EMPIRICAL MODELING
OF SOCIETY ACTIVITY IN THE CONTEXT
OF THE COVID-19 PANDEMIC: SELECTION
OF DYNAMICAL VARIABLES AND FORCING**

D. N. Mukhin, A. F. Seleznev, V. V. Vdovin,
E. M. Loskutov, A. S. Gavrilov, A. M. Feigin

Federal research center Institute of Applied Physics of the
Russian Academy of Sciences (IAP RAS),
Nizhny Novgorod, Russia

Modeling the behavior of society in various categories of activity is an important element in predicting the epidemic situation. This work is aimed at building a dynamical model that describes the time series of consumer activity indices and the frequencies of people visiting various places in Moscow, depending on the changing external background (restrictions imposed by the authorities and the epidemic situation). A key step in building such a model is to define a set of dynamical variables and variables describing external influences (forcing) that are potentially significant for the system being modeled. This report presents the results of the selection of such variables from multicomponent datasets, based on the principal component analysis methods. The results of constructing a statistically optimal dynamical model in the space of the found variables and analyzing its predictive properties are presented in the related report “Empirical Modeling of Society Activity in the Context of the COVID-19 Pandemic: Building a Predictive Model”.

7-19

**АГЕНТНАЯ МОДЕЛЬ МНЕНИЙ
КАК ИНСТРУМЕНТ ОПИСАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ
ОБЩЕСТВА
В УСЛОВИЯХ ЭПИДЕМИИ**

Д. Н. Мухин, С. Е. Сафонов, А. Ю. Мухина,
Е. М. Лоскутов, А. М. Фейгин

Федеральный исследовательский центр «Институт
прикладной физики» РАН, Нижний Новгород, Россия

Сильная вариативность и плохая предсказуемость поведенческих реакций общества на внешние события являются основными источниками неопределенностей при моделировании процессов в социуме. В работе предпринята попытка описания поведенческой активности общества на основе модели распространения мнений, представляющей собой агентную модель, в которой динамика агентов задается систе-

мой дифференциальных уравнений со случайной матрицей связей. За основу была взята модель [1], описывающая динамику мнений в социальных сетях и учитывающая зависимость вероятности связи между агентами от близости их мнений. Мы модифицировали данную модель, обеспечив возможность введения «суперагентов» – источников мнений с намного большей, чем у рядовых агентов, степенью влияния. В частности, такая модификация позволяет описывать воздействие на социум мнений и сведений, транслируемых через средства массовой информации. В докладе обсуждается возможность использования модели для описания составляющих активности социума, чувствительных к изменениям эпидемической ситуации: например, динамики числа людей, соблюдающих самоизоляцию, и числа вакцинированных.

Литература

1. **Baumann, F.**, Lorenz-Spreen P., Sokolov I. M., and Starnini M. [Text] // Phys. Rev. Lett. – 124, 048301.

**THE AGENT MODEL OF OPINIONS
AS A TOOL FOR DESCRIBING
THE BEHAVIOR OF SOCIETY
IN AN EPIDEMIC**

D. N. Mukhin, S. E. Safonov, A. Yu. Mukhina,
E. M. Loskutov, A. M. Feigin

Federal research center Institute of Applied Physics of the
Russian Academy of Sciences (IAP RAS),
Nizhny Novgorod, Russia

Strong variability and poor predictability of the behavioral reactions of society to external events are the main sources of uncertainty in modeling processes in society. The paper attempts to describe the behavioral activity of society on the basis of the opinion propagation model – an agent-based model, in which the dynamics of agents is specified by a system of differential equations with a random matrix of connections. A model [1] was taken as a basis that describes the dynamics of opinions in social networks and takes into account the dependence of the probability of a connection between agents on the proximity of their opinions. We have modified this model, providing the possibility of introducing “super agents” – sources of opinions with a much greater degree of influence than regular agents. In particular, such a modification makes it possible to describe the impact on society of opinions and information broadcast through the media. The report discusses the possibility of using the model to describe the components of social activity that are sensitive to changes in the epidemic situation: e. g., the dynamics of the number of people who observe self-isolation and the number of vaccinated.

References

1. **Baumann, F.**, Lorenz-Spreen P., Sokolov I. M., and Starnini M. [Text] // Phys. Rev. Lett. – 124, 048301.

7-20

СХОДИМОСТЬ ИНТЕГРАЛЬНОЙ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ МОДЕЛЕЙ ЭПИДЕМИЙ ПРИ РАВНОМЕРНОМ ПРОФИЛЕ ЗАРАЗНОСТИ

М. Ю. Простов¹, Д. А. Семёнова²,
В. В. Чернецова³, Г. Д. Каминский²

¹Закрытое акционерное общество «РИ-Системы»,
Москва, Россия

²Национальный медицинский исследовательский центр
фтизиопульмонологии и инфекционных заболеваний
Министерства здравоохранения РФ,
Москва, Россия

³Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, Россия
E-mail: prostomi@gmail.com

В интегральной модели эпидемий динамика изменения общего пула инфицированных $Y(t)$ описывается выражением

$$Y'(t) = A(t) - E(t), \tag{1}$$

где $A(t)$ – число новых случаев заболевания; $E(t)$ – выделенная заразительность, причем эти две переменные связаны соотношением

$$E(t) = \int_0^\infty A(t-\tau)\rho(\tau)d\tau, \tag{2}$$

где τ – день профиля заразности.

Пусть профиль заразности $\rho(\tau)$ является равномерным. Тогда

$$\rho(\tau) = \frac{1}{T_2 - T_1}, \quad T_1 \leq \tau \leq T_2,$$

$$\rho(\tau) = 0, \quad \tau \notin (T_1, T_2),$$

где T_1 – время латентного периода; T_2 – суммарное время латентного и заразного периода.

Записывая соответствующие равномерному профилю заразности граничные условия и производя вычисление повторного интеграла, получаем более удобное выражение для последующего дифференцирования (s – время до окончания выделения возбудителя).

$$\begin{aligned} Y(t) &= \int_{T_1}^{T_2} \int_{T_1}^s A(t-s)\rho(\tau)d\tau ds = \\ &= \int_{T_1}^{T_2} A(t-s) \left(\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^s d\tau \right) ds = \\ &= \int_{T_1}^{T_2} A(t-s) \left(\frac{1}{T_2 - T_1} \right) (s - T_1) ds = \\ &= \left(\frac{1}{T_2 - T_1} \right) \int_{T_1}^{T_2} sA(t-s) ds - \left(\frac{T_1}{T_2 - T_1} \right) \int_{T_1}^{T_2} A(t-s) ds. \end{aligned}$$

Далее дифференцируем отдельно два полученных интеграла.

$$\begin{aligned} \left(\int_{T_1}^{T_2} sA(t-s) ds \right)' &= \int_{T_1}^{T_2} sA'(t-s) ds = \\ &= -sA(t-s) \Big|_{T_1}^{T_2} + \int_{T_1}^{T_2} A(t-s) ds = \\ &= -T_2A(t-T_2) + T_1A(t-T_1) + \int_{T_1}^{T_2} A(t-s) ds. \end{aligned}$$

Дифференцируя второй интеграл, имеем

$$\left(\int_{T_1}^{T_2} A(t-s) ds \right)' = A(t-T_1) - A(t-T_2).$$

Приводя подобные слагаемые, получаем

$$Y'(t) = -A(t-T_2) + \left(\frac{1}{T_2 - T_1} \right) \int_{T_1}^{T_2} A(t-s) ds.$$

Легко видеть, что последнее слагаемое есть $E(t)$, что доказывается вычислением соответствующих интегралов, входящих в определение $E(t)$ при равномерном профиле заразности. Таким образом,

$$Y'(t) = -A(t-T_2) + E(t).$$

Суммируя это выражение с уравнением (1) и подставляя формулу закона действия масс $A(t) = RX(t)E(t)$, получаем

$$Y'(t) = \frac{R}{2} (X(t)E(t) - X(t-T_2)E(t-T_2)),$$

где R – контактное число инфекции; $X(t)$ – доля восприимчивых.

Таким образом, общего пула инфицированности $Y(t)$ описывается дифференциально-разностным уравнением

$$Y'(t) = \frac{R}{2} (X(t)E(t) - X(t-T_2)E(t-T_2)).$$

CONVERGENCE OF THE INTEGRAL AND DIFFERENTIAL EPIDEMIC MODELS WITH UNIFORM CONTAGION PROFILE

M. Y. Prostov¹, D. A. Semyonova²,
V. V. Chernetsova³, G. D. Kaminskiy²

¹ZAO “RY-Systems”, Moscow, Russia

²National Medical Research Center of Phthisiopulmonology and Infectious Diseases of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

³National Research University “MEI”, Moscow, Russia
E-mail: prostomi@gmail.com

In the integral model of epidemics the dynamics of changes in the total pool of infected $Y(t)$ is described by the formula

$$Y'(t) = A(t) - E(t), \tag{1}$$

where $A(t)$ is the number of new cases of the disease, $E(t)$ is the selected contagiousness. These two variables are related by the ratio

$$E(t) = \int_0^\infty A(t-\tau)\rho(\tau)d\tau, \tag{2}$$

where τ is the day of contagion profile.

Let the contagion profile $\rho(\tau)$ be uniform. So

$$\rho(\tau) = \frac{1}{T_2 - T_1}, \quad T_1 \leq \tau \leq T_2,$$

$$\rho(\tau) = 0, \quad \tau \notin (T_1, T_2),$$

Where T_1 is time of the latent period, T_2 is total time of the latent and infectious period. Writing down the boundary conditions corresponding to a uniform contagion profile and calculating the iterated integral, we obtain a more convenient formula for subsequent differentiation (s is time until the end of the pathogen release).

$$\begin{aligned} Y(t) &= \int_{T_1}^{T_2} \int_{T_1}^s A(t-s) \rho(\tau) d\tau ds = \\ &= \int_{T_1}^{T_2} A(t-s) \left(\left(\frac{1}{T_2 - T_1} \right) \int_{T_1}^s d\tau \right) ds = \\ &= \int_{T_1}^{T_2} A(t-s) \left(\frac{1}{T_2 - T_1} \right) (s - T_1) ds = \\ &= \left(\frac{1}{T_2 - T_1} \right) \int_{T_1}^{T_2} s A(t-s) ds - \left(\frac{T_1}{T_2 - T_1} \right) \int_{T_1}^{T_2} A(t-s) ds. \end{aligned}$$

Then we differentiate the two obtained integrals separately.

$$\begin{aligned} \left(\int_{T_1}^{T_2} s A(t-s) ds \right)' &= \int_{T_1}^{T_2} s A'(t-s) ds = \\ &= -s A(t-s) \Big|_{T_1}^{T_2} + \int_{T_1}^{T_2} A(t-s) ds = \\ &= -T_2 A(t - T_2) + T_1 A(t - T_1) + \int_{T_1}^{T_2} A(t-s) ds. \end{aligned}$$

Differentiating the second integral, we have

$$\left(\int_{T_1}^{T_2} A(t-s) ds \right)' = A(t - T_1) - A(t - T_2).$$

Giving such terms, we obtain

$$Y'(t) = -A(t - T_2) + \left(\frac{1}{T_2 - T_1} \right) \int_{T_1}^{T_2} A(t-s) ds.$$

It's easy to see that the last term is $E(t)$, which is proved by calculating the corresponding integrals included in the definition of $E(t)$ with uniform contagion profile. So

$$Y'(t) = -A(t - T_2) + E(t).$$

Summing this expression with equation (1) and substituting the law of mass action formula $A(t) = RX(t)E(t)$, we obtain

$$Y'(t) = \frac{R}{2} (X(t)E(t) - X(t - T_2)E(t - T_2)),$$

where R is the contact rate of infection, $X(t)$ is the proportion of susceptible.

So, the total infection pool $Y(t)$ is described by the differential-difference equation

$$Y'(t) = \frac{R}{2} (X(t)E(t) - X(t - T_2)E(t - T_2)).$$

7-21

СХОДИМОСТЬ ИНТЕГРАЛЬНОЙ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ МОДЕЛЕЙ ЭПИДЕМИЙ ПРИ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОМ ПРОФИЛЕ ЗАРАЗНОСТИ

М. Ю. Простов¹, Д. А. Семёнова², Г. Д. Каминский²

¹Закрытое акционерное общество «РИ-Системы»,
Москва, Россия

²Национальный медицинский исследовательский центр
фтизиопульмонологии и инфекционных заболеваний
Министерства здравоохранения РФ, Москва, Россия

E-mail: prostomi@gmail.com

В интегральной модели эпидемий интенсивность заражения α и интенсивность выздоровления β объединяются в профиле заразности $\rho(\tau)$, где τ – номер дня профиля заразности. При этом динамика изменения числа инфицированных (в терминах интегральной модели – общего пула инфицированных) $Y(t)$ описывается выражением

$$Y'(t) = A(t) - E(t), \quad (1)$$

где $A(t)$ – число вновь инфицированных в день t , $E(t)$ – выделенная заразительность в день t .

Если пренебречь убылью источников возбудителя инфекции за счет естественного движения населения, $A(t)$ – число вновь инфицированных в день t , равно

$$A(t) = RX(t) \int_0^\infty A(t-\tau) \rho(\tau) d\tau,$$

где R – контактное число инфекции; $X(t)$ – доля восприимчивых.

$E(t)$ – выделенная заразительность в день t , равна

$$E(t) = \int_0^\infty A(t-\tau) \rho(\tau) d\tau.$$

Другими словами,

$$Y'(t) = RX(t)E(t) - E(t). \quad (2)$$

Из данного уравнения видно, что стационарное решение наступает при условии $X(t) = 1/R$.

Пусть для всех значений $\tau \geq 0$ профиль заразности $\rho(\tau)$ задается нормированной экспоненциальной функцией

$$\rho(\tau) = \gamma e^{-\gamma\tau},$$

где γ – интенсивность заражения/выздоровления (в дифференциальной модели эпидемий).

Производя интегрирование (с применением правила интегрирования по частям), получаем

$$\begin{aligned} E(t) &= \int_0^\infty A(t-\tau) \gamma e^{-\gamma\tau} d\tau = A(t-\tau) (-e^{-\gamma\tau}) \Big|_0^\infty + \\ &+ \int_0^\infty (A(t-\tau))' e^{-\gamma\tau} d\tau = A(t) - \int_0^\infty A'(t-\tau) e^{-\gamma\tau} d\tau. \end{aligned}$$

Производя дифференцирование исходного выражения для $E(t)$ с применением теоремы о дифференцировании под знаком несобственного интеграла, находим, что

$$E'(t) = \int_0^\infty A'(t-\tau)\gamma e^{-\gamma\tau}d\tau.$$

Заметим, что этот интеграл пропорционален интегралу в предыдущей формуле. Таким образом, получаем

$$E'(t) = \gamma A(t) - \gamma E(t).$$

Сопоставляя это выражение с уравнением (1), получаем

$$E'(t) = \gamma Y'(t).$$

Интегрируя это равенство с учетом начальных условий, имеем

$$E(t) = \gamma Y(t).$$

Таким образом, общее выражение (2)

$$Y'(t) = RX(t)E(t) - E(t)$$

преобразуется в выражение

$$Y'(t) = \gamma X(t)Y(t) - \gamma Y(t).$$

Это и есть классическая дифференциальная модель эпидемий.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России: грант № 075-11-2020-011 (13.1902.21.0040) в рамках договора 006.20/5 от 14.12.2020 г.

CONVERGENCE OF THE INTEGRAL AND DIFFERENTIAL MODELS OF EPIDEMICS WITH AN EXPONENTIAL CONTAGION PROFILE

M. Y. Prostov¹, D. A. Semyonova², G. D. Kaminskiy²

¹ZAO "RY-Systems", Moscow, Russia

²National Medical Research Center of Phthisiopulmonology and Infectious Diseases of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

E-mail: prostomi@gmail.com

In the integral model of epidemics the intensity of infection α and the intensity of recovery β are combined in the contagion profile $\rho(\tau)$, where τ is the number of a day of contagion profile. In addition, the dynamics of changes in the number of infected people (in terms of the integral model, the common pool of infected people) $Y(t)$, is described by the formula

$$Y'(t) = A(t) - E(t), \tag{1}$$

where $A(t)$ is the number of newly infected people at the day t , $E(t)$ is the selected infectivity on the day t .

If we neglect the decrease in the sources of the causative agent of the infection due to the natural movement of the population, $A(t)$ is the number of newly infected people at the day t , which is equal to

$$A(t) = RX(t) \int_0^\infty A(t-\tau)\rho(\tau)d\tau,$$

where R is the contact rate of infection, $X(t)$ is the proportion of susceptible.

$E(t)$ is the selected infectivity on the day t , which is equal to

$$E(t) = \int_0^\infty A(t-\tau)\rho(\tau)d\tau.$$

Otherwise speaking,

$$Y'(t) = RX(t)E(t) - E(t). \tag{2}$$

From this formula, we can see that the stationary solution occurs under the condition $X(t) = 1/R$.

For all values of $\tau \geq 0$, let the infection profile $\rho(\tau)$ be given by the normalized exponential function

$$\rho(\tau) = \gamma e^{-\gamma\tau},$$

where γ is the intensity of infection/recovery (in the differential epidemic model).

Performing the integration (using the integration rule in parts), we get

$$E(t) = \int_0^\infty A(t-\tau)\gamma e^{-\gamma\tau}d\tau = A(t-\tau)(-e^{-\gamma\tau})\Big|_0^\infty + \int_0^\infty (A(t-\tau))' e^{-\gamma\tau}d\tau = A(t) - \int_0^\infty A'(t-\tau)e^{-\gamma\tau}d\tau.$$

Performing the differentiation of the original expression for $E(t)$ with the use of the differentiation theorem under the sign of the improper integral, we find that

$$E'(t) = \int_0^\infty A'(t-\tau)\gamma e^{-\gamma\tau}d\tau.$$

We can see that this integral is proportional to the integral in the previous formula. So, we get

$$E'(t) = \gamma A(t) - \gamma E(t).$$

Comparing this formula with formula (1), we get

$$E'(t) = \gamma Y'(t).$$

So, the general formula (2)

$$Y'(t) = RX(t)E(t) - E(t)$$

becomes the formula

$$Y'(t) = R\gamma X(t)Y(t) - \gamma Y(t).$$

This is the classical differential epidemic model.

This work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation: grant No. 075-11-2020-011 (13.1902.21.0040) under the agreement 006.20/5 of 14.12.2020.

7-22

УСТОЙЧИВОСТЬ ЭПИДЕМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Ю. И. Простов¹, М. Ю. Простов², Г. Д. Каминский³

¹Научно-исследовательский институт организации здравоохранения и медицинского менеджмента Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

²Закрытое акционерное общество «РИ-Системы», Москва, Россия

³Национальный медицинский исследовательский центр фтизиопульмонологии и инфекционных заболеваний Министерства здравоохранения РФ, Москва, Россия

E-mail: prostovpro@gmail.com

До настоящего времени неизвестно, какие уровни

воздействия на эпидемический процесс приводят к его прекращению.

Рассмотрим модель, заданную следующей системой дифференциальных уравнений с пропорциональным управлением (λ и δ):

$$\begin{cases} X' = -R\alpha XY + \mu - \mu X + k(1 - X - Y) - \lambda X \\ Y' = R\alpha XY - \beta Y - \mu Y - \delta Y \end{cases},$$

где X – доля восприимчивых; Y – доля инфицированных; α – интенсивность заражения; β – интенсивность выздоровления; k – интенсивность потери иммунитета; R – контактное число инфекции; μ – интенсивность притока/оттока населения. Параметр λ характеризует необходимые объемы вакцинации/доконтактной профилактики, параметр δ определяет объемы выявления, изоляции и лечения заболевших.

Данная система имеет следующее нетривиальное (ненулевое) стационарное решение (X_2, Y_2):

$$\begin{cases} X_2 = \frac{\beta + \delta + \mu}{R\alpha} \\ Y_2 = \frac{kR\alpha + \mu R\alpha - (k + \lambda + \mu)(\beta + \delta + \mu)}{R\alpha(\beta + \delta + k + \mu)} \end{cases}.$$

Область неустойчивости стационарного решения (X_2, Y_2) находим, решая систему неравенств

$$\begin{cases} \det(Jac(X_2, Y_2)) < 0, \\ \begin{cases} \det(Jac(X_2, Y_2)) > 0 \\ \text{tr}(Jac(X_2, Y_2)) > 0 \end{cases} \end{cases}$$

которая определяет условие, что хотя бы одно из собственных значений матрицы $Jac(X_2, Y_2)$ положительно.

Вычисляем детерминант и след матрицы $Jac(X_2, Y_2)$:

$$\det(Jac(X_2, Y_2)) = R\alpha(\mu + k) - \lambda(\beta + \delta + \mu) - (\mu + k)(\beta + \delta + \mu),$$

$$\text{tr}(Jac(X_2, Y_2)) = -\frac{(\mu + k)R\alpha + k(\mu + k + \lambda)}{\mu + k + \beta + \delta}.$$

Решая систему неравенств, получаем, что нетривиальное стационарное решение неустойчиво в первом приближении в одном из двух случаев:

$$\begin{aligned} \text{а)} & \begin{cases} \mu + \beta + \delta > 0 \\ \lambda > \frac{(\mu + k)(R\alpha - \beta - \delta - \mu)}{\beta + \delta + \mu} \end{cases}; \\ \text{б)} & \begin{cases} \mu + \beta + \delta < 0 \\ \lambda < \frac{(\mu + k)(R\alpha - \beta - \delta - \mu)}{\beta + \delta + \mu} \end{cases}. \end{aligned}$$

Системе эпидемического процесса соответствует случай а). Из системы видно, что чем больше объемы выявления, изоляции и лечения источников инфекции, тем для создания неустойчивости могут быть необходимы меньшие объемы вакцинации и доконтактной профилактики.

В ряде случаев процесс создания невосприимчивости (вакцинации) лимитирован числом точек вакцинации. Рассмотрим модель, заданную следующей системой дифференциальных уравнений с постоянным (не пропорциональным) влиянием параметра λ :

$$\begin{cases} X' = -R\alpha XY + \mu - \mu X + k(1 - X - Y) - \lambda \\ Y' = R\alpha XY - \beta Y - \mu Y - \delta Y \end{cases}.$$

Данная система имеет нетривиальное стационарное решение:

$$\begin{cases} X_2 = \frac{\beta + \delta + \mu}{R\alpha} \\ Y_2 = \frac{kR\alpha + \mu R\alpha - \lambda R\alpha - (k + \mu)(\beta + \delta + \mu)}{R\alpha(\beta + \delta + k + \mu)} \end{cases}.$$

Для этих стационарных решений возможно аналитическое исследование их устойчивости в первом приближении. Для этого находим якобиан системы дифференциальных уравнений

$$Jac(X, Y) = \begin{pmatrix} -R\alpha Y - \mu - k - \lambda & R\alpha Y \\ -R\alpha X - k & R\alpha X - \beta - \mu - \delta \end{pmatrix}.$$

Область неустойчивости стационарного решения (X_2, Y_2) находим, решая систему неравенств

$$\begin{cases} \det(Jac(X_2, Y_2)) < 0, \\ \begin{cases} \det(Jac(X_2, Y_2)) > 0 \\ \text{tr}(Jac(X_2, Y_2)) > 0 \end{cases} \end{cases}$$

которая определяет условие, что хотя бы одно из собственных значений матрицы $Jac(X_2, Y_2)$ положительно.

Вычисляем детерминант и след матрицы $Jac(X_2, Y_2)$:

$$\det(Jac(X_2, Y_2)) = R\alpha(\mu + k - \lambda) - (\mu + k)(\beta + \delta + \mu),$$

$$\text{tr}(Jac(X_2, Y_2)) = -\frac{(\mu + k - \lambda)R\alpha + k^2 + k\mu}{\mu + k + \beta + \delta}.$$

Решая систему неравенств, получаем, что решение (X_2, Y_2) неустойчиво, если:

$$\lambda > \frac{(\mu + k)(R\alpha - \beta - \delta - \mu)}{R\alpha}.$$

Таким образом, получены формулы управления эпидемическим процессом. Они характеризуют пороговые уровни воздействия (интервенции), при которых эпидемический процесс завершается, а также эффективность совместных воздействий на источник инфекции (δ) и восприимчивое население (λ).

Работа была выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России: грант № 075-11-2020-011 (13.1902.21.0040) в рамках договора 006.20/5 от 14.12.2020 г.

THE STABILITY OF THE EPIDEMIC PROCESS

Y. I. Prostov¹, M. Y. Prostov², G. D. Kaminskiy³

¹State Budgetary Institution “Research Institute for Healthcare and Medical Management of Moscow Healthcare Department”, Moscow, Russia

²ZAO “RY-Systems”, Moscow, Russia

³Federal State Budgetary Institution “National Medical Research Center of Phthisiopulmonology and Infectious Diseases” of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

E-mail: prostovpro@gmail.com

It is still unknown what levels of impact on the epidemic process lead to its termination.

Let's consider the model given by the following system of differential equations with proportional control (λ and δ):

$$\begin{cases} X' = -R\alpha XY + \mu - \mu X + k(1 - X - Y) - \lambda X \\ Y' = R\alpha XY - \beta Y - \mu Y - \delta Y \end{cases},$$

where X is the proportion of susceptible, Y is the proportion of infected, α is the intensity of infection, β is the intensity of recovery, k is the intensity of immunity loss, R is the contact rate of infection, μ is the intensity of population inflow/outflow. The parameter λ characterizes the necessary volumes of vaccination/pre-exposure prophylaxis, the parameter δ determines the volumes of detection, isolation and treatment of patients.

This system has the following nontrivial (non-zero) stationary solution (X_2, Y_2):

$$\begin{cases} X_2 = \frac{\beta + \delta + \mu}{R\alpha} \\ Y_2 = \frac{kR\alpha + \mu R\alpha - (k + \lambda + \mu)(\beta + \delta + \mu)}{R\alpha(\beta + \delta + k + \mu)} \end{cases}$$

We can find the instability domain of the stationary solution (X_2, Y_2) by solving a system of inequations

$$\begin{cases} \det(Jac(X_2, Y_2)) < 0, \\ \det(Jac(X_2, Y_2)) > 0 \\ \text{tr}(Jac(X_2, Y_2)) > 0 \end{cases}$$

which determines the condition that at least one of the eigenvalues of the matrix $Jac(X_2, Y_2)$ is positive.

We calculate the determinant and the trace of the matrix $Jac(X_2, Y_2)$:

$$\begin{aligned} \det(Jac(X_2, Y_2)) &= R\alpha(\mu + k) - \\ &\quad - \lambda(\beta + \delta + \mu) - (\mu + k)(\beta + \delta + \mu), \\ \text{tr}(Jac(X_2, Y_2)) &= -\frac{(\mu + k)R\alpha + k(\mu + k + \lambda)}{\mu + k + \beta + \delta}. \end{aligned}$$

Solving the system of inequations, we obtain that a nontrivial stationary solution is unstable in the first approximation in one of two cases:

$$\begin{aligned} \text{a) } &\begin{cases} \mu + \beta + \delta > 0 \\ \lambda > \frac{(\mu + k)(R\alpha - \beta - \delta - \mu)}{\beta + \delta + \mu} \end{cases} \\ \text{b) } &\begin{cases} \mu + \beta + \delta < 0 \\ \lambda < \frac{(\mu + k)(R\alpha - \beta - \delta - \mu)}{\beta + \delta + \mu}. \end{cases} \end{aligned}$$

The case a) matches the system of epidemic process. We can see that the larger the volumes of detection, isolation and treatment of sources of infection, the smaller volumes of vaccination and pre-exposure prophylaxis may be needed to create instability.

In some cases, the process of creating immunity (vaccination) is limited by the number of vaccination points. Let's consider the model given by the following system of differential equations with a constant (non-proportional) influence of the parameter λ :

$$\begin{cases} X' = -R\alpha XY + \mu - \mu X + k(1 - X - Y) - \lambda \\ Y' = R\alpha XY - \beta Y - \mu Y - \delta Y \end{cases}.$$

This system has a nontrivial stationary solution

$$\begin{cases} X_2 = \frac{\beta + \delta + \mu}{R\alpha} \\ Y_2 = \frac{kR\alpha + \mu R\alpha - \lambda R\alpha - (k + \mu)(\beta + \delta + \mu)}{R\alpha(\beta + \delta + k + \mu)} \end{cases}$$

For these stationary solutions, an analytical study of their stability in the first approximation is possible. To do this, we find the Jacobian of the system of differential equations

$$Jac(X, Y) = \begin{pmatrix} -R\alpha Y - \mu - k - \lambda & R\alpha Y \\ -R\alpha X - k & R\alpha X - \beta - \mu - \delta \end{pmatrix}.$$

We can find the instability domain of the stationary solution (X_2, Y_2) by solving a system of inequations

$$\begin{cases} \det(Jac(X_2, Y_2)) < 0, \\ \det(Jac(X_2, Y_2)) > 0, \\ \text{tr}(Jac(X_2, Y_2)) > 0 \end{cases}$$

which determines the condition that at least one of the eigenvalues of the matrix $Jac(X_2, Y_2)$ is positive.

We calculate the determinant and the trace of the matrix $Jac(X_2, Y_2)$:

$$\begin{aligned} \det(Jac(X_2, Y_2)) &= R\alpha(\mu + k - \lambda) - (\mu + k)(\beta + \delta + \mu), \\ \text{tr}(Jac(X_2, Y_2)) &= -\frac{(\mu + k - \lambda)R\alpha + k^2 + k\mu}{\mu + k + \beta + \delta}. \end{aligned}$$

Solving the system of inequations, we obtain that a nontrivial stationary solution is unstable if:

$$\lambda > \frac{(\mu + k)(R\alpha - \beta - \delta - \mu)}{R\alpha}.$$

Finally, formulas for the epidemic process control are obtained. They characterize the threshold levels of exposure (intervention) at which the epidemic process ends, as

well as the effectiveness of joint actions on the source of infection (δ) and the susceptible population (λ).

This work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation: grant No. 075-11-2020-011 (13.1902.21.0040) under the agreement 006.20/5 of 14.12.2020.

7-23

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЛЕЧЕНИЯ ПАЦИЕНТОВ С ОДИНОЧНЫМИ МЕТАСТАЗАМИ КОЛОРЕКТАЛЬНОГО РАКА В ПЕЧЕНЬ

Д. А. Рогачева, М. М. Сарычева, Е. Я. Мозерова,
А. А. Ложков, Д. М. Тимохина, Р. Ю. Карабут,
А. Ю. Максимовская, Ж. Е. Сабельникова

ГБУЗ «Челябинский областной клинический центр
онкологии и ядерной медицины», Челябинск, Россия

E-mail: daryahom95@mail.ru

Цель: оценить эффективность применения методик стереотаксической лучевой терапии (СТЛТ) и радиочастотной абляции (РЧА) в лечении пациентов с метастазами колоректального рака в печень.

Материалы и методы. На базе ГБУЗ ЧОКЦО и ЯМ неоперабельным пациентам с метастатическим поражением печени при колоректальном раке были проведены РЧА или СТЛТ. В первую группу вошли 14 больных, которым была проведена РЧА, второй группе пациентов (10 человек) провели СТЛТ. Пациенты первой группы проходили лечение в период с 2018 года по октябрь 2020 года. Соотношение по полу: мужчины – 8, женщины – 6. Средний возраст составил 62,9 лет. Основной локализацией первичной опухоли была прямая кишка – 5 человек. Распределение по стадиям заболевания представлено следующим образом: с IV стадией – 10 пациентов, с III стадией – 3, со II – 1. Вторую группу составили пациенты, получившие лечение с 2011 по 2019 год. Средний возраст составил 64 года. Также преобладал мужской пол (6 больных против 4). Различия в частоте встречаемости IV и II–III стадий заболевания не имели статистической значимости.

Результаты. В первой группе при медиане наблюдения в 13 месяцев однолетняя общая выживаемость составила 93%, из 14 пациентов умер только один. Однолетний локальный контроль составил 80%. В большинстве случаев отмечена стабилизация размеров метастатического очага в печени, однако у 3 пациентов спустя 3 месяца после проведения РЧА по данным компьютерной томографии выявлено увеличение размеров образования. Во второй группе однолетний локальный контроль составил 90%, метод-специфическая выживаемость – 38%. В основном имела место стабилизация опухолевого процесса. У 3 пациентов зафиксировано уменьшение размеров метастаза и лишь у одного пациента увеличение размеров образования.

Выводы: таким образом, применение СТЛТ и РЧА являются безопасными и эффективными методами лечения у пациентов с одиночными метастазами колоректального рака в печень. СТЛТ и РЧА могут являться альтернативными методами в тех случаях, когда невозможно хирургическое лечение. Решение о назначении лечения принимается с учетом мультидисциплинарного консилиума и только исходя из фактора наибольшей безопасности и эффективности для каждого конкретного пациента.

MODERN METHODS OF TREATMENT OF PATIENTS WITH SINGLE METASTASES OF COLORECTAL CANCER TO THE LIVER

D. A. Rogacheva, M. M. Sarycheva, E. Ya. Moserova,
A. A. Lozhkov, D. M. Timokhina, R. Yu. Karabut,
A. Yu. Maksimovskaya, Zh. E. Sabelnikova

GBUZ “Chelyabinsk Regional Clinical Center of Oncology
and Nuclear Medicine”, Chelyabinsk, Russia

E-mail: daryahom95@mail.ru

Objective. to evaluate the effectiveness of the use of stereotactic radiation therapy (STLT) and radiofrequency ablation (RF) techniques in the treatment of patients with colorectal cancer metastases to the liver.

Materials and methods. RFA or STLT was performed in inoperable patients with metastatic liver damage in colorectal cancer on the basis of the State Medical Institution CHOKZO and YAM. The first group included 14 patients who underwent RFA, the second group of patients (10 people) underwent STLT. Patients of the first group were treated in the period from 2018 to October 2020. Sex ratio: men – 8, women – 6. The average age was 62.9 years. The main localization of the primary tumor was the rectum – 5 people. The distribution by stages of the disease is presented as follows: 10 patients with stage IV, 3 with stage III, and 1 with stage II. The second group consisted of patients who received treatment from 2011 to 2019. The median age was 64 years. The male sex also prevailed (6 patients versus 4). Differences in the frequency of occurrence of stages IV and II–III of the disease had no statistical significance.

Results. In the first group, with a median follow-up of 13 months, the one-year overall survival was 93%, only one of the 14 patients died. The one-year local control was 80%. In most cases, there was a stabilization of the size of the metastatic focus in the liver, but in 3 patients, 3 months after the RFA, an increase in the size of the formation was revealed according to computed tomography. In the second group, the one-year local control was 90%, the method-specific survival rate was 38%. Basically, there was a stabilization of the tumor process. In 3 patients, a decrease in the size of metastasis was recorded, and only one patient had an increase in the size of the formation.

Conclusions. thus, the use of STLT and RFA are safe and effective methods of treatment in patients with single metastases of colorectal cancer to the liver. STLT and RFA can be alternative methods in cases where surgical treatment is impossible. The decision on the appointment of

treatment is made taking into account a multidisciplinary consultation and only based on the factor of the greatest safety and effectiveness for each individual patient.

7-24

ПОПУЛЯЦИОННАЯ ДИНАМИКА ПСИХИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ. ПЕРЕМЕННЫЕ, ПРОЦЕССЫ, СЦЕНАРИИ

А. А. Романюха

Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука
РАН, Москва, Россия

Согласно определению Всемирной организации здравоохранения «здоровье является состоянием полного физического, душевного и социального благополучия». Наиболее распространенными нарушениями душевного благополучия являются депрессии и состояние тревожности. По данным ВОЗ депрессии являются самой частой несмертельной болезнью (Murray, Lopez, 1996). Эта болезнь имеет ряд отрицательных проявлений: снижается способность к сложным видам деятельности, особенно интеллектуальной, существенно ухудшаются социальные характеристики индивида: способность к общению и координации активности, целесообразность принимаемых решений и действий. Тяжелые и продолжительные депрессии могут активировать и утяжелять течение сопутствующих заболеваний, ускорять старение.

Эпизоды депрессии могут происходить у любого индивида, их частота зависит от пола, возраста, наследственности, воспитания, предшествующих и текущих воздействий среды. В среднем, пожизненный риск депрессии равен 40% у женщин и 30% у мужчин. Повышенная частота депрессий наблюдается у подростков, в юности и у людей старше 70 лет. У пожилых людей депрессия, как правило, утяжеляет течение сопутствующих заболеваний.

Эпизоды депрессии длятся от 2–3 недель до нескольких месяцев. Возникновение и развитие эпизодов депрессии зависит от внешних и внутренних факторов, от того насколько внутренние и внешние факторы близки к нормальным, «целевым» значениям. Длительное и/или значительное отклонение факторов от целевых значений запускает тревожное состояние, которое развивается в депрессию. Отметим, что у части индивидов тревожное состояние может реализоваться в виде агрессии и/или антисоциального поведения. Завершение эпизода депрессии связано или с нормализацией значений физиологических и/или психологических факторов или с изменением целевых значений психологических факторов или с истощением адаптационных ресурсов. В случае психических нарушений нагрузка на систему стабилизации психики индивида создается из нескольких источников:

- сеть личного общения (родственники и ближайшие друзья);
- общение через социальные сети;

- электронные средства информации (интернет, телевидение).

Увеличение нагрузки по этим каналам провоцирует развитие тревоги и депрессии.

Математическая модель популяционной динамики психических нарушений должна описать связи между социальными и медико-биологическими процессами, возможные режимы контроля этих процессов.

Литература

1. Murray, C. J. L. The Global Burden of Disease [Text] / C. J. L. Murray & A. D. Lopez. – Geneva : World Health Organization. – 1996.

POPULATION DYNAMICS OF MENTAL DISORDERS. VARIABLES, PROCESSES, SCENARIOS

A. A. Romanyukha

Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian
Academy of Sciences, Moscow, Russia

According to the definition of the World Health Organization, “Health is a state of physical, mental and social well-being”. The most common disorders of mental well-being are depression and anxiety. According to WHO, depression is the most common non-fatal disease (Murray, Lopez, 1996). This disease has a number of negative manifestations: the ability to perform complex activities, especially intellectual, the social characteristics of the individual significantly deteriorate: the ability to communicate and coordinate activity, the expediency of decisions and actions taken. Severe and prolonged depression can activate and aggravate the course of concomitant diseases, accelerate aging.

Episodes of depression can occur in any individual, their frequency depends on gender, age, heredity, upbringing, previous and current environmental influences. On average, the lifetime risk of depression is 40% in women and 30% in men. An increased frequency of depression is observed in adolescents, in youth and in people over 70 years of age. In the elderly, depression, as a rule, aggravates the course of concomitant diseases.

Episodes of depression last from 2–3 weeks to several months. The occurrence and development of episodes of depression depends on external and internal factors, on how close internal and external factors are to normal, “target” values. A prolonged and /or significant deviation of factors from the target values triggers an anxiety state that develops into depression. Note that in some individuals, the anxiety state can be realized in the form of aggression and/or antisocial behavior. The end of an episode of depression is associated either with the normalization of the values of physiological and/or psychological factors, or with a change in the target values of psychological factors, or with the depletion of adaptive resources. In the case of mental disorders, the load on the individual’s mental stabilization system is created from several sources:

- a network of personal communication (relatives and closest friends);
- communication via social networks;

- electronic media (Internet, television).

An increase in the load through these channels provokes the development of anxiety and depression.

A mathematical model of the population dynamics of mental disorders should describe the connections between social and biomedical processes, possible modes of control of these processes.

References

1. Murray, C. J. L. The Global Burden of Disease [Text] / C. J. L. Murray & A. D. Lopez. – Geneva : World Health Organization. – 1996.

7-25

ВЗГЛЯД НА СИСТЕМЫ КВАЗИЛИНЕЙНЫХ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ

Ю. Г. РЫКОВ

Федеральный исследовательский центр «Институт
прикладной математики им. М. В. Келдыша» РАН,
Москва, Россия

E-mail: yu-rykov@yandex.ru

Для моделирования распространения вирусных инфекций широко используются дифференциальные уравнения, как обыкновенные, так и в частных производных. Включение в модель уравнений в частных производных позволяет одновременно с процессом заражения рассматривать, например, перемещение населения или учитывать его возрастную структуру. При этом получающаяся система уравнений может иметь и нелинейный характер, в том числе представлять собой нелинейную систему законов сохранения. В последнее время для решения таких систем уравнений все чаще используются методы искусственного интеллекта, в частности нейросетевые методы, несмотря на то, что разработано большое количество эффективных разностных методов. Это связано с тем, что нейросетевые методы хорошо соответствуют методам работы с большими данными. Стоит отметить, развитие технологий искусственного интеллекта также стимулировало за рубежом большое количество математических исследований, как по структуре нейронных сетей, так и в областях функционального анализа и дифференциальных уравнений. В докладе будет рассказано о вариационной постановке задачи поиска обобщенных решений для квазилинейных гиперболических систем уравнений. Такая постановка подразумевает минимизацию некоторого функционала на данном пространстве функций, что позволяет естественным образом решать задачу нейросетевыми методами. Найденный функционал, по существу, представляет собой функционал ошибки, отличающийся от традиционного (как правило, квадрат действия дифференциального оператора на функцию). Полученный функционал ошибки учиты-

вает специфические свойства обобщенных решений, и представляется более предпочтительным. Интересным фактом является также и то, что подобный подход имеет аналог и в многомерном случае. Таким образом, развиваемая техника направлена на создание новых методов решения квазилинейных гиперболических систем уравнений, как на теоретическом, так и на численном уровне, включая и многомерную постановку. Эта техника основана на интеграции подходов искусственного интеллекта, нелинейного функционального анализа и теории законов сохранения.

A LOOK AT THE SYSTEMS OF QUASILINEAR CONSERVATION LAWS FROM THE POINT OF VIEW OF NEURAL NETWORK ALGORITHMS

Yu. G. Rykov

Keldysh Institute of Applied Mathematics,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: yu-rykov@yandex.ru

Differential equations, both ordinary and partial derivatives, are widely used to model the spread of viral infections. The inclusion of partial differential equations in the model allows us to simultaneously consider, for example, the movement of the population or take into account its age structure. At the same time, the resulting system of equations can also have a nonlinear character, including a nonlinear system of conservation laws. Recently, artificial intelligence methods, in particular neural network methods, have been increasingly used to solve such systems of equations, despite the fact that a large number of effective difference methods have been developed. This is due to the fact that neural network methods correspond well to methods of working with big data. It is worth noting that the development of artificial intelligence technologies has also stimulated a large number of mathematical studies abroad, both on the structure of neural networks, and in the fields of functional analysis and differential equations. The talk will tell about the variational formulation of the problem of finding generalized solutions for quasilinear hyperbolic systems of equations. Such a statement implies the minimization of some functional on a given function space, which allows us to naturally solve the problem using neural network methods. The found functional is essentially an error functional that differs from the traditional one (as a rule, the square of the action of the differential operator on the function). The resulting error functional takes into account the specific properties of generalized solutions, and it seems more preferable. An interesting fact is also that such an approach has an analogue in the multidimensional case. Thus, the developed technique is aimed at creating new methods for solving quasilinear hyperbolic systems of equations, both at the theoretical and numerical level, including the multidimensional formulation. This technique is based on the integration of artificial intelligence approaches, nonlinear functional analysis and the theory of conservation laws.

7-26

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СТЕРЕОТАКСИЧЕСКОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ ПРИ РАКЕ ПОЧКИ

Ж. Е. Сабельникова, М. М. Сарычева, И. А. Важенин,
Е. Я. Мозерова, А. Т. Жумбаева

ГБУЗ «Челябинский областной клинический центр
онкологии и ядерной медицины», Челябинск, Россия

E-mail: jbourakova@mail.ru

Актуальность. До недавнего времени рак почки считался крайне радиорезистентной опухолью, но возможность доставлять высокие дозы с помощью стереотаксической лучевой терапии (СТЛТ) изменила эту парадигму. При СТЛТ 5-летний локальный контроль составляет от 87 до 100%, токсичность – в основном 1–2 степени, 1-летняя общая выживаемость составляет 100%, 2-летняя – 92%. Показано отсутствие глобальных изменений почечных функций как через 2 недели после завершения лечения, так и спустя 12 месяцев.

Цель. Оценить эффективность и токсичность СТЛТ в лечении пациентов с морфологически верифицированным раком почки.

Материалы и методы исследования. В период с 2011 по 2020 гг. 25 пациентам с морфологически подтвержденным раком почки на базе Челябинского областного клинического центра онкологии и ядерной медицины была проведена СТЛТ с суммарной очаговой дозой от 30 до 45 Гр за 3–5 фракций на аппарате CyberKnife. Средний возраст больных – 67,2 лет. У 88% пациентов была I стадия рака почки. СТЛТ на первичную опухоль проведена 20 пациентам, в 6 случаях – по поводу рецидива рака почки после предшествующего хирургического лечения, в том числе у 1 пациента – по поводу рецидива рака обеих почек. Средний облучаемый объем опухоли составил 38,6 см³. Физико-техническое планирование осуществлялось по 75%-ной изодозе.

Результаты. При медиане наблюдения в 25 месяцев средняя продолжительность жизни составила 36 месяцев, 1-летняя общая выживаемость – 100%, 1-летний локальный контроль – в 100% случаев. Частичный ответ по критериям RECIST 1.1 спустя 3–6 месяцев после СТЛТ зафиксирован у 38% пациентов, в 62% – стабилизация процесса. Отмечено снижение скорости клубочковой фильтрации и, как следствие, выделительной функции почек у 28% пациентов спустя 3–6 месяцев после проведенного лечения, но к концу первого года после завершения СТЛТ функция почек во всех случаях была полностью восстановлена.

Выводы. Таким образом, СТЛТ является эффективным методом локального воздействия на опухоль почки и может рассматриваться в качестве самостоятельного варианта лечения у неоперабельных пациентов, значительно расширяя возможности радиотерапевта и хирурга в выборе тактики лечения.

PERFORMANCE EVALUATION OF STEREOTACTIC RADIATION THERAPY IN KIDNEY CANCER

Zh. E. Sabelnikova, M. M. Sarycheva, I. A. Vazhenin,
E. Ya. Mozerova, A. T. Zhumbaeva

State budgetary institution of health care «Chelyabinsk
regional clinical center of Oncology and nuclear medicine»,
Chelyabinsk, Russia

E-mail: jbourakova@mail.ru

Relevance. Until recently kidney cancer was considered an extremely radioresistant tumor, but the ability to deliver high doses using stereotactic radiation therapy (SRT) has changed this paradigm. With SRT 5-year local control is from 87 to 100%, toxicity is mainly 1–2 degrees, 1-year overall survival is 100%, 2-year – 92%. The absence of global changes in renal functions was shown both 2 weeks after completion of treatment and 12 months later.

Objective. To evaluate the efficacy and toxicity of SRT in the treatment of patients with morphologically verified kidney cancer.

Materials and research methods. In the period from 2011 to 2020 years at the Chelyabinsk Regional Clinical Center of Oncology and Nuclear Medicine 25 patients with morphologically confirmed kidney cancer underwent SRT with a total focal dose of 30 to 45 Gr in 3–5 fractions using the CyberKnife. The average age of patients is 67.2 years. 88% of patients had stage I of kidney cancer. SRT for primary tumor was performed in 20 patients, in 6 cases – for recurrent kidney cancer after previous surgical treatment, including 1 patient – for recurrent cancer of both kidneys. The average irradiated tumor volume was 38.6 cm³. Physical and technical planning was carried out at 75% isodose.

Results. With a median follow-up of 25 months the average life expectancy was 36 months, 1-year overall survival was 100%, and 1-year local control was 100% of cases. Partial response according to RECIST 1.1 criteria 3–6 months after SRT was recorded in 38% of patients, in 62% – process stabilization. A decrease in the glomerular filtration rate and, as a consequence, renal excretory function was noted in 28% of patients 3–6 months after the treatment, but by the end of the first year after the completion of SRT, renal function was fully restored in all cases.

Conclusions. Thus, SRT is an effective method of local action on a kidney tumor and can be considered as an independent treatment option in inoperable patients, significantly expanding the possibilities of a radiotherapist and a surgeon in choosing treatment tactics.

7-27

ВОЗМОЖНОСТИ ПОВТОРНОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ В ЛЕЧЕНИИ ПАЦИЕНТОВ С РЕЦИДИВАМИ ГЛИОМ НИЗКОЙ СТЕПЕНИ ЗЛОКАЧЕСТВЕННОСТИ

М. М. Сарычева^{1,2}, Р. Ю. Карабут¹,
Е. Я. Мозерова^{1,2}, А. А. Ложков¹,
Д. М. Тимохина¹, А. Ю. Максимовская¹,
Ж. Е. Сабельникова¹, Д. А. Рогачева¹

¹ГБУЗ «Челябинский областной клинический центр онкологии и ядерной медицины», Челябинск, Россия

²ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный медицинский университет», Челябинск, Россия

E-mail: Pimenovamm@mail.ru

Цель. Оценка эффективности применения повторной лучевой терапии у пациентов с рецидивами глиом низкой степени злокачественности

Материалы и методы. Были оценены результаты лечения 41 пациента с диагностированными рецидивами глиом низкой степени злокачественности, пролеченных с 2010 по 2020 г. в ГБУЗ «ЧОКЦОИЯМ». Средний возраст $48 \pm 4,7$ лет. Соотношение мужчин и женщин 2:1. Лечение рецидивов в 1-й линии включало: проведение реоперации ($n=5$), в 22 случаях повторной лучевой терапии в различных вариантах, 5 человек получали монохимиотерапию темозоломидом, комбинированное лечение проведено 9 пациентам. Лечение рецидива во 2 линии (7 пациентов): 5 пациентов получили терапию темозоломидом, 2 проведена лучевая терапия.

Результаты. Общая выживаемость (ОВ) пациентов с рецидивами глиом низкой степени злокачественности составила 72 месяца. Показатели 1-летней ОВ – 82,5%, 3-летней – 36,4%. Медиана общей выживаемости после лечения рецидива составила 35 месяцев. Возраст, пол, а также первичное гистологическое заключение пациента не влияли на показатели выживаемости. В зависимости от вида лучевой терапии: наиболее высокие показатели ОВ оказались при проведении стереотаксической лучевой терапии (СТЛТ), и чуть меньше при проведении повторной дистанционной лучевой терапии (ДЛТ): при проведении СТЛТ в 3-летней ОВ 86,4% а при проведении КЛТ 85,5% при медиане ОВ 110 и 100 мес. соответственно. При проведении только нейтронной терапии 3-летней ОВ составила только 49%, а при проведении сочетанной фотонно-нейтронной 52% ($p = 0,87$). Наилучшие показатели ОВ в лечении рецидива 1 линии, отмечены в группах проведения лучевой терапии и реоперации 134 мес. и 110 мес. соответственно. В лечении рецидивов 2 линии показатели 1-летней ОВ при проведении химиотерапии составили 86%, при проведении повторного облучения только 59% ($p = 0,76$).

Заключение. таким образом, в лечении рецидива глиом низкой степени злокачественности в первой линии следует рассмотреть вопрос о реоперации с последующим проведением курса лучевой терапии, в лечении рецидива 2 и последующих линий запланировать проведение химиотерапии.

POSSIBILITIES OF REPEATED RADIOTHERAPY IN THE TREATMENT OF PATIENTS WITH RECURRENT LOW-GRADE GLIOMA

M. M. Sarycheva^{1,2}, R. Yu. Karabut¹,
E. Ya. Mozerova^{1,2}, A. A. Lozhkov¹,
D. M. Timokhina¹, A. Yu. Maksimovskaya¹,
Zh. E. Sabelnikova¹, D. A. Rogachyova¹

¹GBUZ “Chelyabinsk Regional Clinical Center of Oncology and Nuclear Medicine”, Chelyabinsk, Russia

²FGBU “South Ural State Medical University”, Chelyabinsk, Russia

E-mail: Pimenovamm@mail.ru

Objective. To evaluate the effectiveness of repeated radiation therapy in patients with recurrent low-grade glioma.

Materials and methods. The results of treatment of 41 patients diagnosed with recurrent low-grade gliomas treated from 2010 to 2020 were evaluated, in oncologic centre Chelyabinsk. The average age is 48 ± 4.7 years. The ratio of men to women is 2:1. Treatment of relapses in the 1st line included: reoperation ($n=5$), in 22 cases of repeated radiation therapy in various variants, 5 people received monochemotherapy with temozolomide, combined treatment was given to 9 patients. Relapse treatment in 2 lines (7 patients): 5 patients received temozolomide therapy, 2 received radiation therapy.

Results. Overall survival (OS) of patients with recurrent low-grade glioma was 72 months. Indicators of 1-year OS – 82.5%, 3-year – 36.4%. Median overall survival after relapse treatment was 35 months. Age, gender, as well as the initial histological report of the patient did not affect the survival rates. Depending on the type of radiation therapy: the highest OS values were found during stereotactic radiation therapy (STLT), and slightly less during repeated external beam radiation therapy (CRT): during STLT at 3 years OS 86.4% and during CRT 85.5% with a median of 110 and 100 months, respectively. With neutron therapy alone, the 3-year OS was only 49%, and with combined photon-neutron therapy, 52% ($p = 0.87$). The best OS indicators in the treatment of 1-line recurrence were noted in the groups undergoing radiation therapy and reoperation for 134 months, and 110 months, respectively. In the treatment of second-line relapses, the 1-year OS rates during chemotherapy were 86%, and only 59% during repeated irradiation ($p = 0.76$).

Conclusion. Thus, in the treatment of recurrence of low-grade glioma in the first line, consideration should be given to reoperation followed by a course of radiation therapy; in the treatment of relapse of 2 and subsequent lines, chemotherapy should be planned.

7-28

НЕЛИНЕЙНОСТЬ ЭПИДЕМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВИРУСНЫХ ИНФЕКЦИЙ

Д. А. Семёнова¹, М. Ю. Простов², Э. В. Карамов^{1,3},
А. С. Тургиев^{1,3}, Г. Д. Каминский¹

¹Национальный медицинский исследовательский центр фтизиопульмонологии и инфекционных заболеваний Министерства здравоохранения РФ, Москва, Россия

²Закрытое акционерное общество «РИ-Системы», Москва, Россия

³Национальный исследовательский центр эпидемиологии и микробиологии имени почетного академика Н. Ф. Гамалеи Министерства здравоохранения РФ, Москва, Россия

E-mail: dianasoulmate@yandex.ru

Математическое моделирование помогает предсказать рост заболеваемости, что особенно актуально на сегодняшний день. Проведено моделирование эпидемического процесса пяти вирусных инфекций (эпидемический паротит, ветряная оспа, краснуха, корь, вирусный гепатит А) в городе Центрального федерального округа Российской Федерации с населением 146 тысяч человек на основе данных о еженедельном числе активно выявленных случаев заболевания. Всего проанализировано 83 568 случаев заболевания; период наблюдения – 30 лет. Для моделирования была использована модифицированная дифференциальная модель [1], в которую добавлен коэффициент нелинейности p :

$$\begin{cases} X' = -R\alpha XY^{(1+p)} + \mu - \mu X + kZ \\ Y' = R\alpha XY^{(1+p)} - \beta Y - \mu Y \\ Z' = \beta XY^{(1+p)} - \beta Y - \mu Y \end{cases} \quad (1)$$

где X – доля восприимчивых; Y – доля инфицированных; Z – доля иммунных; α – интенсивность заражения; β – интенсивность выздоровления; k – интенсивность потери иммунитета; R – контактное число инфекции; μ – интенсивность притока/оттока населения.

Сопоставление модельных данных с реальными проводили путем вычисления Евклидова расстояния Q и нормированного Евклидова расстояния Q_{norm} по формулам 2 и 3:

$$Q = \sqrt{\frac{\sum_0^N (I_t - M_t)^2}{N}}; \quad (2)$$

$$Q_{norm} = \sqrt{\frac{\sum_0^N \frac{(I_t - M_t)^2}{(I_t + M_t)}}{N}}; \quad (3)$$

где I_t – фактическое значение числа новых случаев за неделю t ; M_t – модельное значение числа новых случаев за неделю t ; N – число недель наблюдения; $t = 0$ – первая неделя наблюдения; $t = N$ – последняя неделя наблюдения.

Осуществлялся индивидуальный и попарный подбор параметров путем минимизации Евклидова рас-

стояния с использованием метода универсального градиентного спуска [2].

Установлено, что при трех инфекциях (ветряная оспа, краснуха, корь) эпидемический процесс линейный ($p = 0$), а при двух инфекциях (эпидемический паротит и вирусный гепатит А) – носит нелинейный характер ($p = 0,002$ и $p = 0,012$ соответственно). При данных инфекциях возможно увеличение активности передачи возбудителя по мере роста заболеваемости за счет дополнительной передачи вируса через контактированные поверхности [3].

Литература

1. **Kermack, W. O.** A contribution to the mathematical theory of epidemics [Text] / W. O. Kermack, A. G. McKendrick // Proceedings of the royal society of London. Series A, Containing papers of a mathematical and physical character. – 1927. – Vol. 115. – №. 772. – P. 700–721.
2. **Гасников, А. В.** Современные численные методы оптимизации. Метод универсального градиентного спуска [Текст]: учебное пособие. – Изд. 2-е, доп. – М.: МФТИ, 2018. – 291 с.
3. **Liu, W.** Influence of nonlinear incidence rates upon the behavior of SIRS epidemiological models [Text] / W. Liu, S. A. Levin, Y. Iwasa // Journal of mathematical biology. – 1986. – Vol. 23, №. 2. – P. 187–204.

NONLINEAR EPIDEMIC PROCESS OF VIRAL INFECTIONS

D. A. Semyonova¹, M. Y. Prostov², E. V. Karamov^{1,3},
A. S. Turgiev^{1,3}, G. D. Kaminskiy¹

¹National Medical Research Center of Phthisiopulmonology and Infectious Diseases of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

²ZAO “RY-Systems”, Moscow, Russia

³The National Research Center for Epidemiology and Microbiology named after Honorary Academician N. F. Gamaleya of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

E-mail: dianasoulmate@yandex.ru

Mathematical modeling helps to predict the growth of incidence, which is especially important today. The modeling of the epidemic process of five viral infections (mumps, chickenpox, rubella, measles, viral hepatitis A) in a town of the Central Federal District of the Russian Federation with a population of 146 thousand people was carried out on the basis of data on the weekly number of actively detected cases of the disease. A total of 83 568 cases of the disease were analyzed; the observation period was 30 years. A modified differential model [1] was used, in which the nonlinearity coefficient p was added:

$$\begin{cases} X' = -R\alpha XY^{(1+p)} + \mu - \mu X + kZ \\ Y' = R\alpha XY^{(1+p)} - \beta Y - \mu Y \\ Z' = \beta XY^{(1+p)} - \beta Y - \mu Y \end{cases}, \quad (1)$$

where X is the proportion of susceptible, Y is the proportion of infected, Z is the proportion of immune, α is the intensity of infection, β is the intensity of recovery, k is the intensity of immunity loss, R is the contact rate of in-

fection, μ is the intensity of population inflow/outflow.

The comparison of model data with real data was conducted by calculating the Euclidean distance Q and the normalized Euclidean distance Q_{norm} using formulas 2 and 3:

$$Q = \sqrt{\frac{\sum_0^N (I_t - M_t)^2}{N}}; \quad (2)$$

$$Q_{norm} = \sqrt{\frac{\sum_0^N \frac{(I_t - M_t)^2}{(I_t + M_t)}}{N}}, \quad (3)$$

where I_t is the actual value of the number of new cases at week t ; M_t is the model value of the number of new cases at week t ; N is the number of observation weeks; $t = 0$ is first week of observation, $t = N$ is last week of observation.

Individual and pairwise selection of parameters was done by minimizing the Euclidean distance using the universal gradient descent method [2].

It was found that in three infections (chickenpox, rubella, measles), the epidemic process is linear ($p = 0$), and in two infections (mumps and viral hepatitis A), it is nonlinear ($p = 0.002$ and $p = 0.012$, respectively). In these infections it is possible to increase the activity of pathogen transmission as the incidence increases due to additional transmission of the virus through contaminated surfaces [3].

References

1. **Kermack, W. O.** A contribution to the mathematical theory of epidemics [Text] / W. O. Kermack, A. G. McKendrick // Proceedings of the royal society of London. Series A, Containing papers of a mathematical and physical character. – 1927. – Vol. 115. – №. 772. – P. 700–721.
2. **Gasnikov, A. V.** Modern numerical optimization methods. The method of universal gradient descent [Text] : a textbook. – Ed. 2nd, add. – M. : MIPT, 2018 – 291 p.
3. **Liu, W.** Influence of nonlinear incidence rates upon the behavior of SIRS epidemiological models [Text] / W. Liu, S. A. Levin, Y. Iwasa // Journal of mathematical biology. – 1986. – Vol. 23, №. 2. – P. 187–204.

7-29

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕРИЙНЫХ ПОДЪЕМОВ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ

Д. А. Семёнова

Национальный медицинский исследовательский центр фтизиопульмонологии и инфекционных заболеваний
Министерства здравоохранения РФ, Москва, Россия

E-mail: dianasoulmate@yandex.ru

Понимание параметров эпидемического процесса необходимо для построения прогноза и расчета объемов воздействия на инфекционную заболеваемость. На основе реальных данных регистрируемых случаев заболевания проведено математическое моделирование серийных подъемов заболеваемости инфекций

с аэрозольным механизмом передачи (корь, краснуха, эпидемический паротит, ветряная оспа) и с фекально-оральным механизмом передачи (вирусный гепатит А) в городе с населением 146 тыс. человек. Период наблюдения: 1962–1994 годы (довакцинальный период). Моделирование производилось в базовой дифференциальной модели:

$$\begin{cases} X' = -R\alpha XY + \mu - \mu X + kZ \\ Y' = R\alpha XY - \beta Y - \mu Y \\ Z' = \beta Y - \mu Z - kZ \end{cases}, \quad (1)$$

где X – доля восприимчивых; Y – доля инфицированных; Z – доля иммунных; α – интенсивность заражения, β – интенсивность выздоровления; k – интенсивность потери иммунитета; R – контактное число инфекции; μ – интенсивность притока/оттока населения.

Сезонные колебания контактного числа R рассчитывались с использованием выражения:

$$R = R_0 \left(1 + \Delta \sin \left(\frac{2\pi(t + \theta)}{52,18} \right) \right), \quad (2)$$

где Δ – доля сезонного изменения контактного числа R ; θ – фазовый сдвиг колебаний относительно сезонов, задающий время максимальной активности механизма передачи (в неделях); R – контактное число; R_0 – базовая скорость репродукции; t – время (в неделях).

Длительность инфекционного процесса $1/\alpha$ кори составила 11 дней, краснухи – 19 дней, эпидемического паротита – 22 дня, ветряной оспы – 25 дней, вирусного гепатита А – 31 день. Время жизни в группе μ составляло 9,7 лет для всех инфекций, так как основная масса заболевших – организованные дошкольники и младшие школьники. Численность человек, находящаяся в активном контакте, составила 18 000 для инфекций с аэрозольным механизмом передачи и 3 000 для инфекции с фекально-оральным механизмом передачи. Максимальная активность механизма передачи кори, краснухи, эпидемического паротита и ветряной оспы пришлась на январь ($\theta = 40$), гепатита А – на конец августа – начало сентября ($\theta = 68$).

Путем математического моделирования с высокой точностью удалось установить значение базовой скорости репродукции R_0 : 2,4 при краснухе; 2,8 при вирусном гепатите А; 3,45 при эпидемическом паротите; 4,6 при ветряной оспе; 5,3 при кори. Данный параметр включает информацию о величине вирусовыделения, числе потенциально продуктивных контактов и активности механизма передачи инфекции. Амплитуда сезонных колебаний Δ также оказалась строго индивидуальной: 0,130 при кори; 0,240 при эпидемическом паротите; 0,250 при вирусном гепатите А; 0,285 при краснухе; 0,570 при ветряной оспе. Данный параметр зависит от активности вирусовыделения, которая может лимитировать заразительность при сезонном увеличении частоты контактов, а также от длительности сезонных подъемов заболеваемости, которая, в свою очередь, зависит от длительности инфекционного процесса и контактного числа инфекции.

Таким образом, базовая скорость репродукции R_0 и амплитуда сезонных колебаний Δ определяют

«индивидуальный портрет» инфекции на конкретной территории.

MODELING OF RECURRENT EPIDEMICS

D. A. Semyonova

National Medical Research Center of Phthisiopulmonology
and Infectious Diseases of the Ministry of Health
of the Russian Federation, Moscow, Russia

E-mail: dianasoulmate@yandex.ru

Understanding the parameters of the epidemic process is necessary to build a prognosis and calculate the amount of impact on the incidence of infectious diseases. Based on real data of registered cases of the disease, mathematical modeling of serial increases in the incidence of infections with an aerosol route of transmission (measles, rubella, mumps, chickenpox) and with a fecal-oral route of transmission (viral hepatitis A) in a town with a population of 146 thousand people was carried out. Observation period: 1962–1994 (period before vaccination). A basic differential model was used:

$$\begin{cases} X' = -R\alpha XY + \mu - \mu X + kZ \\ Y' = R\alpha XY - \beta Y - \mu Y \\ Z' = \beta Y - \mu Z - kZ \end{cases}, \quad (1)$$

where X is the proportion of susceptible, Y is the proportion of infected, Z is the proportion of immune, α is the intensity of infection, β is the intensity of recovery, k is the intensity of immunity loss, R is the contact rate of infection, μ is the intensity of population inflow/outflow.

The seasonal fluctuations of the contact rate R were calculated:

$$R = R_0 \left(1 + \Delta \sin \left(\frac{2\pi(t + \theta)}{52,18} \right) \right), \quad (2)$$

where Δ is the proportion of seasonal change in the contact rate R ; θ is the phase shift of fluctuations relative to the seasons, which sets the time of maximum activity of the transmission mechanism (in weeks); R_0 is the basic reproduction number; t is time (in weeks).

The duration of the infectious process $1/\alpha$ of measles was 11 days, rubella – 19 days, mumps – 22 days, chickenpox – 25 days, viral hepatitis A – 31 days. The life time in the group μ was 9,7 years for all infections, since most of the cases are organized preschoolers and elementary school students. The number of people in active contact was 18 000 for infections with an aerosol route of transmission and 3 000 for infections with a fecal-oral route of transmission. The maximum activity of the mechanism of transmission of measles, rubella, mumps and chickenpox was in January ($\theta = 40$), hepatitis A was at the end of August-beginning of September ($\theta = 68$).

By mathematical modeling with high accuracy, it was possible to establish the value of the basic reproduction number R_0 : 2,4 for rubella; 2,8 for viral hepatitis A; 3,45 for mumps; 4,6 for chickenpox; 5,3 for measles. This parameter includes information about the amount of virus shedding, the number of potentially productive contacts and the activity of the transmission route of infection. The

amplitude of seasonal fluctuations Δ also turned out to be strictly individual: 0,130 for measles; 0,240 for mumps; 0,250 for viral hepatitis A; 0,285 for rubella; 0,570 for chickenpox. This parameter depends on the activity of viral shedding, which can limit contagiousity with a seasonal increase in the frequency of contacts, as well as on the duration of seasonal incidence increases, which, in turn, depends on the duration of the infectious process and the contact rate of infections.

So, the basic reproduction number R_0 and the amplitude of seasonal fluctuations Δ determine the “individual portrait” of the infection in a particular area.

7-30

ПОСТРОЕНИЕ ПРОГНОЗА РАЗВИТИЯ ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ В ОЧАГАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИИ ЧЕРЕЗ ЕЖЕДНЕВНЫЕ СОЦИАЛЬНЫЕ КОНТАКТЫ ЖИТЕЛЕЙ

А. В. Тараник, С. Н. Лебедев, И. А. Литвиненко,
Г. В. Байдин, О. Н. Павленко,
М. Г. Белова, Е. В. Бесова

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: a.v.taranik@mail.ru

Для прогнозирования эпидемиологической ситуации используются агентные модели:

- расселения популяции в отдельных населенных пунктах;
- перемещения жителей между населенными пунктами;
- ежедневных социальных контактов внутри населенного пункта;
- передачи новой коронавирусной инфекции, течения заболевания и формирования иммунитета.

При прогнозировании осуществляются согласование численных параметров виртуального эпидемиологического процесса с ретроспективными фактическими данными с момента начала эпидемии. На день составления прогноза получаем индекс contagiозности и иммунное состояние популяции (соотношение иммунизированных и восприимчивых). В прогнозный период проводятся расчеты развития эпидемической ситуации с учетом возможного изменения индекса contagiозности.

Метод апробирован на прогнозировании распространения новой коронавирусной инфекции в нескольких штатах США. Сделано сравнение с ансамблевыми прогнозами распространения COVID-19, еженедельно обновляемые в Centers for Disease Control and Prevention (Центры по контролю и профилактике заболеваний США).

Представлены результаты построения прогнозов для Санкт-Петербурга и Москвы.

**MAKING A FORECAST
OF THE DEVELOPMENT
OF THE EPIDEMIOLOGICAL SITUATION
IN THE PESTHOLE OF THE SPREAD
OF VIRAL INFECTION THROUGH THE DAILY
SOCIAL CONTACTS OF RESIDENTS**

A. V. Taranik, S. N. Lebedev, I. A. Litvinenko,
G. V. Bajdin, O. N. Pavlenko,
M. G. Belova, E. V. Besova

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

E-mail: a.v.taranik@mail.ru

The following agent models are used to predict the epidemiological situation:

- resettlement of the population in individual settlements;
- movement of residents between settlements;
- daily social contacts within the settlement;
- transmission of a new coronavirus infection, the course of the disease and the formation of immunity.

When forecasting, the numerical parameters of the virtual epidemic process are reconciled with retrospective factual data from the moment the epidemic began. On the day of making the forecast, we get the index of contagiousness and the immune state of the population (the ratio of immunized and susceptible). In the forecast period, calculations of the development of the epidemic situation are carried out, taking into account the possible change in the index of contagiousness.

The method has been tested in predicting the spread of a new coronavirus infection in several US states. Comparison with ensemble COVID-19 spread forecasts updated weekly by the Centers for Disease Control and Prevention (CDC).

The results of building forecasts for St. Petersburg and Moscow are presented.

7-31

**ЭПИДЕМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС
В НЕБОЛЬШОМ КОЛЛЕКТИВЕ**

А. Л. Фальков

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: sinarit9091@mail.ru

Разработан метод моделирования вспышки инфекционного заболевания в коллективе небольшой иерархически организованной компании с офисным характером работы. Учтены формальные и неформальные социальные отношения, а также реалистическое размещение сотрудников по рабочим помещениям. Рассмотрены эффекты, обусловленные принятием различных административных мер по противодействию распространению заболевания. Показано, что

при естественном развитии эпидемического процесса общая заболеваемость в коллективе может достичь 30–70% от списочного состава сотрудников. Найдены доступные способы существенного снижения заболеваемости (на 25–60%), основанные на превентивной социальной изоляции сотрудников из среднего звена управления коллективом, а также на запрещении неформальных контактов между сотрудниками. При этом экономическая эффективность функционирования коллектива увеличивается на 10–15% по сравнению с работой в условиях эпидемической вспышки.

EPIDEMIC PROCESS IN A SMALL COMPANY

A. L. Falkov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Scientific Research Institute of Technical Physics,
Snezhinsk, Russia

E-mail: sinarit9091@mail.ru

A method to model the spread of infection in a small hierarchically organized office-type company is developed. Formal and informal social relations are considered along with a realistic distribution of the staff over the working premises. The effects caused by the adoption of various administrative measures to counteract the spread of infection are considered. Under the natural evolution of epidemic process, general infection incidence is shown to reach as much as 30–70% of the total staff. Readily available strategies to essentially reduce the infection incidence (by 25–60%) are proposed on the ground of preventive social isolation of the middle-level managerial staff and the ban of informal relations. With these strategies employed, the efficiency of the company is increased by 10–15% as compared to the conditions of uncontrolled infective episode.

7-32

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТРЫХ
И ХРОНИЧЕСКИХ ВИРУСНЫХ ИНФЕКЦИЙ**

В. В. Чернецова¹, Э. В. Карамов^{2,3}, М. Ю. Простов⁴,
Ю. И. Простов⁵, Д. А. Семёнова²,
А. С. Тургиев^{2,3}, Г. Д. Каминский²

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, Россия

²Национальный медицинский исследовательский центр
фтизиопульмонологии и инфекционных заболеваний
Министерства здравоохранения РФ, Москва, Россия

³Национальный исследовательский центр эпидемиологии
и микробиологии имени почетного академика Н. Ф. Гамалеи
Министерства здравоохранения РФ, Москва, Россия

⁴Закрытое акционерное общество «РИ-Системь»,
Москва, Россия

⁵Научно-исследовательский институт организации
здравоохранения и медицинского менеджмента
Департамента здравоохранения города Москвы,
Москва, Россия

E-mail: chernet@mail.ru

Решение дифференциальных уравнений показывает для острых инфекций наличие колебаний, для хронических инфекций – отсутствие колебаний.

Докажем это.

Выпишем уравнения без управления:

$$\begin{cases} X' = -R\alpha XY + \mu = \mu X + k(1 - X - Y) \\ Y' = R\alpha XY - \beta Y - \mu Y \end{cases},$$

где X – доля восприимчивых; Y – доля инфицированных; α – интенсивность заражения; β – интенсивность выздоровления; k – интенсивность потери иммунитета; R – контактное число инфекции; μ – интенсивность притока/оттока населения.

Данная система имеет два стационарных решения (X_1, Y_1) и (X_2, Y_2) :

$$\begin{cases} X_1 = 1 \\ Y_1 = 0 \end{cases}$$

и

$$\begin{cases} X_2 = \frac{\beta + \mu}{R\alpha} \\ Y_2 = \frac{(k + \mu)(R\alpha - \beta - \mu)}{R\alpha(\beta + k + \mu)} \end{cases}.$$

Первое стационарное решение соответствует удалению возбудителя из популяции (тривиальное стационарное решение), второе – приживлению возбудителя в популяции (нетривиальное стационарное решение).

Найдем область устойчивости в первом приближении для 2-го стационарного решения. Область устойчивости определяется системой неравенств

$$\begin{cases} \det(Jac(X_2, Y_2)) > 0 \\ \text{tr}(Jac(X_2, Y_2)) < 0 \end{cases},$$

где

$$\det(Jac(X_2, Y_2)) = (k + \mu)(R\alpha - \beta - \mu)$$

$$\text{tr}(Jac(X_2, Y_2)) = -\frac{(k + \mu)(R\alpha + k)}{\beta + k + \mu}.$$

Получаем систему неравенств

$$\begin{cases} (k + \mu)(R\alpha - \beta - \mu) > 0 \\ \frac{(k + \mu)(R\alpha + k)}{\beta + k + \mu} > 0 \end{cases}, \quad (1)$$

которая определяет область устойчивости второго решения.

Для устойчивого фокуса надо, чтобы выполнялось неравенство

$$(\text{tr}(Jac(X_2, Y_2)))^2 - 4 \det(Jac(X_2, Y_2)) < 0.$$

Последнее неравенство можно записать в виде

$$\det(Jac(X_2, Y_2)) > \frac{(\text{tr}(Jac(X_2, Y_2)))^2}{4}.$$

Получаем неравенство

$$(k + \mu)(R\alpha - \beta - \mu) > \frac{1}{4} \frac{(k + \mu)^2 (R\alpha + k)^2}{(\beta + k + \mu)^2}. \quad (2)$$

Неравенства (1) и (2) определяют область устойчивого фокуса.

Решая систему неравенств (1) и (2) для острой инфекции ($\alpha = \beta$), находим область с устойчивым фокусом. Даже при очень малых значениях α , то есть больших значениях времени оборота инфекции, система, по-прежнему, совершает колебания. Исходя из полученной системы неравенств заключаем, что нетривиальное стационарное состояние представляет собой фокус, то есть наблюдаются колебания вокруг стационарного состояния.

Таким образом, для острых инфекций характерна цикличность эпидемического процесса. Так, динамика заболеваемости новой коронавирусной инфекцией COVID-19 характеризуется наличием колебаний («первая», «вторая» волны).

Для хронических инфекций $k = 0, \beta = 0$ – выздоровления не происходит. В этом случае неравенства (1) и (2) примут вид

$$\begin{cases} \mu(R\alpha - \mu) > 0 \\ R\alpha > 0 \\ \mu(R\alpha - \mu) > (R\alpha)^2/4 \end{cases}.$$

Преобразуем систему неравенств к виду

$$\begin{cases} \mu(R\alpha - \mu) > 0 \\ R\alpha > 0 \\ 0 > (R\alpha - 2\mu)^2 \end{cases}.$$

Видим, что нет решений. Получаем, что хронические инфекции не имеют устойчивых фокусов в окрестности нетривиального стационарного решения, возможны только узлы – без колебаний.

Эпидемический процесс при хронических инфекциях не носит циклического характера, так как не характеризуется формированием популяционного иммунитета. Динамика заболеваемости ВИЧ-инфекцией с начала эпидемии описывалась «накоплением» случаев, резким ростом заболеваемости в ключевых группах населения, после – выходом заболеваемости на стационарное состояние.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России: грант № 075-11-2020-011 (13.1902.21.0040) в рамках договора 006.20/5 от 14.12.2020 г.

MODELING OF ACUTE AND CHRONIC VIRAL INFECTIONS

V. V. Chernetsova¹, E. V. Karamov^{2, 3}, M. Y. Prostov⁴,
Y. I. Prostov⁵, D. A. Semyonova²,
A. S. Turgiev^{2, 3}, G. D. Kaminskiy²

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National Research University “MEI”», Moscow, Russia

²Federal State Budgetary Institution “National Medical Research Center of Phthisiopulmonology and Infectious Diseases” of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

³Federal State Budgetary Institution “The National Research Center for Epidemiology and Microbiology named after Honorary Academician N. F. Gamaleya” of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

⁴ZAO “RY-Systems”, Moscow, Russia

⁵State Budgetary Institution “Research Institute for Healthcare and Medical Management of Moscow Healthcare Department”, Moscow, Russia

E-mail: chernet@mail.ru

The solution of differential equations shows the presence of fluctuations for acute infections, and the absence of fluctuations for chronic infections.

Let's prove it.

Let's write out the equations without parameters of control:

$$\begin{cases} X' = -R\alpha XY + \mu = \mu X + k(1 - X - Y) \\ Y' = R\alpha XY - \beta Y - \mu Y \end{cases},$$

where X is the proportion of susceptible, Y is the proportion of infected, α is the intensity of infection, β is the intensity of recovery, k is the intensity of immunity loss, R is the contact rate of infection, μ is the intensity of population inflow/outflow.

This system has two stationary solutions: (X_1, Y_1) and (X_2, Y_2) :

$$\begin{cases} X_1 = 1 \\ Y_1 = 0 \end{cases}$$

and

$$\begin{cases} X_2 = \frac{\beta + \mu}{R\alpha} \\ Y_2 = \frac{(k + \mu)(R\alpha - \beta - \mu)}{R\alpha(\beta + k + \mu)} \end{cases}.$$

The first stationary solution corresponds to the removal of the infectious agent from the population (a trivial stationary solution), the second corresponds to the engraftment of the infectious agent in the population (a non-trivial stationary solution).

Let's find the stability domain in the first convergence for the second stationary solution. The stability domain is determined by a system of inequations

$$\begin{cases} \det(Jac(X_2, Y_2)) > 0 \\ \text{tr}(Jac(X_2, Y_2)) < 0 \end{cases},$$

where

$$\det(Jac(X_2, Y_2)) = (k + \mu)(R\alpha - \beta - \mu)$$

$$\text{tr}(Jac(X_2, Y_2)) = -\frac{(k + \mu)(R\alpha + k)}{\beta + k + \mu}.$$

We get a system of inequations

$$\begin{cases} (k + \mu)(R\alpha - \beta - \mu) > 0 \\ \frac{(k + \mu)(R\alpha + k)}{\beta + k + \mu} > 0 \end{cases}, \quad (1)$$

which determines the stability domain of the second solution.

For a stable focus, it is necessary that the inequality is fulfilled

$$(\text{tr}(Jac(X_2, Y_2)))^2 - 4\det(Jac(X_2, Y_2)) < 0.$$

The last inequality can be written as

$$\det(Jac(X_2, Y_2)) > \frac{(\text{tr}(Jac(X_2, Y_2)))^2}{4}.$$

We get the inequation

$$(k + \mu)(R\alpha - \beta - \mu) > \frac{1}{4} \frac{(k + \mu)^2 (R\alpha + k)^2}{(\beta + k + \mu)^2}. \quad (2)$$

Inequations (1) and (2) define the domain of stable focus.

Solving the system of inequations (1) and (2) for acute infection ($\alpha = \beta$), we find a domain with a stable focus. Even at very small values of α , that is, large values of the infection turnover time, the system still oscillates. On the basis of the system of inequations we conclude that a non-trivial stationary state is a focus, that is, fluctuations around the stationary state are observed.

Acute infections are characterized by the cyclical nature of the epidemic process. So, the dynamics of the incidence of the new coronavirus infection COVID-19 is characterized by the presence of fluctuations (“first”, “second” waves).

For chronic infections ($k = 0, \beta = 0$) there is no recovery. In this case, inequations (1) and (2) will take the form

$$\begin{cases} \mu(R\alpha - \mu) > 0 \\ R\alpha > 0 \\ \mu(R\alpha - \mu) > (R\alpha)^2/4 \end{cases}.$$

Let's transform the system of inequations to the form

$$\begin{cases} \mu(R\alpha - \mu) > 0 \\ R\alpha > 0 \\ 0 > (R\alpha - 2\mu)^2 \end{cases}.$$

We can see that there are no solutions. We find that chronic infections do not have stable foci in the vicinity of a non-trivial stationary solution, only nodes are possible, without fluctuations.

The epidemic process in chronic infections is non-cyclical, because it is not characterized by the formation of community immunity. The dynamics of the incidence of HIV infection since the beginning of the epidemic was described by the “accumulation” of cases, a sharp increase in the incidence in core groups, and then the incidence reached a stationary state.

This work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation: grant No. 075-11-2020-011 (13.1902.21.0040) under the agreement 006.20/5 of 14.12.2020.

7-33

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ АКУСТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ В МЕДИЦИНЕ: ТЕОРИЯ И АЛГОРИТМЫ

М. А. Шишленин^{1,2}, Н. С. Новиков^{1,2},
С. И. Кабанихин^{1,2}

¹Институт вычислительной математики и математической
геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет,
Новосибирск, Россия

E-mail: mshishlenin@ngs.ru, novikov-1989@yandex.ru,
ksi52@mail.ru

В работе представлена математическая модель акустической томографии на основе законов сохранения, которая не только описывает такие эффекты, как дифракция, преломление, реакция и акустическое поглощение неоднородных сред на физическом уровне, но и позволяет моделировать диаграммы направленности источников и приемников [1]. Гиперболическая система первого порядка позволяет нам предложить более реалистичную модель с физической точки зрения. Эти уравнения получены непосредственно из законов сохранения механики сплошных сред. Это позволяет нам контролировать сохранение основных инвариантов при решении прямых и обратных задач, что является важным при решении неустойчивых задач, так как законы сохранения основных инвариантов являются критерием правильности решения.

Исследована математическая модель распространения двумерных акустических волн в однородных и гетерогенных областях с неотражающими граничными условиями.

Разработан метод решения коэффициентной обратной задачи восстановления плотности и скорости распространения звука в среде по дополнительной информации о давлении, измеряемой на границе исследуемой среды [2]. Обратная задача сводится к задаче оптимизации, которая решается методом градиентного спуска [3]. Приведены результаты численных расчетов. Проведен сравнительный анализ двух подходов для вычисления градиента функционала [4].

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ 19-11-00154.

Литература

1. **Kabanikhin, S. I.** Numerics of acoustical 2D tomography based on the conservation laws [Text] / S. I. Kabanikhin, D. V. Klyuchinskiy, N. S. Novikov, M. A. Shishlenin // Journal of Inverse and Ill-posed Problems. – 2020. – 28:2, 287–297.
2. **Klyuchinskiy, D. V.** Recovering Density and Speed of Sound Coefficients in the 2D Hyperbolic System of Acoustic Equations of the First Order by a Finite Number of Observations [Text] / D. V. Klyuchinskiy, N. S. Novikov, M. A. Shishlenin // Mathematics. – 2021. – 9:2, 199.
3. **Klyuchinskiy, D. V.** Modification of gradient descent method for solving coefficient inverse problem for acoustics equations [Text] / D. V. Klyuchinskiy, N. S. Novikov, M. A. Shishlenin // Computation. – 2020. – 8:3, 73.

4. **Klyuchinskiy, D. V.** CPU-time and RAM memory optimization for solving dynamic inverse problems using gradient-based approach [Text] / D. V. Klyuchinskiy, N. S. Novikov, M. A. Shishlenin // Journal of Computational Physics. – 2021. – Vol. 439. – 110374.

INVERSE PROBLEMS OF ACOUSTIC TOMOGRAPHY IN MEDICINE: THEORY AND ALGORITHMS

M. A. Shishlenin^{1,2}, N. S. Novikov^{1,2}, S. I. Kabanikhin^{1,2}

¹Institute of Computational Mathematics and Mathematical
Geophysics, Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

E-mail: mshishlenin@ngs.ru,
novikov-1989@yandex.ru, ksi52@mail.ru

The paper presents a mathematical model of acoustic tomography based on conservation laws, which not only describes such effects as diffraction, refraction, reaction and acoustic absorption of inhomogeneous media at the physical level, but also allows modeling the radiation patterns of sources and receivers [1]. The first-order hyperbolic system allows us to offer a more realistic model from a physical point of view. These equations are derived directly from the conservation laws of continuum mechanics. This allows us to control the preservation of the basic invariants when solving direct and inverse problems, which is important when solving unstable problems, since the laws of conservation of the basic invariants are the criterion for the well-posedness of the solution.

A mathematical model of the propagation of two-dimensional acoustic waves in homogeneous and heterogeneous regions with non-reflecting boundary conditions is investigated.

A method has been developed for solving the coefficient inverse problem of restoring the density and velocity of sound propagation in a medium from additional information about the pressure measured at the boundary of the medium under study [2]. The inverse problem is reduced to the optimization problem, which is solved by the gradient descent method [3]. The results of numerical calculations are presented. A comparative analysis of two approaches for calculating the gradient of the functional is investigated [4].

The work was supported by RSCF project 19-11-00154.

References

1. **Kabanikhin, S. I.** Numerics of acoustical 2D tomography based on the conservation laws [Text] / S. I. Kabanikhin, D. V. Klyuchinskiy, N. S. Novikov, M. A. Shishlenin // Journal of Inverse and Ill-posed Problems. – 2020. – 28:2, 287–297.
2. **Klyuchinskiy, D. V.** Recovering Density and Speed of Sound Coefficients in the 2D Hyperbolic System of Acoustic Equations of the First Order by a Finite Number of Observations [Text] / D. V. Klyuchinskiy, N. S. Novikov, M. A. Shishlenin // Mathematics. – 2021. – 9:2, 199.
3. **Klyuchinskiy, D. V.** Modification of gradient descent method for solving coefficient inverse problem for acoustics equations

[Text] / D. V. Klyuchinskiy, N. S. Novikov, M. A. Shishlenin // Computation. – 2020. – 8:3, 73.

4. **Klyuchinskiy, D. V.** CPU-time and RAM memory optimization for solving dynamic inverse problems using gradient-

based approach [Text] / D. V. Klyuchinskiy, N. S. Novikov, M. A. Shishlenin // Journal of Computational Physics. – 2021. – Vol. 439. – 110374.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Абдуллина Д. Н. 108, 144
 Авилов К. К. 223
 Адамов Е. О. 5, 158
 Адарченко В. А. 154
 Адуев Б. П. 61
 Алексеев Д. И. 20
 Алёхина Н. А. 41
 Ананьев А. И. 58
 Ананьева М. В. 51, 52, 231
 Андреев Е. С. 94
 Андрияш А. В. 17
 Аникин Н. Б. 155, 171
 Анисичкин В. Ф. 11, 109
 Антипов М. В. 13, 31
 Антипова Т. В. 44
 Антонелли Л. 5
 Антонов И. М. 41
 Аракчеев А. С. 73
 Арапов Ю. Д. 123
 Астафьев В. В. 148
 Атлуханов М. Г. 16
 Ахлюстин И. А. 42, 44
 Ахметзянов А. И. 43
 Ахметов А. Р. 16

Б

Багаветдинов Н. Г. 54
 Бадретдинова Л. Х. 44, 47
 Базотов В. Я. 44, 47
 Байдин Г. В. 254
 Бакиров А. Р. 41, 44, 47, 68, 72
 Бак П. А. 34
 Бакуркина Е. С. 94
 Балута В. И. 224
 Балущкин С. В. 11, 185
 Балькина Ю. Е. 225
 Барбато Ф. 5
 Баренбаум А. А. 12
 Басов Е. В. 92, 99
 Баталова И. А. 44
 Батани Д. 5
 Баутин С. П. 26, 181, 182, 195
 Башкин Д. И. 96, 98
 Безбородова П. А. 128
 Безгодов Е. В. 155, 171, 173
 Бекетов А. П. 47
 Беленовский Ю. А. 42, 44
 Белова М. Г. 254
 Беляев П. Е. 45
 Беляков В. И. 11
 Бесова Е. В. 254
 Бликов А. О. 13
 Блинов А. В. 31
 Блинов И. А. 13
 Бойко М. М. 116
 Болдырев М. И. 184

Борецких Д. В. 218
 Боровский И. О. 185
 Борцов А. А. 127, 280
 Борщев Ю. П. 58
 Боту Г. 5
 Боярских К. А. 110
 Боярченков А. С. 164
 Брагин А. А. 229, 230
 Брантов А. В. 84
 Бродова И. Г. 111, 148
 Брызгин А. А. 41, 77
 Бугаенко А. А. 186
 Буйко А. М. 112
 Булгакова Н. Г. 92
 Бурдаков А. В. 16
 Бут Н. 5
 Быченков В. Ю. 84, 94
 Бэйрд К. Д. 5

В

Важенин И. А. 250
 Вазиев Э. М. 207
 Вайс О. Е. 84
 Валиев Р. Н. 44, 47
 Ван С. 153
 Ванчинов А. В. 48
 Варанд А. В. 41
 Варыханов С. С. 226
 Вдовин В. В. 240
 Вергелес С. С. 24
 Веселова Е. И. 226, 234
 Ветчинников М. В. 187
 Вирченко В. А. 43
 Вихляев Д. А. 96
 Вичев И. Ю. 85, 96
 Вишняков А. Ю. 187
 Власов В. В. 157, 210, 228, 229, 230, 237, 238
 Волков В. И. 188
 Володина Н. А. 79, 196
 Волошин Н. П. 158
 Воробьев А. В. 123
 Воробьев М. А. 54
 Воронин Д. С. 113, 128
 Вронский А. В. 215
 Вулси Н. 5
 Вэй И 181
 Вэй Ляо 153
 Вэймин Ян 107

Г

Гаан К. В. 56, 111, 136, 141
 Габдрахманов И. М. 86
 Гавико В. С. 71
 Гаврилов А. С. 240
 Гагаркин Д. М. 47, 48
 Гаджиев А. Д. 207
 Гайсина К. А. 74
 Галиуллин И. Г. 47, 48
 Галкина В. В. 51, 52

Гаранин С. Г. 89
 Гармашев А. Ю. 27, 41, 42, 44, 47, 55, 63, 64, 66,
 67, 68, 72, 77, 127, 280
 Георгиевская А. Б. 13
 Герасимов К. Б. 77
 Гилев С. Д. 114, 115, 116
 Глазунов В. А. 187, 211
 Глазырин И. В. 155, 184, 202
 Глазырин С. И. 87
 Гнутов И. С. 32, 35
 Говрас Е. А. 86
 Гордеев И. Н. 11
 Горин Н. В. 157, 158
 Горнов В. Н. 89
 Городничев К. Е. 87
 Грачева Н. А. 138
 Грачёва Н. А. 189
 Гремитских А. С. 48
 Грецова А. Н. 48
 Гроховский В. И. 14, 131
 Грушин А. С. 85, 96
 Грязнов Е. Ф. 116
 Губский К. Л. 89
 Губченко В. М. 87
 Гударенко Л. Ф. 119
 Гужова А. Р. 28, 36
 Гуськов С. Ю. 89, 91
 Гущин М. А. 99

Д

Давлетчин Ю. Ф. 155, 171
 Давыдов Д. И. 71
 Давыдов Н. Б. 13
 Данилов В. В. 16
 Дегтярев А. А. 33, 117, 120
 Дегтяренко Л. И. 36
 Дементьев О. Н. 190
 Демина М. А. 187
 Денисенко В. П. 160
 Деркач В. Н. 89
 Дерябин А. М. 229, 230
 Дерябин С. Л. 199
 Джиуффрида Л. 5
 Долгих А. В. 15
 Долгих С. М. 33, 56, 66
 Долматов В. Ю. 65
 Доль Л. Н. К. 5
 Доценко В. В. 192
 Драморецкая Я. С. 166
 Дрёмов В. В. 124, 126, 146
 Дудник Д. П. 47, 48
 Дунаев В. Н. 47
 Дырда Н. Д. 172
 Дьячков С. А. 97
 Дюрей Ф. 5
 Дюрягина Н. С. 190

Е

Еганов К. В. 42, 48

Егорова Л. Ю. 122
 Елшина Л. А. 108, 111
 Елькин В. М. 130
 Ельцов И. В. 41
 Емельянова Е. Ю. 47, 192
 Ермаков А. Е. 71
 Ермолаев Б. С. 49
 Ерофеев А. М. 208
 Ерунов С. В. 13
 Ершова Л. С. 154
 Ершов А. П. 51
 Еселевич Д. А. 58, 147
 Еськов Н. С. 188

Ж

Жданок А. А. 118
 Жерноклетов М. В. 119
 Живанков К. И. 16
 Жугин Ю. Н. 143
 Жуланов В. В. 27
 Жумбаева А. Т. 250

З

Завьялов З. И. 127, 280
 Замыслов Д. Н. 13
 Захарова О. И. 239
 Захаров В. В. 225
 Захаров П. П. 87
 Зацепин О. В. 229, 230
 Звеков А. А. 51, 52, 231
 Зверев А. С. 51, 52, 53, 231
 Зеленов А. Н. 23
 Зельдович В. И. 33, 120, 144
 Золотарев К. В. 73
 Зубавичус Я. В. 73
 Зудин И. Ю. 99

И

Иванов В. П. 92
 Ильякова Н. Н. 53
 Илютина О. С. 192
 Исмаилов Ш. М. 17
 Исупова А. А. 122

К

Кабаев А. А. 187
 Кабаев С. А. 187
 Кабанихин С. И. 258
 Кагани Д. 5
 Казак А. А. 43
 Казаков А. Г. 89
 Казаков Д. Н. 131
 Казанцева Н. В. 122
 Казачинский А. О. 193
 Какшин А. Г. 102
 Калашников Д. А. 32, 35
 Каленский А. В. 51, 52, 231

Кальманов А. В. 117
 Каменев В. Г. 17, 123
 Каминский Г. Д. 226, 230, 232, 233, 234, 242, 243, 244, 252, 255
 Каплунов А. В. 16
 Каплюков Г. В. 17
 Капранов К. О. 57
 Карабут Р. Ю. 247, 251
 Караваев А. В. 124, 126, 146
 Карамов Э. В. 7, 226, 230, 234, 252, 255
 Карандеев А. А. 226
 Карачинский И. А. 34
 Карачинский С. И. 54
 Каримов Ф. Х. 125, 236
 Карлыханов Н. Г. 94, 193, 212
 Карманов А. Л. 157, 210, 229, 230, 237
 Карпеев А. В. 194
 Кассан-Оглы Ф. А. 213
 Качаев В. П. 11
 Кашкаров А. О. 27, 55, 65, 73, 79
 Каякин А. А. 119
 Ким Д. А. 85, 96
 Кингсеп С. С. 160
 Кириллов И. А. 155, 160, 161, 173
 Кискин А. Е. 56
 Кичигин Р. М. 126, 146
 Клёнов А. И. 127, 280
 Клёнов А. Н. 148
 Климов А. В. 203
 Клиначева Н. Л. 149
 Клыпин В. В. 15
 Князев В. Н. 13
 Ковалев А. Е. 117
 Ковалев Ю. М. 135
 Колесников П. А. 16, 34
 Колесников С. А. 16
 Колесов В. И. 57, 60
 Колобянин В. Ю. 36
 Кольчугин С. В. 96
 Кондратьев А. А. 98
 Кондратьев А. Н. 17
 Коновалова А. Ю. 73
 Коновалов А. Б. 238
 Коновалов А. Н. 60
 Кононов С. Н. 195
 Константинов А. Ю. 139
 Конюкова А. В. 58, 147
 Королёв А. С. 96
 Коротаева З. А. 118
 Косолапов И. Э. 42
 Косолапов К. Э. 44
 Костеров Д. А. 57, 58, 71
 Костин Г. Ф. 190
 Костицын О. В. 63, 64, 66, 67, 68
 Котин А. В. 13
 Котова О. Г. 155
 Кочетков Ю. В. 89
 Кошелева Е. В. 30
 Коэмец Ю. Н. 122
 Кравченко В. В. 89
 Крайко А. Н. 18

Крайнов А. Ю. 59, 200
 Красников В. С. 128, 142
 Краюхин С. А. 196
 Кривошеев С. И. 20
 Крупников К. К. 143
 Крутова И. Ю. 186, 197
 Крюков В. М. 155
 Ксенофонтов А. И. 161
 Кубасов П. В. 17, 123
 Кузнецов А. В. 139
 Кузнецов А. П. 89
 Кузнецов В. А. 118
 Кузнецов Е. В. 158
 Кузнецов П. А. 128
 Кузнецов Ю. А. 101
 Кулаков Е. В. 13
 Куленко Я. В. 34
 Куликов В. Г. 43
 Куликов Г. В. 11, 185
 Купер К. Э. 73
 Куратов А. С. 84
 Куратов С. Е. 17, 87
 Курбатова Е. И. 161
 Куркучеков В. В. 16
 Куропаткин Ю. П. 143, 146
 Кучинов В. П. 157, 158
 Кучко Д. П. 19, 27, 29, 123
 Кучугов П. А. 91

Л

Ланкастер К. 5
 Ларичев М. Н. 162
 Латыпов Ф. Т. 128
 Лебедев С. Н. 201, 229, 230, 254
 Левак К. В. 56
 Левашкин С. П. 239
 Левашов П. Р. 97, 129, 134
 Левунина Э. С. 195
 Левшенков А. И. 57
 Лепёхин Н. М. 92
 Ли Кэ-у 179
 Липатников М. А. 185, 212
 Ли Тао 179, 181
 Литвиненко И. А. 254
 Лобода Е. А. 102
 Лобода П. А. 96, 102
 Лобойко Б. Г. 64, 68
 Лобок М. Г. 84, 94
 Ложков А. А. 247, 251
 Ломоносов И. В. 129
 Лоскутов Е. М. 240, 241
 Лупанов В. Г. 138
 Лыков В. А. 94, 193, 216, 218
 Лягина Е. Л. 216
 Лянан Чжо 153
 Лян Сунь 107

М

Магазинов С. Г. 20

Магазов Ф. Г. 217
 Майер А. Е. 113, 128, 138, 142, 189
 Майер П. Н. 138
 Майорова А. С. 131
 Макальский Л. М. 101
 Макеева И. Р. 45, 163, 166, 172, 217
 МакКенна П. 5
 Максимовская А. Ю. 247, 251
 Малев В. В. 27
 Малюгина С. Н. 131
 Манахова Е. С. 60
 Манзук М. В. 20
 Мареев Е. А. 99
 Мартыненко А. С. 5
 Мастюк Д. А. 45
 Мезенцев А. В. 199
 Мезенцев Н. А. 73
 Мелехов А. П. 89
 Мелихов А. С. 160
 Мерфи К. Д. 5
 Микрюков П. А. 99
 Минаев И. В. 212
 Минаков Д. В. 129, 134
 Миронова Е. Е. 124
 Мирошкин К. М. 42, 44
 Мирошниченко В. П. 92
 Митрофанов А. Ю. 53
 Михайленко М. А. 41, 77
 Михайлов В. Н. 130, 133
 Михайлов Н. А. 155, 184, 202
 Михайлюк А. В. 89
 Мозерова Е. Я. 247, 250, 251
 Моисеева К. М. 200
 Мокрушин С. С. 131
 Мошкин Д. Л. 155, 171
 Музыря А. К. 11, 22, 54, 55
 Мурадымов Р. В. 111
 Мустафин А. М. 201
 Муфтахетдинова Р. Ф. 131
 Мухина А. Ю. 241
 Мухин Д. В. 27
 Мухин Д. Н. 240, 241
 Мухин И. Б. 89
 Мытарев М. С. 131
 Мытарев С. В. 54

Н

Назаров К. С. 202
 Наймарк О. Б. 132
 Натыньчик В. С. 203
 Наумова М. Ю. 101
 Наумов А. О. 196, 203
 Некрасов К. А. 164
 Нескин А. Г. 23
 Нижегородцев В. И. 143, 146
 Никитин О. А. 16, 34
 Никифоров Д. А. 34
 Никифоров М. В. 11, 155, 171
 Николаев А. Ю. 143
 Николаев Ю. В. 182

Николенко А. Д. 73
 Никульшин М. В. 185, 192, 212
 Ничипурук А. П. 122
 Новиков Н. С. 258
 Новиков С. И. 71
 Новоселов К. В. 23
 Ногин В. Н. 19, 188, 204
 Ноймайер П. 5
 Носуленко Д. С. 96
 Нурмухаметов Д. Р. 53, 61

О

Образцов Г. К. 65
 Обухов А. Г. 205
 Овечкин А. А. 96, 102, 130
 Огородников В. А. 13, 31
 Огородников Л. Л. 24
 Опрышко О. В. 206
 Орлов А. И. 92, 99
 Орлова Н. Ю. 148
 Охрименко М. Ю. 92

П

Павленко А. В. 131, 155
 Павленко О. Н. 254
 Павлов О. А. 34
 Палицин А. В. 99
 Пальчиков Е. И. 15
 Панкратов Д. Г. 19, 123, 133, 137
 Панов К. Н. 13
 Парамонов М. А. 129, 134
 Пасюков С. Д. 11, 155, 171
 Пахомов С. Н. 89, 98
 Пашенцева Н. Н. 201
 Пен Чжао 153
 Первиненко В. Н. 157, 237
 Перегудов П. А. 48
 Перменов Д. Г. 58, 71
 Петрова А. Н. 111
 Петров Д. В. 27, 143
 Петухов Е. А. 127, 280
 Пешкичева Л. Е. 89, 96
 Пешкичев И. В. 166
 Пигасов Е. Е. 45
 Пикуз С. А. 5, 89
 Пицхелаури С. С. 164
 Плаксин В. Ю. 160
 Погорелко В. В. 128
 Подувалов А. Н. 31
 Покаташкин П. А. 167
 Политов В. Ю. 16
 Полюхин А. С. 97
 Помесячная Е. С. 231
 Помыкалов Е. В. 135
 Пономарёва Т. В. 207
 Понькин Е. И. 26
 Попов В. В. 136, 141
 Попова Е. Н. 136, 141
 Попов И. А. 155, 171

Попов С. С. 16
 Попруженко С. В. 89
 Попцов А. Г. 19, 123, 133, 137
 Порязов В. А. 59
 Потапов А. В. 98
 Потеряева Е. А. 54
 Просвирнин К. М. 42, 44, 48, 55
 Простов М. Ю. 242, 243, 244, 252, 255
 Простов Ю. И. 226, 234, 244, 255
 Прууэл Э. Р. 23, 27, 29, 55, 73, 79
 Пугачев В. Ю. 172
 Пуресев Н. И. 92
 Пхайко Н. А. 89, 98

Р

Разоренов С. В. 108, 111, 144
 Разумков Е. А. 35
 Ракшун Я. В. 73
 Распоиенко Д. Ю. 111
 Ращенко С. В. 73
 Резцова Т. В. 196
 Рен Й. 153
 Рогачева Д. А. 247, 251
 Рогозкин Д. Б. 17
 Родин А. В. 166
 Родионов Е. С. 138, 189
 Розмей О. 5
 Романов И. Н. 143, 146
 Романюха А. А. 248
 Рубцов И. А. 27, 55, 62, 73
 Рубцова О. О. 154
 Рудина А. Х. 63, 64, 67, 68
 Русинов Г. Л. 64, 69
 Рыкованов В. С. 207
 Рыкованов Г. Н. 94, 229, 230
 Рыков Ю. Г. 249
 Рябчун А. М. 15
 Рязанцев С. Н. 5

С

Сабельникова Ж. Е. 247, 250, 251
 Савельев В. В. 167
 Савенков Г. Г. 139
 Савин Д. А. 161
 Савченко К. В. 143, 146
 Садовский А. А. 168
 Саломов Н. Г. 125
 Самарин С. И. 229, 230
 Самарина С. В. 154
 Самойленко М. С. 15
 Самсонова Н. С. 187
 Сантос Ж. Ж. 5
 Сапожников Ф. А. 207
 Сапунов В. А. 167
 Сарафанников А. В. 47, 48, 55, 74
 Сарычева М. М. 247, 250, 251
 Сатонкина Н. П. 65, 78
 Сафонов С. Е. 241
 Сафронов К. В. 89

Сахаров М. Ю. 192
 Сеитов Д. 164
 Селезнев А. Ф. 240
 Селемир В. Д. 143, 146
 Сельченкова Н. И. 30
 Семёнов А. Ю. 141
 Семёнова Д. А. 226, 234, 242, 243, 252, 253, 255
 Сергеев А. В. 167
 Середкин Н. Н. 140
 Серов С. А. 98
 Серяков Ю. Д. 211
 Сидоров К. С. 127, 280
 Сизов Е. А. 208
 Симоненко В. А. 155, 169, 171, 173
 Симонов А. Ю. 11, 185
 Симонов О. А. 209
 Скобелев И. Ю. 5
 Сквородин Д. И. 16
 Смирнов Е. Б. 23, 27, 29, 33, 41, 42, 47, 48, 55, 66, 77, 120, 127, 143, 148, 280
 Смирнов Н. А. 130, 140
 Смирнов Ю. Ю. 96
 Соболевская А. В. 48, 72
 Согрина О. Б. 31
 Соколов А. В. 229, 230
 Соколов Л. В. 218
 Соколов М. А. 66
 Соловьёв А. А. 89
 Соломин Н. А. 229, 230
 Соломянная А. Д. 85, 96
 Сорокин И. А. 98
 Софронов В. Н. 187
 Спидное К. 5
 Спиринов И. А. 79
 Станкевич А. В. 41, 44, 47, 48, 63, 64, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 77
 Стародубов С. В. 196
 Старостенко Д. А. 34
 Стаценко В. П. 28
 Степанов А. С. 11
 Степанова Н. В. 118
 Столбовский А. В. 136, 141
 Столяров В. В. 139
 Столяров П. Н. 58, 71
 Стрельцова М. С. 72
 Студенников А. А. 55, 73
 Стучебрюхов И. А. 141
 Суй Чжилэй 180
 Сухаревский Д. И. 99
 Сырунин М. А. 13
 Сыроев В. С. 92, 99, 101
 Сяоси Дуань 107
 Ся Ян 153

Т

Табагчиков А. А. 212
 Тайбинов Н. П. 41, 44, 47, 63, 64, 66, 67, 68, 69, 72, 74
 Тараканов А. А. 11, 155, 171
 Тараник А. В. 254

Тарасов А. Ю. 74
 Гаржанов В. И. 75, 123
 Ген К. А. 23, 27, 29, 55, 73, 79
 Теплых Н. А. 157, 210, 229, 230, 237
 Тимохина Д. М. 247, 251
 Титаренко Н. Ю. 102
 Титов В. В. 192
 Титова В. Б. 79
 Тихов А. А. 17
 Тихонов Н. Н. 190
 Тищенко А. С. 98
 Толочко Б. П. 27, 41, 73, 77
 Толщина С. Г. 69
 Томилов Ю. А. 174
 Третьяченко Ю. В. 28
 Тришин Р. А. 211
 Трунев Ю. А. 16
 Тулаева Н. Н. 212
 Туманик А. С. 29
 Тургиев А. С. 226, 230, 234, 252, 255
 Тур И. В. 17
 Турянска О. 5
 Тяктев А. А. 155, 171

У

Уймин М. А. 71
 Ульянов В. А. 60
 Ульянов С. М. 11
 Ураков М. С. 229, 230
 Урлин Е. В. 143, 146
 У Син 108
 Утенков А. А. 31
 Уфимцев Ю. С. 171
 У Цянь 108
 Учаев А. Я. 30
 Ушков А. В. 171

Ф

Файрушина Л. Р. 172
 Фалахутдинов Р. М. 136, 141
 Фальков А. Л. 102, 255
 Фарлей Д. 5
 Фёдоров А. В. 32, 35
 Фёдоров А. Ю. 27
 Фёдоров В. В. 210
 Федосеев А. В. 31
 Фейгин А. М. 240, 241
 Фефилов С. А. 27
 Филимонова Л. Н. 209
 Филякова В. И. 64
 Финюшин С. А. 32, 35
 Фокин В. Б. 134
 Фомин Е. В. 128, 142
 Фоминич Э. Н. 92
 Фомичёв В. А. 143, 146
 Фролова Н. Ю. 33, 120, 144
 Фролова О. А. 48
 Фролов Д. В. 171
 Фу Хуа 179, 181

Х

Халеменчук В. П. 73
 Хансен С. Б. 5
 Хао Лю 107
 Харитоновна Н. Л. 173
 Харченко В. В. 20
 Хатунцев К. Е. 229, 230
 Хейфец А. Э. 33, 120, 144
 Хищенко К. В. 110, 140, 141, 143, 144
 Хлебановский Н. А. 65
 Хмельницкая А. Д. 212
 Хмельницкий Д. В. 154
 Хомская И. В. 108, 144
 Хомяков Ю. В. 73
 Хонрубиа Х. Х. 5
 Хорунженко А. С. 78
 Хрулёв А. Н. 185
 Хуан Бинь-бинь 179
 Хуань Чжан 107
 Ху Цюши 181
 Хэ Хун-лян 108
 Хюм Э. 5

Ц

Цзин Ван 153
 Цзяминь Ян 107
 Циберев К. В. 196
 Цинь З. 153
 Цуварев Е. С. 213

Ч

Чебесков А. Н. 157, 158
 Чемагина И. В. 44, 69, 74, 77
 Чередниченко И. Е. 214
 Чернецова В. В. 242, 255
 Черница А. О. 34
 Черница О. А. 16
 Черняков В. Е. 94
 Четверушкин Б. Н. 7
 Чжан Т. 108
 Чжань Ф. 83
 Чжэбинь Ван 107
 Чжэн Сянь-сюй 179, 180
 Чижков М. Н. 155, 184
 Чинин А. А. 143, 146
 Чирков П. В. 126, 146
 Чубарешко И. С. 215
 Чудаков Е. А. 13, 32, 35
 Чун Тао 180
 Чуриков Ю. И. 158
 Чэнь Чжан 107

Ш

Шайтура Н. С. 162
 Шакиров И. Р. 54
 Шамро О. А. 143, 146
 Шаоэнь Цзян 107

Шатов М. М. 19
 Шахмаев С. В. 47, 48
 Швец Н. Н. 92, 99
 Шевченко В. Г. 58, 147
 Шестаков А. А. 215, 216, 217
 Шестаковская Е. С. 149, 217
 Шехтман Л. И. 27, 73
 Ши С. 153
 Шидловский В. В. 157, 158
 Ширинкина И. Г. 111, 148
 Ширококов А. Е. 27, 29
 Ширшова М. О. 79, 196
 Шистириков М. А. 127
 Шишленин М. А. 258
 Шкаруба В. А. 73
 Шмелёв В. А. 36, 214
 Шмелев И. В. 35
 Шорохов Е. В. 33, 108, 111, 120, 136, 141, 144
 Шубин А. С. 17
 Шубин С. А. 17
 Шувалова Е. В. 196
 Шумин Пен 153
 Шушлебин А. Н. 218

Щ

Щенникова Е. М. 174
 Щербаков В. Н. 11, 48

Э

Эбель А. А. 128
 Эверт В. Ю. 16

Ю

Юдин Н. В. 60
 Юй Инь 179
 Юлун Ли 107
 Юргов И. В. 13
 Юрченко В. О. 20
 Юсупов Д. Т. 127, 137, 280
 Ючуань Ян 153

Я

Яблонских Т. И. 148
 Яговкин А. О. 13, 32
 Якоби Й. 5
 Яковлев Г. А. 131
 Якунин А. К. 133, 137
 Яловец А. П. 128, 149, 190
 Янилкин А. В. 167
 Янилкин Ю. В. 28, 36, 214
 Янь Чжао 153
 Ярошук П. Н. 17, 123
 Яхин Р. А. 91

AUTHORS**A**

Abdullina D. N. 109
 Adamov E. O. 5, 159
 Adarchenko V. A. 154
 Aduiev B. P. 62
 Akhlyustin I. A. 42, 45
 Akhmetov A. R. 16
 Akhmetzyanov A. I. 43
 Alekhina N. A. 41
 Alekseev D. I. 21
 Anan'eva M. V. 52, 53, 231
 Ananiev A. I. 58
 Andreev A. S. 95
 Andriyash A. V. 17
 Anikin N. B. 156, 171
 Anisichkin V. F. 11, 110
 Antipov M. V. 14, 32
 Antipova T. V. 45
 Antonelli L. 6
 Antonov I. M. 42
 Arakcheev A. S. 74
 Arapov Yu. D. 124
 Astafev V. V. 148
 Atlukhanov M. G. 16
 Avilov K. K. 223

B

Badretdinova L. Kh. 44, 47
 Bagavetdinov N. G. 55
 Baird C. D. 6
 Bajdin G. V. 255
 Bakirov A. P. 44
 Bakirov A. R. 41, 47, 69, 73
 Bak P. A. 35
 Bakurkina E. S. 95
 Balushkin S. V. 12, 185
 Baluta V. I. 224
 Balykina Y. E. 225
 Barbato F. 6
 Barenbaum A. A. 13
 Bashkin D. I. 96, 98
 Batalova I. A. 45
 Batani D. 6
 Bautin S. P. 26, 182, 183, 196
 Bazotov V. Ya. 44, 47
 Beketov A. P. 47
 Belenovskiy Yu. A. 42, 45
 Belova M. G. 255
 Belyaev P. E. 46
 Belyakov V. I. 12
 Besova E. V. 255
 Bezborodova P. A. 128
 Bezgodov E. V. 155, 171, 174
 Blikov A. O. 14
 Blinov A. V. 32
 Blinov I. A. 14
 Boldyrev M. I. 185

Booth N. 6
 Boretiskikh D. V. 218
 Borovsky I. O. 185
 Borshchev Yu. P. 58
 Bortsov A. A. 127
 Boutoux G. 6
 Boyarchenkov A. S. 165
 Boyarskikh K. A. 111
 Boyko M. M. 117
 Bragin A. A. 229, 230
 Brantov A. V. 84
 Brodova I. G. 112, 148
 Bryazgin A. A. 42, 77
 Bugayenko A. A. 186
 Burdakov A. V. 16
 Buyko A. M. 112
 Bychenkov V. Yu. 84, 85, 94

C

Chebeskov A. N. 157, 159
 Chemagina I. V. 45, 69, 75, 77
 Chen Zhang 107
 Cherednichenko I. E. 215
 Chernetsova V. V. 242, 256
 Chernitsa A. O. 35
 Chernitsa O. A. 16
 Chernyakov V. E. 95
 Chetverushkin B. N. 7
 Chinin A. A. 143, 147
 Chirkov P. V. 126, 146
 Chizhkov M. N. 156, 185
 Chong Tao 180
 Chubaresheko I. S. 215
 Chudakov E. A. 14, 32, 36
 Chyurikov Yu. I. 159

D

Danilov V. V. 16
 Davletchin Yu. F. 155, 171
 Davydov D. I. 71
 Davydov N. B. 14
 Degtyaryev A. A. 34, 118, 121
 Dementev O. N. 190
 Demina M. A. 187
 Derkach V. N. 90
 Deryabin A. M. 230, 229
 Deryabin S. L. 199
 Döhl L. N. K. 6
 Dolgikh A. V. 16
 Dolgikh S. M. 34, 56, 66
 Dolmatov V. Yu. 65
 Dotsenko V. V. 192
 Dramoretskaya Y. S. 166
 Dryomov V. V. 125, 126, 146
 Dudnik D. P. 47, 49
 Dunaev V. N. 47
 Durey P. 6
 Dyachkov S. A. 97
 Dyagterenko L. I. 37

Dyrda N. D. 172
 Dyuryagina N. S. 191

E

Ebel A. A. 128
 Eganov K. V. 42, 49
 Egorova L. Yu. 123
 Elkin V. M. 130
 Elshina L. A. 109
 Eltsov I. V. 42
 Emel'yanova E. Yu. 47, 192
 Ermakov A. E. 71
 Ermolaev B. S. 50
 Erofeev A. M. 209
 Ershov A. P. 51
 Ershova L. S. 154
 Eselevich D. A. 58, 147
 Eskov N. S. 188
 Evert V. Yu. 16

F

Falahutdinov R. M. 137, 142
 Falkov A. L. 102, 255
 Farley D. 6
 Fayrushina L. R. 172
 Fedorov A. V. 32
 Fedorov A. Yu. 28
 Fedoseev A. V. 32
 Fefilov S. A. 28
 Feigin A. M. 240, 241
 Filimonova L. N. 210
 Finyushin S. A. 32, 36
 Fokin V. B. 134
 Fomichyov V. A. 143, 147
 Fomin E. V. 128, 142
 Frolov D. V. 171
 Frolova N. Yu. 34, 121
 Frolova O. A. 48
 Fu Hua 179, 180, 181
 Fyedorov V. V. 210

G

Gaan K. V. 56, 112, 137, 142
 Gabdrakhmanov I. M. 86
 Gadzhiev A. D. 207
 Gagarkin D. M. 47, 48, 49
 Gaisina K. A. 75
 Galiev F. F. 118
 Galiullin I. G. 47, 49
 Galkina E. V. 52, 53
 Garanin S. G. 90
 Garmashev A. Yu. 28, 41, 42, 45, 47, 56, 64, 67, 68, 69, 73, 77, 127
 Garmashev A. Yu. 63
 Gaviko V. S. 71
 Gavrilov A. S. 240, 241
 Georgievskaya A. B. 14
 Gerasimov K. B. 77

Gilev S. D. 115, 116
 Giuffrida L. 6
 Glazunov V. A. 188, 211
 Glazyrin I. V. 156, 185, 202
 Glazyrin S. I. 87
 Gnutov I. S. 32, 36
 Gordeev I. N. 12
 Gorin N. V. 157, 159
 Gornov V. N. 89
 Gorodnichev K. E. 87
 Govras E. A. 86
 Gracheva N. A. 138
 Grachyova N. A. 189
 Gremitskih A. S. 49
 Gretsova A. N. 48
 Grokhovsky V. I. 15, 131
 Grushin A. S. 86, 96
 Gryaznov E. F. 117
 Gubchenko V. M. 88
 Gubskiy K. L. 90
 Gudarenko L. F. 120
 Gughova A. R. 29
 Gus'kov S. Yu. 90, 91
 Guzhova A. R. 37

H

Hansen S. B. 6
 Hao Liu 107
 Harchenko V. V. 21
 He HL. 108
 Honrubia J. J. 6
 Huang Bin-bin 179
 Huan Zhang 107
 Hume E. 6
 Hu Qiushi 181

I

Ilyakova N. N. 54
 Ilyutina O. S. 192
 Ismailov Sh. M. 17
 Isupova A. A. 123

J

Jacoby J. 6
 Jiamin Yang 107
 Jing Wang 154

K

Kabaev A. A. 188
 Kabaev S. A. 188
 Kabanikhin S. I. 258
 Kachaev V. P. 12
 Kakshin A. G. 102
 Kalashnikov D. A. 32, 36
 Kalenskii A. V. 52, 53, 231
 Kal'manov A. V. 118
 Kamenev V. G. 17, 124

Kaminskiy G. D. 227, 230, 232, 234, 235, 242, 244,
 246, 252, 256
 Kaplunov A. V. 16
 Kaplyukov G. V. 17
 Kapranov K. O. 57
 Karabut R. Yu. 247, 251
 Karachinsky I. A. 35
 Karachinsky S. I. 55
 Karamov E. V. 8, 227, 230, 235, 252, 256
 Karandeev A. A. 226
 Karavaev A. V. 125, 126, 146
 Karimov F. H. 125, 237
 Karlykhanov N. G. 95, 194, 213
 Karmanov A. L. 157, 210, 229, 230, 237
 Karpeev A. V. 195
 Kashkarov A. O. 28, 56, 65, 74, 79
 Kassar-Ogly F. A. 214
 Kayakin A. A. 120
 Kazachinsky A. O. 193
 Kazak A. A. 43
 Kazakov A. G. 89
 Kazakov D. N. 132
 Kazantseva N. V. 123
 Khaghani D. 6
 Khalemenchuk V. P. 74
 Kharitonova N. L. 174
 Khatuntsev K. E. 229, 230
 Kheifets A. E. 34, 121
 Khishchenko K. V. 111, 140, 141, 144
 Khlebanovsky N. A. 65
 Khmel'nitskaya A. D. 213
 Khmel'nitsky D. V. 154
 Khomiakov Yu. V. 74
 Khomskaya I. V. 109
 Khorungenko A. S. 78
 Khrulyov A. N. 185
 Kichigin R. M. 126, 146
 Kim D. A. 86, 96
 Kirillov I. A. 156, 161, 174
 Kiskin A. Ye. 56
 Klyonov A. I. 127
 Klyonov A. N. 148
 Klimov A. V. 203
 Klinacheva N. L. 149
 Klypin V. V. 16
 Knyazev V. N. 14
 Kochetkov Yu. V. 90
 Koemets Yu. N. 123
 Kol'chugin S. V. 96
 Kolesnikov P. A. 16, 35
 Kolesnikov S. A. 16
 Kolesov V. I. 57, 61
 Kolobyanin V. Yu. 37
 Kondrat'ev A. N. 17
 Kondratyev A. A. 98
 Kononov S. N. 196
 Konovalov A. B. 238
 Konovalov A. N. 61
 Konovalova A. Yu. 74
 Konstantinov A. Yu. 139
 Konyukova A. V. 58, 147

Korolev A. S. 96
 Korotaeva Z. A. 119
 Koshatova E. V. 118
 Kosheleva E. V. 30
 Kosolapov I. E. 42
 Kosolapov K. E. 45
 Kosterov D. A. 57, 59, 72
 Kostin G. F. 190
 Kostitsyn O. V. 63, 64, 67, 69
 Kotin A. V. 14
 Kotova O. G. 156
 Kovalyov A. E. 118
 Kovalyov Yu. M. 135
 Kraiko A. N. 18
 Krainov A. Yu. 60, 200
 Krasnikov V. S. 128, 142
 Kravchenko V. V. 90
 Krayukhin S. A. 197
 Krivosheev S. I. 21
 Krukov V. M. 155
 Krupnikov K. K. 144
 Krutova I. Y. 186, 198
 Ksenofontov A. I. 162
 Kubasov P. V. 17, 124
 Kuchinov V. P. 157, 159
 Kuchko D. P. 20, 28, 124
 Kuchugov P. A. 91
 Kucko D. P. 29
 Kulakov E. V. 14
 Kulenko Ya. V. 35
 Kulikov G. V. 12, 185
 Kulikov V. G. 43
 Kuper K. E. 74
 Kuratov A. S. 84
 Kuratov S. E. 17, 87
 Kurbatova E. I. 162
 Kurkuchekov V. V. 16
 Kuropatkin Yu. P. 143, 147
 Kuznetsov A. P. 90
 Kuznetsov A. V. 139
 Kuznetsov E. V. 159
 Kuznetsov P. A. 129
 Kuznetsov V. A. 119
 Kuznetsov Yu. A. 101

L

Lancaster K. 6
 Larichev M. N. 163
 Latypov F. T. 128
 Lebedev S. N. 201, 202, 229, 230, 255
 Levak K. V. 56
 Levashkin S. P. 239
 Levashov P. R. 97, 130, 134
 Levshenkov A. I. 57
 Levunina E. S. 196
 Liangang Zhuo 154
 Liang Sun 107
 Li Ke-wu 180
 Lipatnikov M. A. 185, 212
 Li Tao 179, 180, 181

Litvinenko I. A. 255
 Loboda E. A. 102
 Loboda P. A. 96, 102
 Loboiko B. G. 64, 68
 Lobok M. G. 85, 94
 Lomonosov I. V. 129
 Loskutov E. M. 240, 241
 Lozhkov A. A. 247, 251
 Lupanov V. G. 138
 Lyagina E. L. 216
 Lykov V. A. 95, 194, 216, 218

M

Magazinov S. G. 21
 Magazov F. G. 218
 Makalsky L. M. 101
 Makeeva I. R. 46, 164, 166, 172, 218
 Maksimovskaya A. Yu. 247, 251
 Malev V. V. 28
 Malyugina S. N. 132
 Manakhova E. S. 61
 Manzuk M. V. 21
 Martynenko A. S. 6
 Mastyuk D. A. 46
 Mayer A. E. 114, 128, 138, 142, 189
 Mayer P. N. 138
 Mayorova A. S. 132
 McKenna P. 6
 Melekhov A. P. 90
 Mezentsev A. V. 199
 Mezentsev N. A. 74
 Mikhailenko M. A. 42, 77
 Mikhailov N. A. 156, 185, 202
 Mikhaylov V. N. 130, 134
 Minaev I. V. 212
 Minakov D. V. 130, 134
 Mironova E. E. 125
 Miroshkin K. M. 42, 45
 Mitrofanov A. Yu. 54
 Moiseeva K. M. 200
 Mokrushin S. S. 132
 Moserova E. Ya. 247
 Moshkin D. L. 155, 171
 Mozerova E. Ya. 250, 251
 Muftakhetdinova R. F. 131
 Mukhina A. Yu. 241
 Mukhin D. N. 240, 241
 Mukhin D. V. 28
 Mukhin I. B. 90
 Muradymov R. V. 112
 Murphy C. D. 6
 Mustafin A. M. 201, 202
 Muzyrya A. K. 12, 22, 55, 56
 Mytarev M. S. 132
 Mytarev S. V. 55

N

Naimark O. B. 133

Natynchik V. S. 203
 Naumov A. O. 197, 204
 Naumova M. Yu. 101
 Nazarov K. S. 202
 Nekrasov K. A. 165
 Neskin A. G. 23
 Neumayer P. 6
 Nichipuruk A. P. 123
 Nikiforov D. A. 35
 Nikiforov M. V. 12, 155
 Nikiforov M. Yu. 171
 Nikitin O. A. 16, 35
 Nikolaev A. Yu. 144
 Nikolaev Yu. V. 183
 Nikolenko A. D. 74
 Nikulshin M. V. 185, 192, 212
 Nizhegorodtsev V. I. 143, 147
 Nogin V. N. 20, 188, 205
 Nosulenko D. S. 96
 Novikov N. S. 258
 Novikov S. I. 71
 Novoselov K. V. 23
 Nurmukhametov D. R. 54, 62

O

Obraztsov G. K. 65
 Obukhov A. G. 205
 Ogorodnikov L. L. 25
 Ogorodnikov V. A. 14, 32
 Opryshko O. V. 206
 Orlova N. Yu. 148
 Ovechkin A. A. 96, 102, 130

P

Pakhomov S. N. 89, 98
 Palchikov E. I. 16
 Pankratov D. G. 20, 124, 134, 137
 Panov K. N. 14
 Paramonov M. A. 130, 134
 Pashentseva N. N. 201, 202
 Pasyukov S. D. 12, 155, 171
 Pavlenko A. V. 132, 156
 Pavlenko O. N. 255
 Pavlov O. A. 35
 Peng Zhao 154
 Peregudov P. A. 49
 Permenov D. G. 59, 72
 Pervinenko V. N. 157, 237
 Peshkicheva L. E. 89, 96
 Peshkichev I. V. 166
 Petrova A. N. 112
 Petrov D. V. 28, 144
 Petukhov E. A. 127
 Philyakova V. I. 64
 Pigasov E. E. 46
 Pikuz S. A. 6, 90
 Pitskhelauri S. S. 165
 Pkhaiko N. A. 89, 98
 Poduvalov A. N. 32

Pogorelko V. V. 128
 Pokatashkin P. A. 167
 Politov V. Yu. 16
 Polyukhin A. S. 97
 Pomesyachnaya E. S. 231
 Pomykalov E. V. 135
 Pon'kin E. I. 26
 Ponomaryova T. V. 207
 Popov I. A. 155, 171
 Popov S. S. 16
 Popov V. V. 137, 142
 Popova E. N. 137, 142
 Popruzhenko S. V. 90
 Poptsov A. G. 20, 124, 134, 137
 Poryazov V. A. 60
 Potapov A. V. 98
 Poteryaeva E. A. 55
 Prostov M. Y. 242, 244, 246, 252, 256
 Prostov Y. I. 227, 235, 246, 256
 Prosvirnin K. M. 42, 45, 49, 56
 Prueel E. R. 23, 28, 29, 56, 74, 79
 Pugachyov V. Yu. 172

Q

Qin Z. 153

R

Rakshun Ya. V. 74
 Rashenko S. V. 74
 Rasposienko D. Yu. 112
 Razorenov S. V. 109, 112
 Razumkov E. A. 36
 Ren Y. 153
 Rezvova T. V. 197
 Rodin A. V. 166
 Rodionov E. S. 138, 189
 Rogacheva D. A. 247, 251
 Rogozkin D. B. 17
 Romanov I. N. 143, 147
 Romanyukha A. A. 248
 Rosmej O. 6
 Rubtsova O. O. 154
 Rubtsov I. A. 28, 56, 63, 74
 Rudina A. Kh. 64, 67, 68
 Rudina A. Kh. 63
 Rusinov G. L. 64, 69
 Ryabchun A. M. 16
 Ryazantsev S. N. 6
 Rykovanov G. N. 95, 229, 230
 Rykovanov V. S. 208
 Rykov Yu. G. 249

S

Sabelnikova Zh. E. 247, 250, 251
 Sadovskiy A. A. 169
 Safonov S. E. 241
 Safronov K. V. 89
 Sakharov M. Yu. 192

- Salomov N. G. 125
 Samarina S. V. 154
 Samarin S. I. 229, 230
 Samoilenko M. S. 16
 Samsonova N. S. 187
 Santos J. J. 6
 Sapozhnikov F. A. 208
 Sapunov V. A. 168
 Sarafannikov A. V. 47, 49, 56, 75
 Sarycheva M. M. 247, 250, 251
 Satonkina N. P. 65, 78
 Savchenko K. V. 143, 147
 Saveliev V. V. 168
 Savenkov G. G. 139
 Savin D. A. 162
 Seitov D. 165
 Sel'chenkova N. I. 30
 Selemir V. D. 143, 147
 Seleznyov A. F. 240, 241
 Semyonova D. A. 227, 235, 242, 244, 252, 254, 256
 Semyonov A. Yu. 141
 Seredkin N. N. 140
 Sergeev A. V. 168
 Serov S. A. 99
 Seryakov Yu. D. 211
 Shaitura N. S. 163
 Shakhmaev S. V. 47, 49
 Shakirov I. R. 55
 Shamro O. A. 143, 147
 Shaoen Jiang 107
 Shatov M. M. 20
 Shchennikova E. M. 175
 Shcherbakov V. N. 12, 48
 Shekhtman L. I. 28, 74
 Shestakov A. A. 215, 216, 217
 Shestakovskaya E. S. 149, 218
 Shevchenko V. G. 58, 147
 Shidlovsky V. V. 157, 159
 Shirinkina I. G. 112, 148
 Shirobokov A. E. 28, 29
 Shirshova M. O. 197
 Shirshova M. O. 79
 Shi S. 153
 Shishlenin M. A. 258
 Shistirikov M. A. 127
 Shkaruba V. A. 74
 Shmelyov I. V. 36
 Shmelyov V. A. 37
 Shorokhov E. V. 34, 109, 121, 137, 142
 Shorokhov E. V. 112
 Shubin A. S. 17
 Shubin S. A. 17
 Shuming Peng 154
 Shushlebin A. N. 218
 Shuvalova E. V. 197
 Sidorov K. S. 127
 Simonenko V. A. 155, 156, 170, 171, 174
 Simonov A. Yu. 12, 185
 Simonov O. A. 210
 Sizov E. A. 209
 Skobelev I. Yu. 6
 Skovorodin D. I. 16
 Smelev V. A. 215
 Smirnov E. B. 23, 28, 29, 34, 41, 42, 47, 49, 56, 66, 67, 77, 121, 127, 144, 148
 Smirnov N. A. 130, 140
 Smirnov Yu. Yu. 96
 Sobolevskaya A. V. 48, 73
 Sofronov V. N. 187
 Sogrina O. B. 32
 Sokolov A. V. 229, 230
 Sokolov L. V. 218
 Sokolov M. A. 66
 Solomin N. A. 229, 230
 Solomyannaya A. D. 86, 96
 Soloviev A. A. 90
 Sorokin I. A. 98
 Spindloe C. 6
 Spirin I. A. 79
 Stankevich A. V. 41, 44, 47, 48, 63, 64, 67, 68, 69, 70, 71, 73, 77
 Starodubov S. V. 197
 Starostenko D. A. 35
 Statsenko V. P. 29
 Stepanov A. S. 12
 Stepanova N. V. 119
 Stolbovsky A. V. 137, 142
 Stolyarov P. N. 59, 72
 Stolyarov V. V. 139
 Streltsova M. S. 73
 Stuchebyukhov I. A. 141
 Studennikov A. A. 56, 74
 Sui Zhilei 180
 Syrunin M. A. 14
 Sysoev V. S. 101
- T**
- Tabatchikov A. A. 212
 Taibinov N. P. 41, 44, 47, 63, 64, 67, 68, 69, 73, 75
 Tan K. A. 79
 Tarakanov A. A. 12, 155, 171
 Taranik A. V. 255
 Tarasov A. Yu. 75
 Tarzhanov V. I. 76, 124
 Ten K. A. 23, 28, 29, 56, 74
 Teplykh N. A. 157, 210, 229, 230, 237
 Tihov A. A. 17
 Tikhonov N. N. 190
 Timokhina D. M. 247, 251
 Tishchenko A. S. 98
 Titarenko N. Yu. 102
 Titov V. V. 192
 Titova V. B. 79
 Tolochko B. P. 28, 42, 74, 77
 Tolshchina S. G. 69
 Tomilov Y. A. 175
 Tretyachenko Yu. V. 29
 Trishin R. A. 211
 Trunev Yu. A. 16
 Tsiberev K. V. 197
 Tsuvarev E. S. 214

Tulaeva N. N. 212
 Tumanik A. S. 29
 Turgiev A. S. 227, 230, 235, 252, 256
 Turianska O. 6
 Tur I. V. 17
 Tyaktev A. A. 156, 171

U

Uchaev A. Ya. 30
 Ufimtsev Yu. S. 171
 Ulyanov V. A. 12, 61
 Urakov M. S. 229, 230
 Urlin E. V. 147
 Urlin E. V. 143
 Ushkov A. V. 171
 Utenkov A. A. 32
 Uymin M. A. 71

V

Vais O. E. 85
 Valiev R. N. 44, 47
 Vanchinov A. V. 49
 Varand A. V. 42
 Varykhanov S. S. 226
 Vazhenin I. A. 250
 Vaziev E. M. 207
 Vdovin V. V. 240, 241
 Vergeles S. S. 25
 Veselova E. I. 227, 235
 Vetchinnikov M. V. 187
 Vichev I. Yu. 86, 96
 Vikhlyaev D. A. 96
 Virchenko V. A. 43
 Vishnyakov A. Yu. 188
 Vlasov V. V. 157, 210, 228, 229, 230, 237, 238
 Volkov V. I. 188
 Volodina N. A. 79, 197
 Voloshin N. P. 159
 Vorobyov M. A. 55
 Vorobyov A. V. 124
 Voronin D. S. 114, 128
 Vronsky A. V. 215

W

Wang S. 153
 Wang X. 153
 Wei Liao 154
 Weiming Yang 107
 Wei Yi 181
 Woolsey N. 6
 Wu Q. 108
 Wu X. 108

X

Xiaoxi Duan 107
 Xia Yang 154

Y

Yablonskikh T. I. 148
 Yagovkin A. O. 14, 32
 Yakhin R. A. 91
 Yakovlev G. A. 131
 Yakunin A. K. 137
 Yakunin A. K. 134
 Yalovets A. P. 129, 149, 191
 Yanilkin A. V. 167
 Yanilkin Yu. V. 29, 37, 215
 Yan Zhao 154
 Yaroshchuk P. N. 17, 124
 Yerunov S. V. 14
 Yolshina L. A. 112
 Yuchuan Yang 154
 Yudin N. V. 61
 Yulong Li 107
 Yurchenko V. O. 21
 Yurtov I. V. 14
 Yusupov D. T. 127, 137
 Yu Yin 179

Z

Zakharov P. P. 87
 Zakharov V. V. 225
 Zakharova O. I. 239
 Zamyslov D. N. 14
 Zatsepin O. V. 229, 230
 Zavialov Z. I. 127
 Zeldovich V. I. 34, 121
 Zelenov A. N. 23
 Zhang F. 83
 Zhang T. 108
 Zhdanok A. A. 119
 Zhebin Wang 107
 Zheng Xian-xu 180
 Zhernokletov M. V. 120
 Zhivankov K. I. 16
 Zhugin Yu. N. 144
 Zhulanov V. V. 28
 Zhumbaeva A. T. 250
 Zolotaryov K. V. 74
 Zubavichus Ya. V. 74
 Zvekov A. A. 52, 53, 231
 Zverev A. S. 52, 53, 54, 231

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДНИЕ

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

КАК БАЗОВЫЙ ЭЛЕМЕНТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ	5
Е. О. Адамов	

ПЛАЗМА ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ, СОЗДАВАЕМАЯ ПРЯМЫМ И НЕПРЯМЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПИКОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ СУБПЕТАВАТТНОЙ МОЩНОСТИ	5
---	---

С. А. Пикуз, А. С. Мартыненко, Л. Антонелли, К. Д. Бэйрд, Ф. Барбато, Н. Бут, Г. Боту, Л. Н. К. Доль, Ф. Дюрей, Д. Фарлей, Л. Джуффрида, С. Б. Хансен, Х. Х. Хонрубиа, Э. Хюм, Й. Якоби, Д. Кагани, К. Ланкастер, П. МакКенна, К. Д. Мерфи, П. Ноймайер, О. Розмей, С. Н. Рязанцев, Ж. Ж. Сантос, И. Ю. Скобелев, К. Спиндлоэ, О. Турянска, Д. Батани, Н. Вулси

СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ	7
Б. Н. Четверушкин	

ВИРУСНЫЕ ИНФЕКЦИИ XXI ВЕКА: МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭПИДЕМИЙ	7
Э. В. Карамов	

СЕКЦИЯ 1. КОСМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ЗЕМЛИ, ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

О ПРИЧИНАХ ИЗМЕНЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И КЛИМАТА ЗЕМЛИ	11
В. Ф. Анисичкин	

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕМПФИРОВАНИЯ ВЗРЫВНОЙ НАГРУЗКИ ДИАФРАГМЕННЫМИ КОЛЬЦАМИ	11
--	----

С. В. Балужкин, А. Ю. Симонов, Г. В. Куликов, В. И. Беляков, М. В. Никифоров, С. Д. Пасюков, В. П. Качаев, А. А. Тараканов, В. Н. Щербаков, А. С. Степанов, И. Н. Гордеев, А. К. Музыря, С. М. Ульянов

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОМЕТ С ТЕЛАМИ АСТЕРОИДНОГО ПОЯСА. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ДОЛГО- И КОРОТКОПЕРИОДИЧЕСКИХ КОМЕТ	12
А. А. Баренбаум	

О ВЫБРОСЕ ЧАСТИЦ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЛАЙНЕРОВ ИЗ МЕДИ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ, КВАЗИИЗЭНТРОПИЧЕСКОМ И ИЗЭНТРОПИЧЕСКОМ РЕЖИМАХ ИХ УСКОРЕНИЯ	13
---	----

И. А. Блинов, В. А. Огородников, С. В. Ерунов, А. О. Бликов, Е. В. Кулаков, Е. А. Чудаков, М. В. Антипов, К. Н. Панов, М. А. Сырунин, В. Н. Князев, Н. Б. Давыдов, А. Б. Георгиевская, А. О. Яговкин, И. В. Юртов, Д. Н. Замыслов, А. В. Котин

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ АСТЕРОИДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ	14
В. И. Гроховский	

ИМПУЛЬСНЫЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ АППАРАТ НА ОСНОВЕ ТРАНСФОРМАТОРА ТЕСЛА С НЕОДНОРОДНОЙ ФОРМИРУЮЩЕЙ ЛИНИЕЙ В РАЗРЯДНОЙ ЦЕПИ	15
--	----

А. В. Долгих, Е. И. Пальчиков, В. В. Клыпин, М. С. Самойленко, А. М. Рябчун

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ДИАГНОСТИКЕ ФОКУСНОГО ПЯТНА ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ	16
---	----

П. А. Колесников, В. Ю. Политов, С. А. Колесников, А. Р. Ахметов, А. В. Каплунов, В. Ю. Эверт, О. А. Черница, О. А. Никитин, Ю. А. Трунев, Д. И. Сковородин, М. Г. Атлуханов, А. В. Бурдаков, В. В. Данилов, В. В. Куркучеков, С. С. Попов, К. И. Живанков

СОВМЕСТНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДОПЛЕРОВСКОЙ ВЕЛОСИМЕТРИИ И КОГЕРЕНТНОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ЗОНДИРОВАНИЯ ПЫЛЕВЫХ ВЫБРОСОВ УДАРНО-НАГРУЖЕННЫХ ОБРАЗЦОВ	17
--	----

А. Н. Кондратьев, А. В. Андрияш, Ш. М. Исмаилов, В. Г. Каменев, Г. В. Каплюков, П. В. Кубасов, С. Е. Куратов, Д. Б. Рогозкин, А. А. Тихов, И. В. Тур, А. С. Шубин, С. А. Шубин, П. Н. Ярошук

МОДЕЛЬ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА И РАСШИРЕНИЯ ВСЕЛЕННОЙ В ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ С РАЗЛЕТОМ КОНЕЧНОЙ МАССЫ ГАЗА ИЗ ТОЧКИ В ПУСТОТУ	18
--	----

А. Н. Крайко

ОПРОБОВАНИЕ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА КОНСТРУКТИВНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ	19
---	----

Д. П. Кучко, В. Н. Ногин, М. М. Шатов, А. Г. Попцов, Д. Г. Панкратов

АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИМПУЛЬСНОГО ВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ РАЗРУШАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ЗАЩИТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ	20
М. В. Манзук, Д. И. Алексеев, С. И. Кривошеев, С. Г. Магазинов, В. В. Харченко, В. О. Юрченко	
ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТОНКИХ ПЛАСТИН	22
А. К. Музыря	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КРИТИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ ПРОНИКАНИЯ КС ИЗ ЧУГУНА В ПРЕГРАДУ ИЗ ЧУГУНА	23
А. Г. Нескин, А. Н. Зеленов	
ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА НА МАССУ ИНЖЕКТИРУЕМОЙ ПЫЛИ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ ПЫЛЕНИИ	23
К. В. Новосёлов, К. А. Тен, Э. Р. Прууэл, Е. Б. Смирнов	
СТРУКТУРА И ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ СТОЛБЧАТЫХ КОГЕРЕНТНЫХ ВИХРЕЙ В ТРЕХМЕРНОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ	24
Л. Л. Огородников, С. С. Вергелес	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВУМЕРНЫХ АВТОМОДЕЛЬНЫХ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА	26
Е. И. Понькин, С. П. Баутин	
РЕГИСТРАЦИЯ ПЫЛЕВОГО ОБЛАКА МЕТОДАМИ СИ, ЛГМ И ПЬЕЗОДАТЧИКАМИ	27
К. А. Тен, Э. Р. Прууэл, А. О. Кашкаров, И. А. Рубцов, Д. В. Петров, А. Ю. Гармашев, Е. Б. Смирнов, Д. П. Кучко, В. В. Малев, Д. В. Мухин, А. Е. Ширококов, С. А. Фефилов, А. Ю. Фёдоров, Л. И. Шехтман, В. В. Жуланов, Б. П. Толочко	
МОДИФИКАЦИИ ($k-\epsilon$)-МОДЕЛИ ДЛЯ ДВУМЕРНЫХ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ТЕЧЕНИЙ	28
Ю. В. Третьяченко, А. Р. Гужова, В. П. Стаценко, Ю. В. Янилкин	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА ПОРОШКА ВОЛЬФРАМОВЫХ ЧАСТИЦ, МЕТАЕМЫХ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ	29
А. С. Туманик, К. А. Тен, Э. Р. Прууэл, Е. Б. Смирнов, Д. П. Кучко, А. Е. Ширококов	
КРИТИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ	30
А. Я. Учаев, Е. В. Кошелева, Н. И. Сельченкова	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПОТОКОВ МИКРОЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРАМ И СКОРОСТЯМ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ГОЛОГРАФИИ	31
А. В. Федосеев, М. В. Антипов, А. Н. Подуvalов, В. А. Огородников, А. В. Блинов, А. А. Утенков, О. Б. Согринa	
ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ПЫЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ	32
А. В. Фёдоров, С. А. Финюшин, Е. А. Чудаков, Д. А. Калашников, И. С. Гнутов, А. О. Яговкин	
СХОЖДЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЗРЫВА	33
А. Э. Хейфец, В. И. Зельдович, Н. Ю. Фролова, А. А. Дегтярёв, Е. В. Шорохов, Е. Б. Смирнов, С. М. Долгих	
ПЛАНЫ ПО МОДЕРНИЗАЦИИ ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ С ГРАНИЧНОЙ ЭНЕРГИЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ ДО 2 МэВ	34
А. О. Черница, И. А. Карачинский, П. А. Колесников, О. А. Никитин, Д. А. Старостенко, Д. А. Никифоров, Я. В. Куленко, П. А. Бак, О. А. Павлов	
РЕГИСТРАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ПЫЛЕВОГО ПОТОКА С ПОМОЩЬЮ ОДНОВРЕМЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ ГЕТЕРОДИН-ИНТЕРФЕРОМЕТРА И ЛАЗЕРНОГО ДАЛЬНОМЕРА	35
Е. А. Чудаков, С. А. Финюшин, А. В. Фёдоров, Д. А. Калашников, И. С. Гнутов, И. В. Шмелёв, Е. А. Разумков	
ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ С УЧЕТОМ ИСТОРИИ ПРОЦЕССА	36
Ю. В. Янилкин, А. Р. Гужова, Л. И. Дегтяренко, В. Ю. Колобянин, В. А. Шмелёв	
СЕКЦИЯ 2. ВЗРЫВНЫЕ И ДЕТОНАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ	
НОВАЯ МЕТОДИКА АНАЛИЗА ДЕФЕКТНОСТИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И АМОРФНЫХ ВЕЩЕСТВ	41
Н. А. Алёхина, А. В. Станкевич, А. Р. Бакиров, Н. П. Тайбинов, Е. Б. Смирнов, А. Ю. Гармашев	
ЭЛЕКТРОИЗОЛИРУЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ МАНГАНИНОВЫХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТА СОПОЛИМЕРА ИЗОДЕЦИЛМЕТАКРИЛАТА И БЕНЗИЛМЕТАКРИЛАТА С ПЛОТНОСТЬЮ 6,8 г/см ³	41
И. М. Антонов, Б. П. Толочко, А. В. Варанд, М. А. Михайленко, И. В. Ельцов, А. А. Брызгин, Е. Б. Смирнов	

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ И ПОРИСТОСТИ НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВВ ТАТБ	42
И. А. Ахлюстин, И. Э. Косолапов, К. М. Просвирнин, К. М. Мирошкин, К. В. Еганов, Ю. А. Беленовский, Е. Б. Смирнов, А. Ю. Гармашев	
КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗРЫВЧАТЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛЬНЫХ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ 1,1-ДИАМИНО-2,2-ДИНИТРОЭТИЛЕНА	43
А. И. Ахметзянов, В. А. Вирченко В. Г. Куликов, А. А. Казак	
СОСТАВ ПРОДУКТОВ РЕАКЦИЙ МЕДЛЕННОГО ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВЧАТОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В НАНОТЕРМИТАХ CuO/Al , Ni/Al ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОФАЗОВОГО АНАЛИЗА	44
А. Р. Бакиров, А. В. Станкевич, Л. Х. Бадретдинова, Р. Н. Валиев, Н. П. Тайбинов, В. Я. Базотов	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОСТОЙКОСТИ И УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПЛАСТИЗОЛЬНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ КОМПОЗИЦИЙ ФУГАСНОГО ТИПА	44
И. А. Баталова, Т. В. Антипова, И. А. Ахлюстин, Ю. А. Беленовский, А. Ю. Гармашев, К. Э. Косолапов, К. М. Мирошкин, К. М. Просвирнин, И. В. Чемагина	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФЛАГРАЦИИ И ДЕТОНАЦИИ В ВОДОРОД-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ	45
П. Е. Беляев, И. Р. Макеева, Д. А. Мастюк, Е. Е. Пигасов	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАДЕРЖКИ ТЕПЛОВОГО ВЗРЫВА В СМЕСЯХ НАНОТЕРМИТНЫХ КОМПОЗИТОВ CuO/Al , Al/Ni И ОЦЕНКА ХАРАКТЕРА ПРОТЕКАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ В ВОЛНЕ ТВЕРДОПЛАМЕННОГО ГОРЕНИЯ	47
Р. Н. Валиев, А. В. Станкевич, Л. Х. Бадретдинова, А. Р. Бакиров, Н. П. Тайбинов, В. Я. Базотов	
ИСПЫТАНИЕ БОЛТОВ РАЗРЫВНЫХ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИХ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ	47
Д. М. Гагаркин, И. Г. Галиуллин, А. Ю. Гармашев, Д. П. Дудник, В. Н. Дунаев, А. В. Сарафанников, Е. Б. Смирнов, С. В. Шахмаев, А. П. Бекетов, Е. Ю. Емельянова	
ТОНКАЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК БТФ НА РАЗЛИЧНЫХ ПОДЛОЖКАХ	48
Д. М. Гагаркин, А. В. Станкевич, А. В. Соболевская, А. Н. Грецова, О. А. Фролова, В. Н. Щербаков	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗРЫВОСТОЙКОСТИ ОБРАЗЦОВ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ КОМПОЗИЦИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ СТРУИ КУМУЛЯТИВНОГО ЗАРЯДА	48
И. Г. Галиуллин, Е. Б. Смирнов, А. В. Сарафанников, К. М. Просвирнин, К. В. Еганов, Д. М. Гагаркин, Д. П. Дудник, П. А. Перегудов, А. С. Гремитских, А. В. Ванчинов, С. В. Шахмаев	
СВОЙСТВА И МЕХАНИЗМЫ НИЗКОСКОРОСТНОЙ ДЕТОНАЦИИ ПОРИСТЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	49
Б. С. Ермолаев	
ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ МАССОВОЙ СКОРОСТИ	51
А. П. Ершов	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ КОМПОЗИТОВ ТЕТРАНИТРАТ ПЕНТАЭРИТРИТА – НАНОЧАСТИЦЫ АЛЮМИНИЯ С ОКСИДНОЙ ОБОЛОЧКОЙ	51
А. А. Звекон, А. В. Каленский, В. В. Галкина, А. С. Зверев, М. В. Ананьева	
ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНОЙ ПОРИСТОСТИ НА ОПТОАКУСТИЧЕСКИЙ ОТКЛИК КОМПОЗИТОВ ПРОЗРАЧНАЯ МАТРИЦА – НАНОЧАСТИЦЫ МЕТАЛЛОВ	52
А. А. Звекон, А. В. Каленский, В. В. Галкина, А. С. Зверев, М. В. Ананьева	
ВЛИЯНИЕ ОКСИДА ЦИНКА И МАТЕРИАЛОВ НА ЕГО ОСНОВЕ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ТЕТРАНИТРАТА ПЕНТАЭРИТРИТА К ЛАЗЕРНОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ	53
А. С. Зверев, Д. Р. Нурмухаметов, А. Ю. Митрофанов, Н. Н. Ильякова	
ПЛАСТИЧНЫЕ ВЗРЫВЧАТЫЕ СОСТАВЫ НА ОСНОВЕ ТЭНА И БТФ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТОНКОСЛОЙНЫХ ЗАРЯДОВ С МИНИМАЛЬНОЙ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНОЙ ДЕТОНАЦИИ	54
С. И. Карачинский, Н. Г. Багаветдинов, М. А. Воробьев, А. К. Музыря, С. В. Мытарев, Е. А. Потеряева, И. Р. Шакиров	
РЕГИСТРАЦИЯ ПЕРЕХОДА УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ДЕТОНАЦИЮ ПО ДИНАМИКЕ РАЗГРУЗКИ ВЕЩЕСТВА ЗА ФРОНТОМ ВОЛНЫ МЕТОДОМ СИНХРОТРОННОЙ ДИАГНОСТИКИ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ	55
А. О. Кашкаров, К. А. Тен, Э. Р. Прууэл, И. А. Рубцов, А. А. Студенников, К. М. Просвирнин, А. Ю. Гармашев, Е. Б. Смирнов, А. К. Музыря, А. В. Сарафанников	
ИССЛЕДОВАНИЕ СХОЖДЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА АЛЮМИНИЗИРОВАННОГО ВВ	56
К. В. Гаан, С. М. Долгих, А. Е. Кискин, К. В. Левак	

ДЕТОНАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОНИЕВЫХ СОЛЕЙ АЗОТЕТРАЗОЛА	57
В. И. Колесов, К. О. Капранов, Д. А. Костеров, А. И. Левшенков	
БЕССОПЛОВЫЙ И БЕСКОРПУСНЫЙ РАКЕТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА	58
А. В. Конюкова, В. Г. Шевченко, Д. А. Еселевич, А. И. Ананьев, Ю. П. Борщёв	
ОСОБЕННОСТИ РАЗЛОЖЕНИЯ ТЕТРИЛА В РАСТВОРЕ И В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРЕВА	58
Д. А. Костеров, П. Н. Столяров, Д. Г. Перменов	
МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГОРЕНИЯ ПОРОХА В МАНОМЕТРИЧЕСКОЙ БОМБЕ ПОСТОЯННОГО ОБЪЕМА	59
А. Ю. Крайнов, В. А. Порязов	
ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ПЕРВИЧНЫХ ВВ И ИНИЦИИРУЮЩИХ СМЕСЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕПРЕРЫВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ	60
Е. С. Манахова, В. И. Колесов, А. Н. Коновалов, В. А. Ульянов, Н. В. Юдин	
МОДЕЛЬ ВЗРЫВЧАТОГО РАЗЛОЖЕНИЯ СЛАБОПОГЛОЩАЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЕ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ МЕТАЛЛОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАНОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ	61
Д. Р. Нурмухаметов, Б. П. Адуев	
ДВУХСТАДИЙНАЯ МОДЕЛЬ КОНДЕНСАЦИИ УГЛЕРОДА	62
И. А. Рубцов	
АНАЛИЗ СОСТАВА ПРОДУКТОВ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ РАЗЛОЖЕНИЯ И ВЗРЫВЧАТОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ СВЕРХЧИСТЫХ ОБРАЗЦОВ ГЕКСОГЕНА, ОКТОГЕНА И 2,4-ДИНИТРОАНИЗОЛА	63
А. Х. Рудина, А. В. Станкевич, Н. П. Тайбинов, О. В. Костицын, А. Ю. Гармашев	
АНАЛИЗ СОСТАВА ПРОДУКТОВ И КИНЕТИКА ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА С БОРОМ И КРЕМНИЕМ	64
А. Х. Рудина, А. В. Станкевич, Б. Г. Лобойко, Н. П. Тайбинов, О. В. Костицын, А. Ю. Гармашев	
ХРОМАТО-МАСС- И МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ 2,4-ДИНИТРОАНИЗОЛА	64
А. Х. Рудина, А. В. Станкевич, В. И. Филякова, Г. Л. Русинов, Н. П. Тайбинов, О. В. Костицын	
ДЕТАЛИЗАЦИЯ КИНЕТИКИ ТВЕРДЫХ ВВ	65
Н. П. Сагонкина, В. Ю. Долматов, А. О. Кашкаров, Г. К. Образцов, Н. А. Хлебановский	
ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ ОБОЛОЧКИ НА КРИТИЧЕСКУЮ ТОЛЩИНУ ДЕТОНАЦИИ НИЗКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ВВ	66
М. А. Соколов, С. М. Долгих, Е. Б. Смирнов	
ТЕНЗОРЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ СВЕРХЧИСТЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КРИСТАЛЛОВ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ	66
А. В. Станкевич, Е. Б. Смирнов, Н. П. Тайбинов, О. В. Костицын, А. Ю. Гармашев	
АНАЛИЗ ЦЕПНЫХ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ РАЗЛОЖЕНИЯ И ВЗРЫВЧАТОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ СВЕРХЧИСТЫХ ОБРАЗЦОВ ТЭНА, БЕНЗОТРИФУРОКСАНА, ТРИАМИНОТРИНITРОБЕНЗОЛА, ДИАМИНОДИНИТРОЭТИЛЕНА И 2,4,6-ТРИНИТРОТОЛУОЛА	67
А. В. Станкевич, А. Х. Рудина, Н. П. Тайбинов, О. В. Костицын, А. Ю. Гармашев	
ДЕТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОСТАВА ПРОДУКТОВ И КИНЕТИКА ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФТОРИДА КОБАЛЬТА (III) С БОРОМ И КРЕМНИЕМ	68
А. В. Станкевич, А. Х. Рудина, Б. Г. Лобойко, Н. П. Тайбинов, А. Ю. Гармашев	
РЕНТГЕНОФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ АМОРФНО-НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КРИСТАЛЛОВ	68
А. В. Станкевич, А. Р. Бакиров, Н. П. Тайбинов, О. В. Костицын, А. Ю. Гармашев	
ДЕТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОСТАВА ПРОДУКТОВ И МЕХАНИЗМ ЦЕПНЫХ РЕАКЦИЙ РАСПАДА ДИАМИНОТЕТРАЗИНТРИАЗОЛА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ СО СКОРОСТЯМИ ДО 2000 К/с	69
А. В. Станкевич, Г. Л. Русинов, С. Г. Толщина, И. В. Чемагина, Н. П. Тайбинов	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНТАЛЬПИИ СУБЛИМАЦИИ СВЕРХЧИСТЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КРИСТАЛЛОВ ЭНЕРГОЕМКИХ СОЕДИНЕНИЙ	70
А. В. Станкевич	
МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВЕРХЧИСТЫХ ЭНЕРГОЕМКИХ СОЕДИНЕНИЙ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУБЛИМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ	70
А. В. Станкевич	

СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ АЛЮМИНИЯ ПРИ ИХ МЕХАНОАКТИВАЦИИ В ШАРОВЫХ ВИБРОМЕЛЬНИЦАХ	71
А. В. Станкевич, М. А. Уймин, А. Е. Ермаков, С. И. Новиков, Д. И. Давыдов, В. С. Гавико	
РАЗЛОЖЕНИЕ ТЕТРИЛА В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ	71
П. Н. Столяров, Д. Г. Перменов, Д. А. Костеров	
МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ВВ НА ОСНОВЕ ТЭНа С ДОБАВКАМИ НАНОДИСПЕРСНОГО АЛЮМИНИЯ И УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ДОПИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗОМ	72
М. С. Стрельцова, А. В. Соболевская, А. Р. Бакиров, А. В. Станкевич, Н. П. Тайбинов, А. Ю. Гармашев	
ПРОЕКТ СТАНЦИИ 1-3 «БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ» НА ИСТОЧНИКЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЦКП «СКИФ»	73
А. А. Студенников, И. А. Рубцов, Э. Р. Пруэлл, К. А. Тен, А. О. Кашкаров, В. П. Халеменчук, А. С. Аракчеев, К. В. Золотарев, К. Э. Купер, Н. А. Мезенцев, А. Д. Николенко, Я. В. Ракшун, Б. П. Толочко, Л. И. Шехтман, В. А. Шкаруба, Я. В. Зубавичус, А. Ю. Коновалова, С. В. Ращенко, Ю. В. Хомяков	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ 2,4-ДИНИТРОАНИЗОЛА СВЕЖЕИЗГОТОВЛЕННОГО И ПОСЛЕ ДВУХ ЛЕТ ХРАНЕНИЯ	74
А. Ю. Тарасов, А. В. Сарафанников, Н. П. Тайбинов, К. А. Гайсина, И. В. Чемагина	
ВЫРОЖДЕНИЕ ХИМПИКА ПРИ ПЕРЕСЖАТИИ ДЕТОНАЦИИ В ТАТБ И СОСТАВАХ НА ЕГО ОСНОВЕ	75
В. И. Таржанов	
ИЗМЕНЕНИЕ КОНСТАНТЫ СКОРОСТИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ТАТБ ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ	77
Б. П. Толочко, М. А. Михайленко, К. Б. Герасимов, А. А. Брызгин, А. Ю. Гармашев, Е. Б. Смирнов, А. В. Станкевич, И. В. Чемагина	
ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ЗАРЯДА ТРОТИЛА НА ДИНАМИКУ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ ПРИ ДЕТОНАЦИИ	78
А. С. Хорунженко, Н. П. Сатонкина	
РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦАХ ВВ НА ОСНОВЕ ТАТБ	79
М. О. Ширшова, В. Б. Титова, Н. А. Володина, И. А. Спирин, Э. Р. Пруэлл, К. А. Тен, А. О. Кашкаров	
СЕКЦИЯ 3. ЯВЛЕНИЯ В ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ	
УВЕЛИЧЕНИЕ ЭНЕРГОВКЛАДА ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ МИШЕНЕЙ БЫСТРОГО ЗАЖИГАНИЯ С НЕПРЯМЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ	83
Фэн Чжан	
МОЩНЫЕ УНИПОЛЯРНЫЕ ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ИМПУЛЬСЫ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ МИШЕНИ ЛАЗЕРОМ	84
А. В. Брантов, А. С. Куратов, В. Ю. Быченков	
ЯРКОЕ СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В РЕЖИМЕ РЕЛЯТИВИСТСКОГО САМОЗАХВАТА КОРОТКОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА	84
О. Е. Вайс, М. Г. Лобок, В. Ю. Быченков	
МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ПЛАЗМЫ	85
И. Ю. Вичев, Д. А. Ким, А. Д. Соломянная, А. С. Грушин	
МОДЕЛЬ КУЛОНОВСКОГО ВЗРЫВА ПЛОСКОЙ ОДНОРОДНОЙ МИШЕНИ С ДВУМЯ СОРТАМИ ИОНОВ	86
И. М. Габдрахманов, Е. А. Говрас	
ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ МИШЕНЕЙ ПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ	87
С. И. Глазырин, П. П. Захаров, К. Е. Городничев, С. Е. Куратов	
ЭЛЕКТРОННОЕ КИНЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДИАМАГНИТНОГО ОБЛАКА И КВАЗИПОПЕРЕЧНАЯ ОБЫКНОВЕННАЯ МОДА	87
В. М. Губченко	
ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОПЛОТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	89
А. Г. Казаков, Н. А. Пхайко, К. В. Сафронов, В. Н. Горнов, Л. Е. Пешкичева, С. Н. Пахомов	
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ КОМПЛЕКС «ЭЛЬФ» КИЛОДЖОУЛЬНОГО УРОВНЯ ЭНЕРГИИ: КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ДИЗАЙН И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОГРАММА В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ	90
А. П. Кузнецов, В. Н. Деркач, С. Г. Гаранин, К. Л. Губский, С. Ю. Гуськов, Ю. В. Кочетков, В. В. Кравченко, А. В. Михайлюк, А. П. Мелехов, И. Б. Мухин, А. А. Соловьёв, С. А. Пикуз, С. В. Попруженко	

ГЕНЕРАЦИЯ УДАРНЫХ ВОЛН ГИГАБАРНОГО УРОВНЯ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ИССЛЕДОВАНИЯ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА	91
П. А. Кучугов, С. Ю. Гуськов, Р. А. Яхин	
УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО И ОГРАНИЧИВАЮЩЕГО ТИПА ДЛЯ СИЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 0,4 КВ	92
Н. М. Лепёхин, Н. Н. Швец, В. П. Мирошниченко, А. И. Орлов, Н. И. Пуресев, В. С. Сысоев, М. Ю. Охрименко, Е. В. Басов, Н. Г. Булгакова, В. П. Иванов, Э. Н. Фоминич	
ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕРАПИЯ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОГО УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ	94
М. Г. Лобок, В. Ю. Быченков	
ОДНОМЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ ДВУХКАСКАДНОЙ МИШЕНИ ПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ ДЛЯ МЕГАДЖОУЛЬНЫХ УСТАНОВОК С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 0,35 И 0,53 мкм	95
В. А. Лыков, Е. С. Андреев, Е. С. Бакуркина, Н. Г. Карлыханов, Г. Н. Рыкованов, В. Е. Черняков	
ИОНИЗАЦИОННЫЙ БАЛАНС НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ ПО РАДИАЦИОННО-СТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ СРЕДНЕГО АТОМА	96
А. А. Овечкин, П. А. Лобода, А. С. Королёв, С. В. Кольчугин, И. Ю. Вичев, А. Д. Соломянная, А. С. Грушин, Д. А. Ким	
СПОСОБЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИШЕНЕЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В ЛАЗЕРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ	96
Л. Е. Пешкичева, Д. С. Носуленко, Д. А. Вихляев, Ю. Ю. Смирнов, Д. И. Башкин	
РАСЧЕТЫ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ КВАЗИКЛАССИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СРЕДНЕГО АТОМА	97
А. С. Полухин, С. А. Дьячков, П. Р. Левашов	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОКАТОДОВ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА СПЕКТРА	98
Н. А. Пхайко, А. А. Кондратьев, С. Н. Пахомов, А. В. Потапов, И. А. Сорокин, А. С. Тищенко, Д. И. Башкин	
АСИМПТОТИЧЕСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ n -ГО ПОРЯДКА И УТОЧНЕННЫЕ ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ	99
С. А. Серов	
ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА «АЛЮР-П» – КОМПАКТНЫЙ ИМИТАТОР ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА	99
В. С. Сысоев, Н. Н. Швец, А. И. Орлов, Д. И. Сухаревский, Е. В. Басов, М. А. Гушин, А. В. Палицин, П. А. Микрюков, И. Ю. Зудин, Е. А. Мареев	
ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СВЕРХДЛИННЫХ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКАХ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОЦЕСС ГЕНЕРАЦИИ В НИХ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ	101
В. С. Сысоев, Л. М. Макальский, Ю. А. Кузнецов, М. Ю. Наумова	
ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНИСЦЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕОДИМОВЫХ СТЕКОЛ	102
Н. Ю. Титаренко, А. Г. Какшин, Е. А. Лобода	
РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЯЗКОСТИ И ИОННОЙ САМОДИФФУЗИИ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ МЕТОДОМ ПСЕВДОАТОМНОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ	102
А. Л. Фальков, П. А. Лобода, А. А. Овечкин	
СЕКЦИЯ 4. СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ПРОЦЕССАХ	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ, СОЗДАВАЕМЫХ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ	107
Лян Сунь, Сяоси Дуань, Юлун Ли, Вэймин Ян, Хао Лю, Чэнь Чжан, Хуань Чжан, Чжэбинь Ван, Цзяминь Ян, Шаоэнь Цзян	
ЗАВИСИМОСТЬ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ И СВОЙСТВ КРИСТАЛЛА НИОБАТА КАЛИЯ ОТ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ	108
Тао Чжан, Цянь У, Син У, Хун-лян Хэ	
ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МЕДИ, ЛЕГИРОВАННОЙ ЦИРКОНИЕМ, ХРОМОМ И ГРАФЕНОМ	108
Д. Н. Абдуллина, И. В. Хомская, С. В. Разорёнов, Л. А. Елшина, Е. В. Шорохов	
РАСЧЕТ СОСТАВА ЯДРА ЗЕМЛИ	110
В. Ф. Анисичкин	
УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ ВБЛИЗИ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ ЖИДКОСТЬ–ПАР	111
К. А. Боярских, К. В. Хищенко	

СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ С ГРАФЕНОМ	112
И. Г. Бродова, Л. А. Елшина, Е. В. Шорохов, Д. Ю. Распосиенко, И. Г. Ширинкина, А. Н. Петрова, С. В. Разорёнов, К. В. Гаан, Р. В. Мурадымов	
ВОЗМОЖНОСТИ БЕЗУДАРНОГО СЖАТИЯ МЕТАЛЛОВ ДО 40 Мбар ПРИ ИМПЛОЗИИ ЛАЙНЕРОВ ОТ ДИСКОВЫХ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ	112
А. М. Буйко	
АТОМИСТИЧЕСКОЕ И КОНТИНУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ	113
Д. С. Воронин, А. Е. Майер	
МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОВ	115
С. Д. Гилёв	
ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ МЕДИ ПРИ СИЛЬНОМ СЖАТИИ: РАВНОВЕСНАЯ МОДЕЛЬ И УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ЭКСПЕРИМЕНТ.	116
С. Д. Гилёв	
НЕРАВНОВЕСНОСТЬ ФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕДИ ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ	116
С. Д. Гилёв	
О МЕХАНИЗМАХ РАЗРУШЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЗРЫВНОЙ НАГРУЗКИ	117
Е. Ф. Грязнов, М. М. Бойко	
НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ДИНАМИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ БЕРИЛЛИЯ В ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ $10^3\div 10^5$ с ⁻¹	118
А. А. Дегтярёв, А. Е. Ковалёв, А. В. Кальманов	
ВНУТРИФОРМЕННОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ МЕДИ	119
А. А. Жданок, В. А. Кузнецов, З. А. Коротаева, Н. В. Степанова	
УДАРНОЕ СЖАТИЕ ГИДРИДОВ МЕТАЛЛОВ	120
М. В. Жерноклетов, Л. Ф. Гударенко, А. А. Каякин	
ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ НА СХОЖДЕНИЕ МЕДНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК	121
В. И. Зельдович, А. Э. Хейфец, Н. Ю. Фролова, А. А. Дегтярёв, Е. Б. Смирнов, Е. В. Шорохов	
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБРАЗЦАХ СТАЛИ 09Г2С, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО 3D-ПРИНТЕРА	123
Н. В. Казанцева, А. А. Исупова, Л. Ю. Егорова, Ю. Н. Коэмец, А. П. Ничипурук	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ УДАРНО-НАГРУЖЕННЫХ ОБРАЗЦОВ С ПОМОЩЬЮ КОМБИНАЦИИ ЛАЗЕРНО-ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ	124
В. Г. Каменев, Ю. Д. Арапов, П. В. Кубасов, П. Н. Ярошук, Д. П. Кучко, Д. Г. Панкратов, В. И. Таржанов, А. В. Воробьёв, А. Г. Попцов	
ШИРОКОДИАПАЗОННОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОДОРОДА ДЛЯ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ	125
А. В. Караваев, В. В. Дрёмов, Е. Е. Миронова	
СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ КРИПА ПРЕДЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ТВЕРДЫХ ОБРАЗЦОВ	126
Ф. Х. Каримов, Н. Г. Саломов	
ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НА КИНЕТИКУ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ: АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	126
Р. М. Кичигин, П. В. Чирков, В. В. Дрёмов, А. В. Караваев	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ СПЛОШНЫХ И ОБЪЕМНО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ, В ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ $10^2\text{--}10^3$ с ⁻¹	127
А. Ю. Гармашев, Е. Б. Смирнов, Е. А. Петухов, А. И. Клёнов, К. С. Сидоров, М. А. Шестириков, Д. Т. Юсупов, З. И. Завьялов, А. А. Борцов	
МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ	128
В. С. Красников, А. Е. Майер, В. В. Погорелко, Е. В. Фомин, Д. С. Воронин, Ф. Т. Латыпов, П. А. Безбородова, А. А. Эбель	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭКСТРУЗИИ МАТЕРИАЛОВ ЧЕРЕЗ МАТРИЦУ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ	128
П. А. Кузнецов, А. П. Яловец	

ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ В РАБОТАХ ИПХФ РАН	129
И. В. Ломоносов	
РАСЧЕТЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ В ОКРЕСТНОСТИ КРИВЫХ ПЛАВЛЕНИЯ И ИСПАРЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ КВАНТОВОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ	129
Д. В. Минаков, М. А. Парамонов, П. Р. Левашов	
ШИРОКОДИАПАЗОННОЕ МНОГОФАЗНОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ПЛАТИНЫ	130
В. Н. Михайлов, В. М. Елькин, А. А. Овечкин, Н. А. Смирнов	
МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАДРОМОРФНОЙ ТЕКСТУРЫ МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК	130
Р. Ф. Муфтахетдинова, В. И. Гроховский, Г. А. Яковлев	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПОЛИКАРБОНАТА МАРКИ ПК-ЭТ-3,5 ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ	131
М. С. Мытарев, А. В. Павленко, С. Н. Малюгина, А. С. Майорова, Д. Н. Казаков, С. С. Мокрушин	
МНОЖЕСТВЕННЫЕ МЕТАСТАБИЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ И МЕХАНИЗМЫ ПЕРЕНОСА ИМПУЛЬСА ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ	132
О. Б. Наймарк	
СКОРОСТИ ЗВУКА В СВИНЦЕ ПРИ ЕГО ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ	133
Д. Г. Панкратов, А. К. Якунин, А. Г. Попцов, В. Н. Михайлов	
ПЕРВОПРИНЦИПНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВОЙСТВ ЦИРКОНИЯ В ЖИДКОМ И ОКОЛОКРИТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИЯХ	134
М. А. Парамонов, Д. В. Минаков, В. Б. Фокин, П. Р. Левашов	
ПОСТРОЕНИЕ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ НА ОСНОВАНИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО УДАРНО-ВОЛНОВОМУ НАГРУЖЕНИЮ	135
Е. В. Помыкалов, Ю. М. Ковалёв	
СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ГАФНИЕВОЙ БРОНЗЕ ПРИ НАГРЕВЕ ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ И ДЕФОРМАЦИИ МЕТОДАМИ ДИНАМИЧЕСКОГО КАНАЛЬНО-УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ И КРУЧЕНИЯ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ	136
В. В. Попов, Р. М. Фалахутдинов, Е. Н. Попова, А. В. Столбовский, К. В. Гаан, Е. В. Шорохов	
СКОРОСТИ ЗВУКА В УДАРНО-СЖАТОМ УРАНЕ В ДИАПАЗОНЕ 20–250 ГПа	137
А. Г. Попцов, Д. Г. Панкратов, А. К. Якунин, Д. Т. Юсупов	
СОУДАРЕНИЕ ПРОФИЛИРОВАННЫХ МЕДНЫХ ЦИЛИНДРОВ С ЖЕСТКОЙ СТЕНКОЙ: ЭКСПЕРИМЕНТ И МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ	138
Е. С. Родионов, В. Г. Лупанов, Н. А. Грачёва, П. Н. Майер, А. Е. Майер	
ВЛИЯНИЕ ГРАФЕНА НА СТОЙКОСТЬ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ К ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМ И ДИНАМИЧЕСКИМ МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ	139
Г. Г. Савенков, А. Ю. Константинов, А. В. Кузнецов, В. В. Столяров	
РАСЧЕТ УДАРНЫХ АДИАБАТ СПЛАВОВ ПРИ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЯХ ЭНЕРГИИ	140
Н. Н. Середкин, К. В. Хищенко	
ПЕРВОПРИНЦИПНЫЕ РАСЧЕТЫ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ Cu, Ag И Pt ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ	140
Н. А. Смирнов	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКОЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ АЛЮМИНИЯ ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ	141
И. А. Стучебрюхов, А. Ю. Семёнов, К. В. Хищенко	
ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ МЕТОДАМИ ДИНАМИЧЕСКОГО КАНАЛЬНО-УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ И КРУЧЕНИЯ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ГАФНИЕВОЙ БРОНЗЫ	141
Р. М. Фалахутдинов, В. В. Попов, Е. Н. Попова, А. В. Столбовский, К. В. Гаан, Е. В. Шорохов	
ДВИЖЕНИЕ МАЛОУГЛОВЫХ СИММЕТРИЧНЫХ ГРАНИЦ ЗЕРЕН НАКЛОНА В ЧИСТЫХ ГЦК МЕТАЛЛАХ И Al-Cu СПЛАВАХ	142
Е. В. Фомин, А. Е. Майер, В. С. Красников	
МОБИЛЬНАЯ СИСТЕМА ПИТАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА БЕТАТРОНА ТИПА БИМ	143
В. А. Фомичёв, К. В. Савченко, Ю. П. Куропаткин, В. И. Нижегородцев, И. Н. Романов, В. Д. Селемир, Е. В. Урлин, А. А. Чинин, О. А. Шамро	
УДАРНАЯ СЖИМАЕМОСТЬ И УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ОКСИДА БЕРИЛЛИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ	143
К. В. Хищенко, К. К. Крупников, Ю. Н. Жугин, А. Ю. Николаев, Е. Б. Смирнов, Д. В. Петров	

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ХРОМА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ	144
К. В. Хищенко	
СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И СВОЙСТВА СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ МЕДИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ	144
И. В. Хомская, В. И. Зельдович, Е. В. Шорохов, С. В. Разорёнов, Д. Н. Абдуллина, Н. Ю. Фролова, А. Э. Хейфец	
МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ВНУТРИЗЕРЕННЫХ ДЕФЕКТОВ НА КИНЕТИКУ РОСТА ЗЕРЕН В НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МЕДИ	146
П. В. Чирков, Р. М. Кичигин, А. В. Караваев, В. В. Дрёмов	
МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ МОБИЛЬНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ НА БАЗЕ БЕТАТРОНА ТИПА БИМ	146
О. А. Шамро, Ю. П. Куропаткин, В. И. Нижегородцев, И. Н. Романов, К. В. Савченко, В. Д. Селемир, Е. В. Урлин, В. А. Фомичёв, А. А. Чинин	
НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ В УСЛОВИЯХ ПРОТЕКАНИЯ ЛАЗЕРНОИНИЦИИРУЕМЫХ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ	147
В. Г. Шевченко, Д. А. Еселевич, А. В. Конюкова	
СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СПЛАВА АК6, ПОЛУЧЕННОГО СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ СПЛАВЛЕНИЕМ	148
И. Г. Ширинкина, И. Г. Бродова, А. Н. Клёнов, Е. Б. Смирнов, Н. Ю. Орлова, В. В. Астафьев, Т. И. Яблонских	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИНХРОТРОННОЙ ДИАГНОСТИКИ	149
А. П. Яловец, Е. С. Шестаковская, Н. Л. Клиначева	
СЕКЦИЯ 5. НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ	
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ УРАНИЛ(VI)-ПЕПТИДНЫХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ ПОМОЩИ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ И РАСЧЕТА ТФП	153
С. Ши, З. Цинь, Й. Рен, С. Ван, С. Ван	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОНОКЛОНАЛЬНЫХ АНТИТЕЛ, МАРКИРОВАННЫХ ⁸⁹ Zr И ¹⁷⁷ Lu, ДЛЯ ПЭТ-ДИАГНОСТИКИ И РАДИОТЕРАПИИ РАКА	153
Ся Ян, Цзин Ван, Пен Чжао, Лянан Чжо, Вэй Ляо, Янь Чжао, Ючуань Ян, Шумин Пен	
РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ СО СФЕРИЧЕСКИМИ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ РАЗМНОЖАЮЩИМИ СИСТЕМАМИ ИЗ ПЛУТОНИЯ	154
В. А. Адарченко, Д. В. Хмельницкий, С. В. Самарина, Л. С. Ершова, О. О. Рубцова	
РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ИСПЫТАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК ПАССИВНЫХ КАТАЛИТИЧЕСКИХ РЕКОМБИНАТОРОВ ВОДОРОДА	155
Е. В. Безгодков, В. М. Крюков, С. Д. Пасюков, М. В. Никифоров, А. А. Тараканов, И. А. Попов, Д. Л. Мошкин, Ю. Ф. Давлетчин, В. А. Симоненко	
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ «ПЛАВУЧИХ» И «ЯЧЕЙСТЫХ» ПЛАМЕН	155
И. В. Глазырин, Н. Б. Аникин, И. А. Кириллов, О. Г. Котова, Н. А. Михайлов, А. В. Павленко, В. А. Симоненко, А. А. Тяктев, М. Н. Чижков	
ОБНАРУЖЕНИЕ ПРИЗНАКОВ НАРУШЕНИЙ ГОСУДАРСТВОМ-ИМПОРТЕРОМ БЫСТРОГО РЕАКТОРА С ЗАМКНУТЫМ ЯТЦ СВОИХ ОБЯЗАТЕЛЬСТВ ПО ЯДЕРНОМУ НЕРАСПРОСТРАНЕНИЮ	157
Н. В. Горин, А. Л. Карманов, В. Н. Первиненко, В. В. Власов, Н. А. Теплых, В. П. Кучинов, А. Н. Чебесков, В. В. Шидловский	
ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕЖИМА ЯДЕРНОГО НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИ ЭКСПОРТЕ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ С ЗАМКНУТЫМ ЯТЦ	158
Н. В. Горин, Е. В. Кузнецов, Н. П. Волошин, Ю. И. Чуриков, А. Н. Чебесков, В. П. Кучинов, Е. О. Адамов, В. В. Шидловский	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ И ДИНАМИКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИ РАСШИРЯЮЩИХСЯ УЛЬТРА-БЕДНЫХ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ ПЛАМЕН В УЗКОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ КАНАЛЕ	160
В. П. Денисенко, С. С. Кингсеп, И. А. Кириллов, А. С. Мелихов, В. Ю. Плаксин	
О ПЕРЕХОДЕ ОТ ШАРОВЫХ ПЛАМЕН К ДЕФЛАГРАЦИИ В СМЕСЯХ ВОДОРОД–ВОЗДУХ	161
И. А. Кириллов	
РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ СОВРЕМЕННЫХ РЕАКТОРОВ	161
Е. И. Курбатова, А. И. Ксенофонтов, Д. А. Савин	

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ АКТИВАЦИЯ ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ ДИСПЕРСНОГО АЛЮМИНИЯ ВОДОЙ	162
М. Н. Ларичев, Н. С. Шайтура	
СИСТЕМА КОДОВ ДЛЯ РАСЧЕТНОГО ОБОСНОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЙ ЗЯТЦ	163
И. Р. Макеева	
ДИФФУЗИЯ И МЕХАНИЗМЫ МИГРАЦИИ КАТИОНОВ ТОРИЯ В КРИСТАЛЛЕ ThO ₂ . МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	164
К. А. Некрасов, Д. Сеитов, С. С. Пицхелаури, А. С. Боярченко	
О РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИКИ ДЛЯ РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РАДИОХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ	166
И. В. Пешкичев, Я. С. Драморецкая, И. Р. Макеева, А. В. Родин	
РОЛЬ МЕЖДОУЗЕЛЬНЫХ КЛАСТЕРОВ ПРИ РАСЧЕТЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ	167
П. А. Покаташкин, А. В. Янилкин	
РАСЧЕТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПИРАМИДАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ В СРЕДЕ COMSOL MULTIPHYSICS	167
В. В. Савельев, В. А. Сапунов, А. В. Сергеев	
СОСТАВЛЯЮЩИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЯДЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ	168
А. А. Садовский	
ЗАДАЧИ СИСТЕМНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ	169
В. А. Симоненко	
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ КОМПЛЕКС РФЯЦ – ВНИИТФ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ОПАСНЫМ ФАКТОРАМ ИСТЕЧЕНИЯ, ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА ВОДОРОДОСодержащих газových смесей	171
А. А. Тараканов, Н. Б. Аникин, Е. В. Безгодков, Ю. Ф. Давлетчин, Д. Л. Мошкин, М. В. Никифоров, С. Д. Пасюков, И. А. Попов, А. А. Тягтев, Ю. С. Уфимцев, А. В. Ушков, Д. В. Фролов, В. А. Симоненко	
ПРИМЕНЕНИЕ ПК «ВИЗАРТ» ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЕВ РЕАЛИЗАЦИИ ЗЯТЦ И ОПТИМИЗАЦИИ ЗАТРАТ НА ОБРАЩЕНИЕ С РАО	172
Л. Р. Файрушина, И. Р. Макеева, В. Ю. Пугачев, Н. Д. Дырда	
РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ К УСТАНОВЛЕНИЮ ЕДИНЫХ НОРМАТИВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ПРЕДЕЛОВ БЕЗОПАСНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПАССИВНЫХ КАТАЛИТИЧЕСКИХ РЕКОМБИНАТОРОВ	173
Н. Л. Харитоновна, И. А. Кириллов, В. А. Симоненко, Е. В. Безгодков	
РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ УСТАНОВКИ БМ-П ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ПАССИВНЫХ КАТАЛИТИЧЕСКИХ РЕКОМБИНАТОРОВ ВОДОРОДА	174
Е. М. Щенникова, Ю. А. Томилов	
СЕКЦИЯ 6. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ, ПРОГРАММЫ И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ	
ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕСТА СТИВЕНА ПРИ ПОМОЩИ КОМБИНИРОВАННОГО КОНЕЧНО- И ДИСКРЕТНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МЕТОДА	179
Хуан Бинь-бинь, Фу Хуа, Юй Инь, Ли Тао	
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЧНОСТИ НА РАСТЯЖЕНИЕ ДЛЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ВВ	179
Ли Кэ-у, Фу Хуа, Ли Тао, Чжэн Сянь-суй	
ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ И УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ β-ОКТОГЕНА ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ	180
Суй Чжилэй, Чун Тао, Чжэн Сяньсуй	
3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ПРОНИКНОВЕНИИ В ПЛАСТИЧЕСКОЕ ВВ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	181
Вэй И, Ху Цюши, Фу Хуа, Ли Тао	
КОНТРПРИМЕР К ОДНОЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ГИПОТЕЗЕ	181
С. П. Баутин	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗУДАРНОГО СЖАТИЯ ГАЗА ИЗ ПОКОЯ В ПОКОЙ ПРИ ЗАДАННОМ ЗАКОНЕ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	182
С. П. Баутин, Ю. В. Николаев	
ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РЕАЛИЗАЦИИ И ПРИМЕНЕНИЯ (k-ε)-МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В КОНЕЧНООБЪЕМНОМ ПОДХОДЕ	184
М. И. Болдырев, И. В. Глазырин, Н. А. Михайлов, М. Н. Чижков	

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ВЗРЫВЗАСЛОНКИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗАКЛАДКАХ ВВ	185
И. О. Боровский, С. В. Балущкин, Г. В. Куликов, М. А. Липатников, М. В. Никульшин, А. Ю. Симонов, А. Н. Хрулёв	
ЧАСТНЫЕ РЕШЕНИЯ ЛИНЕАРИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ ПРИ УЧЕТЕ ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ КОРИОЛИСА	186
А. А. Бугаенко, И. Ю. Крутова	
ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛОКАЛЬНЫХ ДИСКРЕТНЫХ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТАХ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ	187
М. В. Ветчинников, М. А. Дёмина, Н. С. Самсонова, В. Н. Софронов	
МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ ЛОГОС ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ТЕПЛОВЫМ ВЗРЫВОМ ВВ НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОСТАДИЙНОЙ КИНЕТИКИ ТЕРМОРАЗЛОЖЕНИЯ	187
А. Ю. Вишняков, А. А. Кабаев, В. А. Глазунов, С. А. Кабаев	
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О ТОЧЕЧНОМ ВЗРЫВЕ	188
В. И. Волков, Н. С. Еськов, В. Н. Ногин	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОУДАРЕНИЯ ПРОФИЛИРОВАННЫХ МЕДНЫХ ЦИЛИНДРОВ С ЖЕСТКОЙ СТЕНКОЙ	189
Н. А. Грачёва, Е. С. Родионов, А. Е. Майер	
ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ И ТЕПЛООБМЕН В ЗАПЫЛЕННОМ ГАЗЕ	190
О. Н. Дементьев, Г. Ф. Костин, Н. Н. Тихонов	
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ НАНОКОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ РММА	190
Н. С. Дюрягина, А. П. Яловец	
СОСТОЯНИЕ УДАРНИКА В УСЛОВИЯХ ПРОНИКАНИЯ В БЕТОН	192
Е. Ю. Емельянова, В. В. Доценко, М. В. Никульшин, В. В. Титов	
РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОБИВАНИЯ ПРОТИВООСКОЛОЧНЫХ ПРЕГРАД ТРЕХМЕРНЫМИ ОСКОЛКАМИ	192
О. С. Илютина, М. Ю. Сахаров	
ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ РЕШЕНИЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ ПРИ УЧЕТЕ ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ КОРИОЛИСА	193
А. О. Казачинский	
МОДЕЛЬ И ОДНОМЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ МИШЕНИ В СФЕРИЗОВАННОМ ХОЛЬРАУМЕ С УЧЕТОМ ПОТЕРЬ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ ДЛЯ ВВОДА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	193
Н. Г. Карлыханов, В. А. Лыков	
АЛГОРИТМ ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ В ЗАДАЧАХ МСС С СУЩЕСТВЕННЫМ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ПРОЦЕССАМИ	194
А. В. Карпеев	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСХОДЯЩЕГО ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА ГАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КООРДИНАТ	195
С. Н. Кононов, С. П. Баутин, Э. С. Левунина	
МЕТОДИКА ЛЭГАК РАСЧЕТА МНОГОМЕРНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЛОЧНО-СТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТОК СПЕЦИАЛЬНОГО ВИДА	196
С. А. Краюхин, Н. А. Володина, А. О. Наумов, С. В. Стародубов, Т. В. Резвова, К. В. Циберев, М. О. Ширшова, Е. В. Шувалова	
АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА В ВОСХОДЯЩИХ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКАХ	197
И. Ю. Крутова	
УСВОЕНИЯ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ АЛЬТИМЕТРИИ В МОДЕЛИ ЦИРКУЛЯЦИИ ОКЕАНА НЕМО	198
К. П. Беляев, А. А. Кулешов, И. Н. Смирнов	
ПОСТРОЕНИЕ ВОСХОДЯЩИХ ЗАКРУЧЕННЫХ ВИХРЕЙ В ОКРЕСТНОСТИ ВНЕШНИХ ГРАНИЦ ЦИКЛОНА	199
А. В. Мезенцев, С. Л. Дерябин	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ РЕАКЦИОННОСПОСОБНЫХ ГАЗОВЗВЕСЕЙ ПРИ ЗАКРУТКЕ ПОТОКА	200
К. М. Моисеева, А. Ю. Крайнов	

РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НА АДАПТИВНО-ВСТРАИВАЕМЫХ СЕТКАХ МЕТОДОМ ПРОГОНКИ	201
А. М. Мустафин, С. Н. Лебедев, Н. Н. Пашенцева	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА И ПЛАВЛЕНИЯ МИКРОЧАСТИЦЫ ЖЕЛЕЗА ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ	201
А. М. Мустафин, С. Н. Лебедев, Н. Н. Пашенцева	
РЕАЛИЗАЦИЯ И ТЕСТИРОВАНИЕ МНОГОТЕМПЕРАТУРНОГО ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ В ТРЕХМЕРНОЙ ПРОГРАММЕ «ФОКУС»	202
К. С. Назаров, И. В. Глазырин, Н. А. Михайлов	
АЛГОРИТМЫ ВОКСЕЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ НАУЧНЫХ ДАННЫХ	203
В. С. Натънчик, А. В. Климов	
ОБ ОДНОЙ ФОРМЕ ИСКУССТВЕННОЙ ВЯЗКОСТИ ТЕНЗОРНОГО ВИДА ДЛЯ РАСЧЕТА ТРЕХМЕРНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ	203
А. О. Наумов	
ЗАДАЧА ОБ ОТРАЖЕНИИ ЦЕНТРИРОВАННОЙ ВОЛНЫ РАЗРЕЖЕНИЯ ОТ «МЯГКОГО» ПОРШНЯ	204
В. Н. Ногин	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВОГО ИСТОЧНИКА НА ТЕЧЕНИЕ ГАЗА В ВОСХОДЯЩЕМ ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ	205
А. Г. Обухов	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИДОННЫХ ЧАСТЕЙ ТОРНАДО И ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА В СТАЦИОНАРНОМ СЛУЧАЕ	206
О. В. Опрышко	
РЕШЕНИЕ МНОГОГРУППОВОГО УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА НЕЙТРОНОВ В СФЕРИЧЕСКИХ КООРДИНАТАХ НА ДВУМЕРНЫХ НЕРЕГУЛЯРНЫХ СЕТКАХ	207
Т. В. Пономарёва, Э. М. Вазиев, А. Д. Гаджиев	
ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ РАССТАНОВКИ ЧАСТИЦ НА СФЕРИЧНОСТЬ УДАРНО-НАГРУЖЕННОЙ ГРАНИЦЫ ВЕЩЕСТВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РИХТМАЙЕРА–МЕШКОВА SPH-МЕТОДОМ	207
Ф. А. Сапожников, В. С. Рыкованов	
ЭГИДА-ТЕСТ-GPU. АДАПТАЦИЯ МЕТОДИКИ ЭГАК К СЧЕТУ НА GPU	208
Е. А. Сизов, А. М. Ерофеев	
ВЛИЯНИЕ МАКСИМУМА ПЛОТНОСТИ ВОДЫ НА ОХЛАЖДЕНИЕ ВОДОНАСЫЩЕННОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ	209
О. А. Симонов, Л. Н. Филимонова	
АЛГОРИТМ РЕТРОСПЕКТИВНОГО АНАЛИЗА МЕСТНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ	210
Н. А. Теплых, А. Л. Карманов, В. В. Власов, В. В. Фёдоров	
МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ С УЧЕТОМ АБЛЯЦИОННОГО УНОСА МАССЫ В МОДУЛЕ «ЛОГОС ТЕПЛО»	211
Р. А. Тришин, В. А. Глазунов, Ю. Д. Серяков	
ПРОЧНОСТЬ ГЕРМОКАПСУЛЫ ПРИ АВАРИЙНОМ ПАДЕНИИ С ВЫСОТЫ 9 МЕТРОВ	212
Н. Н. Тулаева, М. А. Липатников, И. В. Минаев, М. В. Никульшин, А. А. Табатчиков	
УЧЕТ СПЕКТРАЛЬНЫХ И КИНЕТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В ПРИБЛИЖЕНИИ ЛУЧИСТОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ ЗАДАЧ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ В ДВУМЕРНОМ ОСЕСИММЕТРИЧНОМ СЛУЧАЕ НА ПРЯМОУГОЛЬНОЙ СЕТКЕ	212
А. Д. Хмельницкая, Н. Г. Карлыханов	
ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ ОБОБЩЕННОЙ МОДЕЛИ ИЗИНГА НА КВАДРАТНОЙ РЕШЕТКЕ КОМБИНАТОРНЫМ МЕТОДОМ ВДОВИЧЕНКО-ФЕЙНМАНА	213
Е. С. Цуварев, Ф. А. Кассан-Оглы	
МОНОТОННЫЙ МЕТОД ДРОБНЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ДВУМЕРНЫХ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ	214
И. Е. Чередниченко, В. А. Шмелёв, Ю. В. Янилкин	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА И ПОГЛОЩЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МИШЕНЯХ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА С НЕПРЯМЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ	215
И. С. Чубарешко, А. В. Вронский, А. А. Шестаков	

ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЭФФЕКТОВ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЯХ НА РАЗВИТИЕ КОРОТКОВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В МИШЕНЯХ ИТС	216
А. А. Шестаков, В. А. Лыков, Е. Л. Лягина	
О ПРОБЛЕМЕ ПЛОХОЙ ОБУСЛОВЛЕННОСТИ ПРИ РЕШЕНИИ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ПЕРЕНОСА ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	216
А. А. Шестаков	
ТЕСТОВЫЕ ЗАДАЧИ НА СЖАТИЕ СФЕРИЧЕСКИХ СЛОИСТЫХ СИСТЕМ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ	217
А. А. Шестаков	
ОБ ОДНОМ ЛАГРАНЖЕВО-ЭЙЛЕРОВОМ МЕТОДЕ РАСЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ СЖИМАЕМЫХ СРЕД	217
Е. С. Шестаковская, Ф. Г. Магазов, И. Р. Макеева	
ДВУМЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ СЖАТИЯ И ГОРЕНИЯ ДВУХКАСКАДНОЙ МИШЕНИ ДЛЯ ЛТС С НЕПРЯМЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ	218
А. Н. Шушлебин, В. А. Лыков, Л. В. Соколов, Д. В. Борецких	
СЕКЦИЯ 7. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ МЕДИЦИНСКИХ ЗАДАЧ	
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В ЭПИДЕМИОЛОГИИ: РЕШЕНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ НА ПРИМЕРЕ ЭПИДЕМИОЛОГИИ ТУБЕРКУЛЕЗА	223
К. К. Авилов	
НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПОЛУЧЕНИЯ ДАННЫХ ДЛЯ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИНФЕКЦИОННЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ	224
В. И. Балута	
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ SIR РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭПИДЕМИИ COVID-19	225
Ю. Е. Балыкина, В. В. Захаров	
ТЕХНОЛОГИЯ СБОРА И ОБРАБОТКИ НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ ДАННЫХ ИЗ СЕТИ ИНТЕРНЕТ	226
С. С. Варыханов, А. А. Карандеев	
ФОРМУЛА ЭПИДЕМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВИЧ-ИНФЕКЦИИ	226
Е. И. Веселова, Э. В. Карамов, Ю. И. Простов, Д. А. Семёнова, А. С. Тургиев, Г. Д. Каминский	
КОНЦЕПЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКА ТЕМАТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В СЕТИ ИНТЕРНЕТ	228
В. В. Власов	
УЧЕТ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ В АГЕНТНОЙ МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ ЭПИДЕМИИ ВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИИ	229
А. М. Дерябин, А. А. Брагин, В. В. Власов, О. В. Зацепин, А. Л. Карманов, С. Н. Лебедев, Г. Н. Рыкованов, С. И. Самарин, А. В. Соколов, Н. А. Соломин, Н. А. Теплых, М. С. Ураков, К. Е. Хатунцев	
АГЕНТНАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ ЭПИДЕМИИ COVID-19	230
О. В. Зацепин, А. А. Брагин, В. В. Власов, А. М. Дерябин, Г. Д. Каминский, Э. В. Карамов, А. Л. Карманов, С. Н. Лебедев, Г. Н. Рыкованов, С. И. Самарин, А. В. Соколов, Н. А. Соломин, Н. А. Теплых, А. С. Тургиев, М. С. Ураков, К. Е. Хатунцев	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА СИСТЕМЫ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ НА РАЗВИТИЕ ЭПИДЕМИИ	231
А. А. Звекон, А. В. Каленский, А. С. Зверев, М. В. Ананьева, Е. С. Помесечная	
СИМУЛЯЦИЯ КЛОНОВОГО ВЗРЫВА В НЕПРЕРЫВНОЙ МОДЕЛИ ЭПИДЕМИЙ	232
Г. Д. Каминский	
БУДУЩЕЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЭПИДЕМИОЛОГИИ – ВЗГЛЯД ВРАЧА	233
Г. Д. Каминский	
УПРАВЛЕНИЕ ЭПИДЕМИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ВИЧ-ИНФЕКЦИИ	234
Г. Д. Каминский, Е. И. Веселова, Э. В. Карамов, Ю. И. Простов, А. С. Тургиев, Д. А. Семёнова	
НЕКОТОРЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭКОЛОГИИ ЧЕЛОВЕКА	236
Ф. Х. Каримов	
ПЛАТФОРМА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ СБОРА ИНФОРМАЦИИ ИЗ ОТКРЫТЫХ ИСТОЧНИКОВ	237
А. Л. Карманов, В. В. Власов, Н. А. Теплых, В. Н. Первиненко	
ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ В ОБРАТНЫХ ЗАДАЧАХ ЭПИДЕМИОЛОГИИ (ОБЗОР)	238
А. Б. Коновалов, В. В. Власов	

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ИЗУЧЕНИЮ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПАНДЕМИИ КОВИД-19	239
С. П. Левашкин, О. И. Захарова	
ЭМПИРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОСТИ ОБЩЕСТВА В УСЛОВИЯХ ПАНДЕМИИ COVID-19: ПОСТРОЕНИЕ ПРОГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ	240
Е. М. Лоскутов, А. Ф. Селезнёв, В. В. Вдовин, Д. Н. Мухин, А. С. Гаврилов, А. М. Фейгин	
ЭМПИРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОСТИ ОБЩЕСТВА В УСЛОВИЯХ ПАНДЕМИИ COVID-19: ВЫБОР ДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ И ФОРСИНГОВ	240
Д. Н. Мухин, А. Ф. Селезнёв, В. В. Вдовин, Е. М. Лоскутов, А. С. Гаврилов, А. М. Фейгин	
АГЕНТНАЯ МОДЕЛЬ МНЕНИЙ КАК ИНСТРУМЕНТ ОПИСАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ОБЩЕСТВА В УСЛОВИЯХ ЭПИДЕМИИ	241
Д. Н. Мухин, С. Е. Сафонов, А. Ю. Мухина, Е. М. Лоскутов, А. М. Фейгин	
СХОДИМОСТЬ ИНТЕГРАЛЬНОЙ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ МОДЕЛЕЙ ЭПИДЕМИЙ ПРИ РАВНОМЕРНОМ ПРОФИЛЕ ЗАРАЗНОСТИ	242
М. Ю. Простов, Д. А. Семёнова, В. В. Чернецова, Г. Д. Каминский	
СХОДИМОСТЬ ИНТЕГРАЛЬНОЙ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ МОДЕЛЕЙ ЭПИДЕМИЙ ПРИ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОМ ПРОФИЛЕ ЗАРАЗНОСТИ	243
М. Ю. Простов, Д. А. Семёнова, Г. Д. Каминский	
УСТОЙЧИВОСТЬ ЭПИДЕМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА	245
Ю. И. Простов, М. Ю. Простов, Г. Д. Каминский	
СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЛЕЧЕНИЯ ПАЦИЕНТОВ С ОДИНОЧНЫМИ МЕТАСТАЗАМИ КОЛОРЕКТАЛЬНОГО РАКА В ПЕЧЕНЬ	247
Д. А. Рогачёва, М. М. Сарычева, Е. Я. Мозерова, А. А. Ложков, Д. М. Тимохина, Р. Ю. Карабут, А. Ю. Максимовская, Ж. Е. Сабельникова	
ПОПУЛЯЦИОННАЯ ДИНАМИКА ПСИХИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ. ПЕРЕМЕННЫЕ, ПРОЦЕССЫ, СЦЕНАРИИ	248
А. А. Романюха	
ВЗГЛЯД НА СИСТЕМЫ КВАЗИЛИНЕЙНЫХ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ	249
Ю. Г. Рыков	
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СТЕРЕОТАКСИЧЕСКОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ ПРИ РАКЕ ПОЧКИ	250
Ж. Е. Сабельникова, М. М. Сарычева, И. А. Важенин, Е. Я. Мозерова, А. Т. Жумбаева	
ВОЗМОЖНОСТИ ПОВТОРНОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ В ЛЕЧЕНИИ ПАЦИЕНТОВ С РЕЦИДИВАМИ ГЛИОМ НИЗКОЙ СТЕПЕНИ ЗЛОКАЧЕСТВЕННОСТИ	250
М. М. Сарычева, Р. Ю. Карабут, Е. Я. Мозерова, А. А. Ложков, Д. М. Тимохина, А. Ю. Максимовская, Ж. Е. Сабельникова, Д. А. Рогачева	
НЕЛИНЕЙНОСТЬ ЭПИДЕМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВИРУСНЫХ ИНФЕКЦИЙ	251
Д. А. Семёнова, М. Ю. Простов, Э. В. Карамов, А. С. Тургиев, Г. Д. Каминский	
МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕРИЙНЫХ ПОДЪЕМОВ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ	253
Д. А. Семёнова	
ПОСТРОЕНИЕ ПРОГНОЗА РАЗВИТИЯ ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ В ОЧАГАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИИ ЧЕРЕЗ ЕЖЕДНЕВНЫЕ СОЦИАЛЬНЫЕ КОНТАКТЫ ЖИТЕЛЕЙ	253
А. В. Тараник, С. Н. Лебедев, И. А. Литвиненко, Г. В. Байдин, О. Н. Павленко, М. Г. Белова, Е. В. Бесова	
ЭПИДЕМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС В НЕБОЛЬШОМ КОЛЛЕКТИВЕ	255
А. Л. Фальков	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТРЫХ И ХРОНИЧЕСКИХ ВИРУСНЫХ ИНФЕКЦИЙ	255
В. В. Чернецова, Э. В. Карамов, М. Ю. Простов, Ю. И. Простов, Д. А. Семёнова, А. С. Тургиев, Г. Д. Каминский	
ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ АКУСТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ В МЕДИЦИНЕ: ТЕОРИЯ И АЛГОРИТМЫ	258
М. А. Шишленин, Н. С. Новиков, С. И. Кабанихин	
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ	260

CONTENS

PLENARY SESSIONS

NUCLEAR POWER AS A BACKBONE OF ENERGY AND ENVIRONMENTAL SECURITY	5
E. O. Adamov	
SOLID-DENSITY PLASMA CREATED BY DIRECT AND INDIRECT IMPACT OF SUB-PW PICOSECOND LASER PULSES	6
S. A. Pikuz, A. S. Martynenko, L. Antonelli, C. D. Baird, F. Barbato, N. Booth, G. Boutoux, L. N. K. Döhl, P. Durey, D. Farley, L. Giuffrida, S. B. Hansen, J. J. Honrubia, E. Hume, J. Jacoby, D. Khaghani, K. Lancaster, P. McKenna, C. D. Murphy, P. Neumayer, O. Rosmej, S. N. Ryazantsev, J. J. Santos, I. Yu. Skobelev, C. Spindloe, O. Turianska, D. Batani, N. Woolsey	
SUPERCOMPUTER TECHNOLOGIES: PROBLEMS AND PROSPECTS	7
B. N. Chetverushkin	
VIRAL INFECTIONS OF XXI CENTURY: SIMULATION OF EPIDEMICS	8
E. V. Karamov	

SECTION 1. SPACE PROTECTION OF THE EARTH, HIGH-INTENSITY PROCESSES AND TURBULENCE

ON THE CAUSES OF CHANGES IN THE MAGNETIC FIELD AND CLIMATE OF THE EARTH	11
V. F. Anisichkin	
EXPERIMENTAL STUDY OF DAMPING EXPLOSIVE LOAD USING DIAPHRAGM RINGS	12
S. V. Balushkin, A. Yu. Simonov, G. V. Kulikov, V. I. Belyakov, M. V. Nikiforov, S. D. Pasyukov, V. P. Kachaev, A. A. Tarakanov, V. N. Shcherbakov, A. S. Stepanov, I. N. Gordeev, A. K. Muzyrya, S. M. Ulyanov	
INTERACTIONS OF GALACTIC COMETS WITH ASTEROID BELT BODIES. ORIGIN OF LONG-PERIODIC AND SHORT-PERIODIC COMETS	13
A. A. Barenbaum	
ON EJECTION OF PARTICLES FROM THE FREE SURFACE OF COPPER LINERS UNDER SHOCKWAVE, QUASI-ENTHROPIC AND ISENTHROPIC REGIMES OF THEIR ACCELERATION	14
I. A. Blinov, V. A. Ogorodnikov, S. V. Yerunov, A. O. Blikov, E. V. Kulakov, E. A. Chudakov, M. V. Antipov, K. N. Panov, M. A. Syrunin, V. N. Knyazev, N. B. Davydov, A. B. Georgievskaya, A. O. Yagovkin, I. V. Yurtov, D. N. Zamyslov, A. V. Kotin	
MATERIALS SCIENCE QUESTIONS OF ASTEROID SAFETY	15
V. I. Grokhovsky	
PULSE X-RAY DEVICE BASED ON TESLA TRANSFORMER WITH INHOMOGENEOUS FORMING LINE IN THE DISCHARGE CIRCUIT	16
A. V. Dolgikh, E. I. Palchikov, V. V. Klypin, M. S. Samoylenko, A. M. Ryabchun	
FINDINGS ON DIAGNOSING THE SIZE OF FOCAL SPOT OF LINEAR-INDUCTION ACCELERATOR	16
P. A. Kolesnikov, V. Yu. Politov, S. A. Kolesnikov, A. R. Akhmetov, A. V. Kaplunov, V. Yu. Evert, O. A. Chernitsa, O. A. Nikitin, Yu. A. Trunev, D. I. Skovorodin, M. G. Atlukhanov, A. V. Burdakov, V. V. Danilov, V. V. Kurkuchekov, S. S. Popov, K. I. Zhivankov	
APPLICATION OF SIMULTANEOUS MEASUREMENTS BY PHOTON DOPPLER VELOCIMETRY AND THE COHERENT BACKSCATTERING FOR PROBING EJECTA FROM SHOCK-LOADED SAMPLES	17
A. N. Kondrat'ev, A. V. Andriyash, Sh. M. Ismailov, V. G. Kamenev, G. V. Kaplyukov, P. V. Kubasov, S. E. Kuratov, D. B. Rogozkin, A. A. Tihov, I. V. Tur, A. S. Shubin, S. A. Shubin, P. N. Yaroshchuk	
A MODEL OF THE BIG BANG AND THE EXPANSION OF THE UNIVERSE IN GENERAL RELATIVITY WITH A SPREAD OF THE FINITE MASS OF GAS FROM A POINT TO A VOID	18
A. N. Kraiko	
TESTING OF CALCULATION AND EXPERIMENTAL METHOD OF JET FORMATION RESEARCH UNDER SHOCK-WAVE IMPACT ON CONSTRUCTIVE INHOMOGENEITIES	20
D. P. Kuchko, V. N. Nogin, M. M. Shatov, A. G. Poptsov, D. G. Pankratov	
ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF PULSED EXPLOSIVE LOADING PROCESSES OF DESTRUCTIVE ELEMENTS OF PROTECTIVE SWITCHES (PSS)	21
M. V. Manzuk, D. I. Alekseev, S. I. Krivosheev, S. G. Magazinov, V. V. Harchenko, V. O. Yurchenko	
HIGH-VELOCITY MOTION OF THIN PLATES	22
A. K. Muzyrya	

EXPERIMENTAL EVALUATION OF CRITICAL VELOCITY OF SCJ PENETRATION FROM CAST-IRON INTO CAST-IRON BARRIER	23
A. G. Neskin, A. N. Zelenov	
INFLUENCE OF METAL SURFACE ROUGHNESS ON THE MASS OF EJECTED DUST DURING SHOCK-WAVE EJECTION	23
K. V. Novosyolov, K. A. Ten, E. R. Prueel, E. B. Smirnov	
STRUCTURE AND SPATIAL CORRELATIONS OF COLUMN COHERENT VORTEX IN A THREE-DIMENSIONAL ROTATING TURBULENT FLOW	25
L. L. Ogorodnikov, S. S. Vergeles	
USE OF TWO-DIMENSIONAL AUTOMODELED GAS FLOWS	26
E. I. Pon'kin and S. P. Bautin	
DETECTION OF EJECTA CLOUD BY SYNCHROTRON RADIATION, PDV AND PIEZO-ELECTRIC SENSORS	28
K. A. Ten, E. R. Prueel, A. O. Kashkarov, I. A. Rubtsov, D. V. Petrov, A. Yu. Garmashev, E. B. Smirnov, D. P. Kuchko, V. V. Malev, D. V. Mukhin, A. E. Shirobokov, S. A. Fefilov, A. Yu. Fedorov, L. I. Shekhtman, V. V. Zhulanov, B. P. Tolochko	
THE (k - ϵ)-MODEL MODIFICATIONS FOR TWO-DIMENSIONAL SHOCK-WAVE FLOWS	29
Yu. V. Tretyachenko, A. R. Gughova, V. P. Statsenko, Yu. V. Yanilkin	
INVESTIGATION OF THE PARAMETERS OF THE POWDER FLOW OF TUNGSTEN PARTICLES EJECTED BY A SHOCK WAVE	29
A. S. Tumanik, K. A. Ten, E. R. Prueel, E. B. Smirnov, D. P. Kuchko, A. E. Shirobokov	
CRITICAL BEHAVIOR OF DYNAMIC SYSTEMS AT HIGH-INTENSE ACTION	30
A. Ya. Uchaev, E. V. Kosheleva, N. I. Sel'chenkova	
EXPERIMENTAL CONFIRMATION OF POSSIBILITY FOR RECORDING DISTRIBUTION OF SHOCK-INDUCED FLOWS OF MICROPARTICLES IN SIZES AND VELOCITIES BY THE PULSE HOLOGRAPHY METHOD	32
A. V. Fedoseev, M. V. Antipov, A. N. Poduvalov, V. A. Ogorodnikov, A. V. Blinov, A. A. Utenkov, O. B. Sogrina	
APPLICATION OF LASER INTERFEROMETRIC METHODS FOR STUDYING OF EJECTION PARAMETERS OF SHOCK LOADED METALS	33
A. V. Fedorov, S. A. Finyushin, E. A. Chudakov, D. A. Kalashnikov, I. S. Gnutov, A. O. Yagovkin	
CONVERGENCE OF METAL CYLINDRICAL SHELLS UNDER EXPLOSION	34
A. E. Kheyfets, V. I. Zeldovich, N. Yu. Frolova, A. A. Degtyaryov, E. V. Shorokhov, E. B. Smirnov, S. M. Dolgikh	
PLANS ON UPGRADING THE LINEAR-INDUCTION ACCELERATOR WITH THE ELECTRON BOUNDARY ENERGY OF UP TO 2 MEV	35
A. O. Chernitsa, I. A. Karachinsky, P. A. Kolesnikov, O. A. Nikitin, D. A. Starostenko, D. A. Nikiforov, Ya. V. Kulenko, P. A. Bak, O. A. Pavlov	
REGISTRATION OF THE PARAMETERS OF A SHOCK-INDUCED EJECTA WITH THE SIMULTANEOUS USE OF THE METHODS OF A HETERODYN INTERFEROMETER AND A BROADBAND LASER RANGE	36
E. A. Chudakov, S. A. Finyushin, A. V. Fedorov, D. A. Kalashnikov, I. S. Gnutov, I. V. Shmelev, E. A. Razumkov	
DIRECT NUMERICAL SIMULATION OF A TURBULENT MIXING ACCOUNTING THE HISTORY OF THE PROCESS	37
Yu. V. Yanilkin, A. R. Guzhova, L. I. Dyagterenko, V. Yu. Kolobyanin, V. A. Shmelyov	
SECTION 2. EXPLOSION AND DETONATION PHENOMENA	
NEW TECHNIQUE OF ANALYZING DEFECTIVENESS OF CRYSTALLINE AND AMORPHOUSE MATTERS	41
N. A. Alekhina, A. V. Stankevich, A. R. Bakirov, N. P. Taibinov, E. B. Smirnov, A. Yu. Garmashev	
ELECTRICAL INSULATING COATINGS BASED ON COPOLYMER OF ISODECYL METHACRYLATE AND BENZYL METHACRYLATE WITH W WITH MAXIMUM DENSITY	42
I. M. Antonov, B. P. Tolochko, A. V. Varand, M. A. Mikhailenko, I. V. Eltsov, A. A. Bryazgin, E. B. Smirnov	
CRYSTAL PARTICLE SIZE AND POROSITY IMPACT ON GAS-DYNAMIC TATB HE PERFORMANCE	42
I. A. Akhlustin, I. E. Kosolapov, K. M. Prosvirin, K. M. Miroshkin, K. V. Eganov, Yu. A. Belenovskii, E. B. Smirnov, A. Yu. Garmashev	
COMPREHENSIVE STUDY OF EXPLOSIVE CHARACTERISTICS OF MODEL THERMOPLASTIC COMPOSITIONS BASED ON 1,1-DIAMINO-2,2-DINITROETHYLENE	43
A. I. Akhmetzyanov, V. A. Virchenko, V. G. Kulikov, A. A. Kazak	

COMPOSITION OF PRODUCTS OF SLOW COMBUSTION AND EXPLOSIVE TRANSFORMATION REACTIONS IN NANOTHERMITE COMPOSITES CuO/Al, Ni/Al BASED ON X-RAY PHASE ANALYSIS DATA	44
I. A. Bakirov, A. V. Stankevich, L. Kh. Badretdinova, R. N. Valiev, N. P. Taibinov, V. Ya. Bazotov	
INVESTIGATING THE THERMAL STABILITY AND SHOCK SENSITIVITY OF PLASTISOL HIGH-EXPLOSIVE COMPOSITIONS	45
I. A. Batalova, T. V. Antipova, I. A. Akhlyustin, Yu. A. Belenovskiy, A. Yu. Garmashev, K. E. Kosolapov, K. M. Miroshkin, K. M. Prosvirnin, I. V. Chemagina	
DEFLAGRATION AND DETONATION SIMULATION IN HYDROGEN-AIR MIXTURES	46
P. E. Belyaev, I. R. Makeeva, D. A. Mastuyuk, E. E. Pigasov	
STUDY OF THE THERMAL EXPLOSION DELAY IN MIXTURES OF NANOTHERMITE COMPOSITES CuO/Al AND Al/Ni, AND ASSESSMENT OF THE HISTORY OF CHEMICAL REACTIONS IN A SOLID-PHASE COMBUSTION WAVE	47
R. N. Valiev, A. V. Stankevich, L. Kh. Badretdinova, A. R. Bakirov, N. P. Taibinov, V. Ya. Bazotov	
TESTING OF EXPLOSIVE BOLTS AND SIMULATION OF THEIR SEPARATION UNDER EXPLOSIVE LOADING	47
D. M. Gagarkin, I. G. Galiullin, A. Yu. Garmashev, D. P. Dudnik, V. N. Dunaev, A. V. Sarafannikov, E. B. Smirnov, S. V. Shakhmaev, A. P. Beketov, E. Yu. Emel'yanova	
FINE CRYSTAL STRUCTURE AND COMBUSTION RATE OF BTf THIN FILMS ON VARIOUS SUPPORTS	48
D. M. Gagarkin, A. V. Stankevich, A. V. Sobolevskaya, A. N. Gretsova, O. A. Frolova, V. N. Shcherbakov	
THERMOPLASTIC EXPLOSIVE COMPOSITIONS EXPLOSION RESISTANCE AT THE IMPACT OF CUMULATIVE CHARGE JET	49
I. G. Galiullin, E. B. Smirnov, A. V. Sarafannikov, K. M. Prosvirnin, K. V. Eganov, D. M. Gagarkin, D. P. Dudnik, P. A. Peregudov, A. S. Gremitskih, A. V. Vanchinov, S. V. Shakhmaev	
PROPERTIES AND MECHANISMS OF LOW VELOCITY DETONATION OF POROUS ENERGY MATERIALS	50
B. S. Ermolaev	
ON ELECTROMAGNETIC MEASUREMENTS OF PARTICLE VELOCITY	51
A. P. Ershov	
MODELLING OF COMPOSITES PENTAERYTHRITOL TETRANITRATE – ALUMINUM NANOPARTICLES WITH OXIDE SHELL LASER INITIATION	52
A. A. Zvekov, A. V. Kalenskii, E. V. Galkina, A. S. Zverev, M. V. Anan'eva	
THE INFLUENCE OF RESIDUAL POROSITY ON THE PHOTOACOUSTIC RESPONSE OF THE COMPOSITES TRANSPARENT MATRIX – METAL NANOPARTICLES	53
A. A. Zvekov, A. V. Kalenskii, E. V. Galkina, A. S. Zverev, M. V. Anan'eva	
EFFECT OF ZINC OXIDE, AND MATERIALS BASED ON IT, ON SENSITIVITY OF PENTAERYTHRITOL TETRANITRATE TO LASER RADIATION	54
A. S. Zverev, D. R. Nurmukhametov, A. Yu. Mitrofanov, N. N. Ilyakova	
PETN- AND BTf-BASED PLASTIC EXPLOSIVE COMPOSITIONS DEVELOPED TO PRODUCE THIN-LAYER CHARGES CAPABLE OF MINIMUM CRITICAL THICKNESS DETONATION	55
S. I. Karachinsky, N. G. Bagavetdinov, M. A. Vorobyov, A. K. Muzyrya, S. V. Mytarev, E. A. Poteryaeva, I. R. Shakirov	
REGISTRATION OF THE SHOCK TO DETONATION TRANSITION BY THE DYNAMICS OF RAREFACTION FLOW BEHIND THE WAVE FRONT BY THE METHOD OF SYNCHROTRON DIAGNOSTICS OF FAST PROCESSES	56
A. O. Kashkarov, K. A. Ten, E. R. Prueel, I. A. Rubtsov, A. A. Studennikov, K. M. Prosvirnin, A. Yu. Garmashev, E. B. Smirnov, A. K. Muzyrya, A. V. Sarafannikov	
STUDY OF THE CONVERGENCE OF CYLINDRICAL SHELLS UNDER THE ACTION OF EXPLOSION PRODUCTS OF AN ALUMINIZED EXPLOSIVE	56
K. V. Gaan, S. M. Dolgikh, A. Ye. Kiskin, K. V. Levak	
DETONATION CHARACTERISTICS OF ONLY SALTS OF AZOTETRAZOLE	57
V. I. Kolesov, K. O. Kapranov, D. A. Kosterov, A. I. Levshenko	
NOZZLELESS AND FRAMELESS SOLID PROPELLANT ROCKET ENGINE	58
A. V. Konyukova, V. G. Shevchenko, D. A. Eselevich, A. I. Ananiev, Yu. P. Borshchev	
FEATURES OF TETRYL DECOMPOSITION IN SOLUTION AND UNDER CONDITIONS OF DYNAMIC HEATING	59
D. A. Kosterov, P. N. Stolyarov, D. G. Permenov	
MATHEMATICAL MODELLING ON UNSTATIONARY COMBUSTION OF GUNPOWDER IN CLOSED EXPLOSIVE BOMB WITH CONSTANT VOLUME	60
A. Yu. Krainov, V. A. Poryazov	

IGNITION OF PRIMARY EXPLOSIVES AND INITIATING MIXTURES EXPOSED TO CONTINUOUS LASER RADIATION	61
E. S. Manakhova, V. I. Kolesov, A. N. Kononov, V. A. Ulyanov, N. V. Yudin	
MODEL OF THE EXPLOSIVE DECOMPOSITION OF THE LOW-ABSORBING RADIATION EXPLOSIVES WITH THE INCLUSIONS OF ULTRADISPERSED PARTICLES OF METALS UNDER THE IMPACT OF NANOSECOND LASER PULSES	62
D. R. Nurmukhametov, B. P. Aduv	
TWO-STAGE CARBON CONDENSATION MODEL	63
I. A. Rubtsov	
ANALYZING THE COMPOSITION OF ULTRA-PURE RDX, HMX, AND 2,4-DINITROANISOLE SAMPLES AS PRODUCTS OF CHEMICAL REACTIONS OF DECOMPOSITION AND EXPLOSIVE TRANSFORMATION	63
A. Kh. Rudina, A. V. Stankevich, N. P. Taibinov, O. V. Kostitsyn, A. Yu. Garmashev	
ANALYSIS OF THE COMPOSITION OF PRODUCTS AND KINETICS OF CHEMICAL REACTIONS OF INTERACTION OF POLYTETRAFLUORETHYLENE WITH BORON AND SILICON	64
A. Kh. Rudina, A. V. Stankevich, B. G. Loboiko, N. P. Taibinov, O. V. Kostitsyn, A. Yu. Garmashev	
CHROMATO-MASS-SPECTROMETRY AND MASS-SPECTROMETRY OF 2,4-DINITROANISOLE	64
A. Kh. Rudina, A. V. Stankevich, V. I. Philyakova, G. L. Rusinov, N. P. Taibinov, O. V. Kostitsyn	
DETAILED KINETICS OF SOLID HIGH EXPLOSIVES	65
N. P. Satonkina, V. Yu. Dolmatov, A. O. Kashkarov, G. K. Obratsov, N. A. Khlebanovsky	
THE INFLUENCE OF DYNAMIC RIGIDITY OF SHELL ON LOW-SENSITIVE HE DETONATION	66
M. A. Sokolov, S. M. Dolgikh, E. B. Smirnov	
THERMAL STRAIN TENSORS OF ULTRA-PURE MOLECULAR CRYSTALS OF HIGH-ENERGY COMPOUNDS	67
A. V. Stankevich, E. B. Smirnov, N. P. Taibinov, O. V. Kostitsyn, A. Yu. Garmashev	
ANALYZING THE CHEMICAL CHAIN REACTIONS OF DECOMPOSITION AND EXPLOSIVE TRANSFORMATION FOR ULTRA-PURE SAMPLES OF PETN, BENZOTRIFUROZANE, TRIAMINOTRINITROBENZENE, DIAMINODINITRIETHYLENE, AND 2,4,6-TRINITROTOLUENE	67
A. V. Stankevich, A. Kh. Rudina, N. P. Taibinov, O. V. Kostitsyn, A. Yu. Garmashev	
IN-DEPTH ANALYSIS OF REACTION PRODUCT COMPOSITION AND CHEMICAL REACTION KINETICS FOR COBALT (III) WITH BORON AND SILICON	68
A. V. Stankevich, A. Kh. Rudina, B. G. Loboiko, N. P. Taibinov, A. Yu. Garmashev	
X-RAY PHASE ANALYSIS OF MULTICOMPONENT AMORPHOUS-NANOCRYSTALLINE COMPOSITES BASED ON MOLECULAR CRYSTALS	69
A. V. Stankevich, A. R. Bakirov, N. P. Taibinov, O. V. Kostitsyn, A. Yu. Garmashev	
IN-DEPTH ANALYSIS OF REACTION PRODUCT AND MECHANISM OF CHAIN DECOMPOSITION REACTIONS FOR DIAMINOTETRAZINETRIAZOLE SUBJECTED TO THERMAL ACTION UP TO 2000 K/S	69
A. V. Stankevich, G. L. Rusinov, S. G. Tolshchina, I. V. Chemagina, N. P. Taibinov	
EXPERIMENTAL STUDY OF SUBLIMATION ENTHALPY FOR ULTRA-PURE MOLECULAR CRYSTALS OF ENERGY-RICH COMPOUNDS	70
A. V. Stankevich	
MOLECULAR-KINETIC PROPERTIES OF ULTRA-PURE ENERGY-RICH COMPOUNDS AND THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF SUBLIMATION PROCESSES	70
A. V. Stankevich	
STRUCTURAL TRANSFORMATIONS OF ALUMINUM INTERMETALLIDES UNDER THEIR MECHANICAL ACTIVATION IN BALL VIBRATION MILLS	71
A. V. Stankevich, M. A. Uymin, A. E. Ermakov, S. I. Novikov, D. I. Davydov, V. S. Gaviko	
SOLID STATE TETRILE DECOMPOSITION	72
P. N. Stolyarov, D. G. Permenov, D. A. Kosterov	
TECHNIQUE FOR COMPONENT ANALYSIS OF PETN-BASED PHOTSENSITIVE HES WITH ADDITIVES OF NANODISPERSIVE ALUMINUM AND IRON-DOPED CARBON NANOTUBES	73
M. S. Streltsova, A. V. Sobolevskaya, A. R. Bakirov, A. V. Stankevich, N. P. Taibinov, A. Yu. Garmashev	
THE PROJECT OF 1-3 "FAST PROCESSES" BEAMLINE AT THE SYNCHROTRON RADIATION FACILITY "SKIF"	74
A. A. Studennikov, I. A. Rubtsov, E. R. Prueel, K. A. Ten, A. O. Kashkarov, V. P. Khalemenchuk, A. S. Arakcheev, K. V. Zolotarev, K. E. Kuper, N. A. Mezentsev, A. D. Nikolenko, Ya. V. Rakshun, B. P. Tolochko, L. I. Shekhtman, V. A. Shkaruba, Ya. V. Zubavichus, A. Yu. Kononova, S. V. Rashenko, Yu. V. Khomiakov	

INVESTIGATING THE THERMAL STABILITY OF 2,4-DINITROANISOLE AS PREPARED AND AFTER TWO-YEAR STORAGE	75
A. Yu. Tarasov, A. V. Sarafannikov, N. P. Taibinov, K. A. Gaisina, I. V. Chemagina	
CHEMICAL SPIKE DEGENERATION AT DETONATION SUPRACOMPRESSSION IN TATB AND TATB-BASED EXPLOSIVES	76
V. I. Tarzhanov	
CHANGE OF THE RATE CONSTANT OF THERMAL DECOMPOSITION OF TATB AFTER IRRADIATION WITH RELATIVISTIC ELECTRONS	77
B. P. Tolochko ¹ , M. A. Mikhailenko, K. B. Gerasimov, A. A. Bryazgin, A. Yu. Garmashev, E. B. Smirnov, A. V. Stankevich, I. V. Chemagina	
INFLUENCE OF THE TNT CHARGE STRUCTURE ON THE DYNAMICS OF CHEMICAL REACTIONS DURING DETONATION	78
A. S. Khorunzhenk, N. P. Satonkina	
THE THEORETICAL AND COMPUTATIONAL ANALYSIS OF THE PROPAGATION OF DETONATION IN CYLINDRICAL SAMPLES OF EXPLOSIVE BASED ON TATB	79
M. O. Shirshova, V. B. Titova, N. A. Volodina, I. A. Spirin, E. R. Pruel, K. A. Ten, A. O. Kashkarov	
SECTION 3. DENSE PLASMA PHENOMENA	
ENHANCED ENERGY COUPLING FOR INDIRECT DRIVE FAST IGNITION FUSION TARGETS	83
Feng Zhang	
POWERFUL UNIPOLAR TERAHERTZ PULSES DUE TO TARGET IRRADIATION BY LASER	84
A. V. Brantov, A. S. Kuratov, V. Yu. Bychenkov	
BRIGHT SYNCHROTRON RADIATION FROM RELATIVISTIC SELF-TRAPPING OF A SHORT LASER PULSE	85
O. E. Vais, M. G. Lobok, V. Yu. Bychenko	
SIMULATION OF NON-STATIONARY PLASMA	86
I. Yu. Vichev, D. A. Kim, A. D. Solomyannaya, A. S. Grushin	
COULOMB EXPLOSION MODEL OF FLAT HOMOGENEOUS TARGET WITH TWO ION SPECIES	86
I. M. Gabdrakhmanov, E. A. Govras	
HYDRODYNAMICAL STABILITY OF DIRECT DRIVE ICF TARGETS	87
S. I. Glazyrin, P. P. Zakharov, K. E. Gorodnichev, S. E. Kuratov	
ELECTRON KINETIC DESCRIPTION OF DIAMAGNETIC CLOUD AND QUASIPERPENDICULAR ORDINARY MODE	88
V. M. Gubchenko	
PRODUCTION AND RESEARCH OF LOW-DENSITY METAL MATERIALS	89
A. G. Kazakov, N. A. Pkhaiko, K. V. Safronov, V. N. Gornov, L. E. Peshkicheva, S. N. Pakhomov	
MULTI-KJ GLASS LASER SYSTEM “ELF”: CONCEPTUAL DESIGN AND HIGH DENSITY ENERGY RESEARCH PROGRAM	90
A. P. Kuznetsov, V. N. Derkach, S. G. Garanin, V. V. Kravchenko, A. V. Mikhalkuk, A. P. Melekhov, I. B. Mukhin, A. A. Soloviev, S. A. Pikuz, S. V. Popruzhenko	
GIGABAR SHOCK WAVES GENERATION FOR THE PURPOSE OF STUDYING THE EQUATION OF STATE OF MATTER	91
P. A. Kuchugov, S. Yu. Gus'kov, R. A. Yakhin	
COMBINED ELECTRICAL EQUIPMENT PROTECTION DEVICES AND LIMITING TYPE FOR POWER DISTRIBUTION ELECTRICAL NETWORKS OF 0.4 kV	93
N. M. Lepyokhin, N. N. Shvets, V. P. Miroshnichenko, A. I. Orlov, N. I. Puresev, V. S. Sysoev, M. Yu. Okhrimenko, E. V. Basov, N. G. Bulgakova, V. P. Ivanov, E. N. Fominich	
LASER ACCELERATED ELCECTRONS BASED RADIOTHERAPY	94
M. G. Lobok, V. Yu. Bychenkov	
THE 1D-SIMULATIONS OF DIRECT DRIVE DOUBLE-SHELL TARGET FOR MEGAJOULE FACILITIES WITH LASER WAVELENGTH OF 0.35 μm AND 0.53 μm	95
V. A. Lykov, A. S. Andreev, V. E. Chernyakov, E. S. Bakurkina, N. G. Karlykhanov, G. N. Rykovanov	
IONIZATION BALANCE OF NON-LTE PLASMAS WITH AVERAGE-ATOM COLLISIONAL-RADIATIVE MODEL	96
A. A. Ovechkin, P. A. Loboda, A. S. Korolev, S. V. Kol'chugin, I. Yu. Vichev, A. D. Solomyannaya, A. S. Grushin, D. A. Kim	

METHODS TO MANUFACTURE TARGET REFERENCE LAYERS FOR HYDRODYNAMIC-INSTABILITY STUDIES IN LASER EXPERIMENTS	97
L. E. Peshkicheva, D. S. Nosulenko, D. A. Vikhlyaev, Yu. Yu. Smirnov, D. I. Bashkin A. S. Polyukhin, S. A. Dyachkov, P. R. Levashov	
EXPERIMENTAL STUDIES OF THE CHARACTERISTICS OF PHOTOCATODES OF THE ULTRAVIOLET SPECTRUM	98
N. A. Pkhaiko, A. A. Kondratyev, S. N. Pakhomov, A. V. Potapov, I. A. Sorokin, A. S. Tishchenko, D. I. Bashkin	
ASYMPTOTIC APPROXIMATION OF n^{th} ORDER AND IMPROVED BOUNDARY CONDITIONS	99
S. A. Serov	
TEST SETUP “ALLUR-P” – COMPACT SIMULATOR ELECTROMAGNETIC PULSES OF THE NANOSECOND RANGE	100
V. S. Sysoev, N. N. Shvets, A. I. Orlov, D. I. Sukharevsky, E. V. Basov, M. A. Gushchin, A. V. Palitsin, P. A. Mikryukov, I. Yu. Zudin, E. A. Mareev	
PARAMETERS OF ELECTRICAL DISCHARGE PROCESSES IN ULTRA-LONG AIR GAPS, AFFECTING THE PROCESS OF GENERATION OF MICROWAVE RADIATION IN THEM	101
V. S. Sysoev, L. M. Makalsky, Yu. A. Kuznetsov, M. Yu. Naumova	
RESEARCH OF THE SPECTRAL AND LUMINESCENT CHARACTERISTICS OF NEODYMIUM GLASSES	102
N. Yu. Titarenko, A. G. Kakshin, E. A. Loboda	
PCALCULATION OF VISCOSITY AND ION SELF-DIFFUSION COEFFICIENTS IN DENSE PLASMAS WITH PSEUDOATOM MOLECULAR DYNAMICS	103
A. L. Falkov, P. A. Loboda, A. A. Ovechkin	
SECTION 4. PROPERTIES OF MATTER AT HIGH-INTENSITY PROCESSES	
EXPERIMENTAL RESEARCH ON MATERIAL PROPERTY AT LASER-DRIVEN EXTREME CONDITIONS	107
Liang Sun, Xiaoxi Duan, Yulong Li, Weiming Yang, Hao Liu, Chen Zhang, Huan Zhang, Zhebin Wang, Jiamin Yang, Shaoen Jiang	
THE HIGH PRESSURE DEPENDENCE OF THE PHASE TRANSITIONS AND PROPERTIES FOR A POTASSIUM NIOBATE CRYSTAL	108
T. Zhang, Q. Wu, X. Wu, HL. He	
THE DYNAMIC PROPERTIES OF SUBMICROCRYSTALLINE COPPER ALLOYED WITH ZIRCONIUM, CHROMIUM AND GRAPHENE	109
D. N. Abdullina, I. V. Khomskaya, S. V. Razorenov, L. A. Elshina, E. V. Shorokhov	
CALCULATION OF THE THE EARTH’S CORE COMPOSITION	110
V. F. Anisichkin	
EQUATIONS OF STATE FOR METALS AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES NEAR THE LIQUID–VAPOR CRITICAL POINT	111
K. A. Boyarskikh, K. V. Khishchenko	
SYNTHESIS, STRUCTURE AND PROPERTIES OF ALUMINUM COMPOSITES WITH GRAPHENE	112
I. G. Brodova, L. A. Yolshina, E. V. Shorokhov, D. Yu. Rasposienko, I. G. Shirinkina, A. N. Petrova, S. V. Razorenov, K. V. Gaan, R. V. Muradymov	
POSSIBILITY OF RAMP COMPRESSION OF METALS TO 40 MBAR BY LINER IMPLOSION DRIVEN BY DISK EXPLOSIVE MAGNETIC GENERATORS	113
A. M. Buyko	
ATOMISTIC AND CONTINUUM MODELING OF FRACTURE OF REFRACTORY METALS	114
D. S. Voronin, A. E. Mayer	
FEW-PARAMETER EQUATION OF STATE OF METALS	115
S. D. Gilyov	
ELECTRIC RESISTANCE OF COPPER AT STRONG COMPRESSION: EQUILIBRIUM MODEL AND SHOCK-WAVE EXPERIMENT	116
S. D. Gilyov	
NONEQUILIBRIUM OF THE PHYSICAL STATE OF COPPER UNDER SHOCK COMPRESSION	117
S. D. Gilyov	
MECHANISMS OF STEEL SHELL FRACTURE DRIVEN BY BLAST LOAD	117
E. F. Gryaznov, M. M. Boyko	

NEW DATA ON DYNAMIC PROPERTIES OF BERYLLIUM IN THE $10^3\text{--}10^5\text{ s}^{-1}$ DEFORMATION RATE RANGE A. A. Degtaryov, A. E. Kovalyov, A. V. Kal'manov, F. F. Galiev, E. V. Koshatova	118
IN-MOLD MODIFICATION OF COPPER A. A. Zhdanok, V. A. Kuznetsov, Z. A. Korotaeva and N. V. Stepanova	119
SHOCK COMPRESSION OF METAL HYDRIDES M. V. Zhernokletov, L. F. Gudarenko, A. A. Kayakin	120
INFLUENCE OF THE INTENSITY OF EXPLOSIVE LOADING ON THE CONVERGENCE OF COPPER CYLINDRICAL SHELLS V. I. Zeldovich, A. E. Kheyfets, N. Yu. Frolova, A. A. Degtaryov, E. B. Smirnov, E. V. Shorokhov	122
THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF RESIDUAL INTERNAL STRESSES IN 09G2S STEEL SAMPLES MANUFACTURED WITH 3D LASER PRINTER N. V. Kazantseva, A. A. Isupova, L. Yu. Egorova, Yu. N. Koemets, A. P. Nichipuruk	123
EXPERIMENTAL STUDIES OF SHOCK-LOADED SPECIMENS' DYNAMICS BY COMBINATION OF LASER AND OPTICAL TECHNIQUES V. G. Kamenev, Yu. D. Arapov, P. V. Kubasov, P. N. Yaroshchuk, D. P. Kuchko, D. G. Pankratov, V. I. Tarzhanov, A. V. Vorobyov, A. G. Poptsov	124
EQUATION OF STATE OF HYDROGEN FOR POWER ENGINEERING A. V. Karavaev, V. V. Dryomov, E. E. Mironova	125
SEASONAL CREEP VARIATIONS OF EXTREMELY STRESSED SOLID SAMPLES F. H. Karimov, N. G. Salomov	125
EFFECT OF ELECTRONIC HEAT TRANSFER ON CRYSTALLIZATION KINETICS: ATOMISTIC STUDY R. M. Kichigin, P. V. Chirkov, V. V. Dryomov, A. V. Karavaev	126
HIGH STRAIN RATES OF STAINLESS-STEEL SOLID AND VOLUME-PERIODIC SPECIMENS MANUFACTURED USING ADDITIVE TECHNOLOGY OVER RATE RANGE $10^2\text{--}10^3\text{ SEC}^{-1}$ A. Yu. Garmashev, E. B. Smirnov, E. A. Petukhov, A. I. Klyonov, K. S. Sidorov, M. A. Shistirikov, D. T. Yusupov, Z. I. Zavialov, A. A. Bortsov	127
MULTISCALE MODELING OF THE DYNAMIC PLASTICITY OF ALUMINUM ALLOYS V. S. Krasnikov, A. E. Mayer, V. V. Pogorelko, E. V. Fomin, D. S. Voronin, F. T. Latypov, P. A. Bezborodova, A. A. Ebel	128
MODELING THE DYNAMIC EXTRUSION PROCESS OF MATERIALS THROUGH A DIE WITH COMPLEX GEOMETRY P. A. Kuznetsov, A. P. Yalovets	128
STUDIES OF THE PROPERTIES OF SUBSTANCES UNDER EXTREME CONDITIONS IN THE WORKS OF THE IPCP RAS I. V. Lomonosov	129
CALCULATIONS OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF METALS IN THE VICINITY OF MELTING AND LIQUID-GAS COEXISTENCE CURVES BY QUANTUM MOLECULAR DYNAMICS D. V. Minakov, M. A. Paramonov, P. R. Levashov	130
A WIDE-RANGE MULTIPHASE EQUATION OF STATE FOR PLATINUM V. N. Mikhaylov, V. M. Elkin, A. A. Ovechkin, N. A. Smirnov	130
MODELING OF QUADROMORPHIC TEXTURE OF THE CHELYABINSK METEORITE R. F. Muftakhedinova, V. I. Grokhovskiy, G. A. Yakovlyov	131
INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF POLYCARBONATE PK-ET-3,5 UNDER SHOCK IMPACT M. S. Mytarev, A. V. Pavlenko, S. N. Malyugina, A. S. Mayorova, D. N. Kazakov, S. S. Mokrushin	132
MULTIPLE METASTABLE STATES IN CONDENSED MATTER AND MOMENTUM TRANSFER MECHANISMS UNDER INTENSIVE LOADING O. B. Naimark	133
SPEEDS OF SOUND IN LEAD UNDER DYNAMIC LOADING D. G. Pankratov, A. K. Yakunin, A. G. Poptsov, V. N. Mikhaylov	133
AB INITIO INVESTIGATION OF THE HIGH-TEMPERATURE PROPERTIES OF ZIRCONIUM IN LIQUID AND NEAR-CRITICAL STATES M. A. Paramonov, D. V. Minakov, V. B. Fokin, P. R. Levashov	134
CONSTRUCTION OF THE EQUATION OF STATE OF THE EPOXY RESIN BASED ON EXPERIMENTAL DATA ON SHOCK-WAVE LOADING E. V. Pomykalov, Yu. M. Kovalyov	135

STRUCTURAL TRANSFORMATIONS IN HAFNIUM BRONZE UPON HEATING AFTER QUENCHING AND DEFORMATION BY DYNAMIC CHANNEL-ANGULAR PRESSING AND HIGH PRESSURE TORSION	137
V. V. Popov, R. M. Falahutdinov, E. N. Popova, A. V. Stolbovsky, K. V. Gaan, E. V. Shorokhov	
SOUND VELOCITY IN SHOCK-LOADED URANIUM WITHIN THE RANGE FROM 20 TO 250 GPa	137
A. G. Poptsov, D. G. Pankratov, A. K. Yakunin, D. T. Yusupov	
IMPACT TESTS WITH PROFILED COPPER CYLINDERS WITH A RIGID WALL: EXPERIMENT AND MICROSTRUCTURAL ANALYSIS	138
E. S. Rodionov, V. G. Lupanov, N. A. Grachyova, P. N. Mayer, A. E. Mayer	
EFFECT OF GRAPHENE ON THE RESISTANCE OF ALUMINUM OXIDE TO ELECTROPHYSICAL AND DYNAMIC MECHANICAL ACTIONS	139
G. G. Savenkov, A. Yu. Konstantinov, A. V. Kuznetsov, V. V. Stolyarov	
CALCULATION OF SHOCK ADIABATS OF ALLOYS AT HIGH ENERGY DENSITIES	140
N. N. Seredkin, K. V. Khishchenko	
RELATIVE STABILITY OF Cu, Ag AND Pt AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES FROM AB INITIO CALCULATIONS	140
N. A. Smirnov	
EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL-THEORETICAL STUDY OF THE SPALL STRENGTH OF ALUMINUM UNDER INTENSE IMPULSE ACTION	141
I. A. Stuchebryukhov, A. Yu. Semyonov, K. V. Khishchenko	
EFFECT OF DEFORMATION BY DYNAMIC CHANNEL-ANGULAR PRESSING AND HIGH PRESSURE TORSION ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF HAFNIUM BRONZE	142
R. M. Falahutdinov, V. V. Popov, E. N. Popova, A. V. Stolbovsky, K. V. Gaan, E. V. Shorokhov	
MOTION OF LOW-ANGLE SYMMETRIC TILT GRAIN BOUNDARIES IN PURE FCC METALS AND Al-Cu ALLOYS	142
E. V. Fomin, A. E. Mayer, V. S. Krasnikov	
MOBILE POWER SUPPLY SYSTEM FOR ELECTROMAGNET OF A BIM TYPE BETATRON	143
V. A. Fomichyov, K. V. Savchenko, Yu. P. Kuropatkin, V. I. Nizhegorodtsev, I. N. Romanov, V. D. Selemir, E. V. Urlin, A. A. Chinin, O. A. Shamro	
SHOCK COMPRESSIBILITY AND EQUATION OF STATE FOR BERYLLIUM OXIDE AT HIGH PRESSURES	144
K. V. Khishchenko, K. K. Krupnikov, Yu. N. Zhugin, A. Yu. Nikolaev, E. B. Smirnov, D. V. Petrov	
PHASE TRANSFORMATIONS OF CHROMIUM AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES	144
K. V. Khishchenko	
THE STRUCTURAL-PHASE TRANSFORMATIONS AND PROPERTIES OF SUBMICROCRYSTALLINE COPPER ALLOYS UNDER DYNAMIC LOADING	145
I. V. Khomskaya, V. I. Zeldovich, E. V. Shorokhov, S. V. Razoryonov, D. N. Abdullina, N. Yu. Frolova, A. E. Kheyfets	
MOLECULAR DYNAMICS STUDY OF THE EFFECT OF EXTENDED INGRAIN DEFECTS ON GRAIN GROWTH KINETICS IN NANOCRYSTALLINE COPPER	146
P. V. Chirkov, R. M. Kichigin, A. V. Karavaev, V. V. Dryomov	
REVISED MOBILE ACCELERATOR BASED ON BETATRON OF BIM TYPE	147
O. A. Shamro, Yu. P. Kuropatkin, V. I. Nizhegorodtsev, I. N. Romanov, K. V. Savchenko, V. D. Selemir, E. V. Urlin, V. A. Fomichyov, A. A. Chinin	
SOME FEATURES OF SELECTIVE LASER ALLOYING OF ALUMINUM-BASED POWDER UNDER CONDITIONS OF LASER-INITIATED CHEMICAL REACTIONS	148
V. G. Shevchenko, D. A. Eselevich, A. V. Konyukova	
STRUCTURE AND PROPERTIES OF AK6 ALLOY PRODUCED BY SELECTIVE LASER MELTING	148
I. G. Shirinkina, I. G. Brodova, A. N. Klyonov, E. B. Smirnov, N. Yu. Orlova, V. V. Astaf'ev, T. I. Yablonskikh	
NUMERICAL SIMULATION OF SHOCK-WAVE EXPERIMENTS USING SYNCHROTRONIC DIAGNOSTICS	149
A. P. Yalovets, E. S. Shestakovskaya, N. L. Klinachyova	
SECTION 5. SCIENTIFIC BASES OF NUCLEAR POWER ENGINEERING AND NUCLEAR MATERIALS	
THE STRUCTURAL STUDY OF URANYL(VI) AND PEPTIDE COMPLEXES BY MASS SPECTROMETRY AND DFT CALCULATION	153
S. Shi, Z. Qin, Y. Ren, S. Wang, X. Wang	
⁸⁹ Zr AND ¹⁷⁷ Lu LABELED MONOCLONAL ANTIBODIES FOR CANCER TARGETING PET IMAGING AND RADIOTHERAPY	154
Xia Yang, Jing Wang, Peng Zhao, Liangang Zhuo, Wei Liao, Yan Zhao, Yuchuan Yang, Shuming Peng	

COMPUTATIONAL ANALYSIS OF INTEGRAL EXPERIMENTS WITH SPHERICAL AND CYLINDRICAL PLUTONIUM ASSEMBLIES	154
V. A. Adarchenko, D. V. Khmel'nitsky, S. V. Samarina, L. S. Ershova, O. O. Rubtsova	
PAR CHARACTERISTICS ASSESSMENT TECHNIQUE DEVELOPMENT	155
E. V. Bezgodov, V. M. Krukov, S. D. Pasukov, M. V. Nikiforov, A. A. Tarakanov, I. A. Popov, D. L. Moshkin, Yu. F. Davletchin, V. A. Simonenko	
MODELING THE PROPAGATION OF "FLOATING" AND "CELLULAR" FLAMES	156
I. V. Glazyrin, N. B. Anikin, I. A. Kirillov, O. G. Kotova, N. A. Mikhailov, A. V. Pavlenko, V. A. Simonenko, A. A. Tyaktev, M. N. Chizhkov	
DETECTION OF VIOLATIONS OF NUCLEAR NONPROLIFERATION OBLIGATIONS BY STATE IMPORTER OF CLOSED FUEL CYCLE FAST REACTOR	157
N. V. Gorin, A. L. Karmanov, V. N. Pervinenko, V. V. Vlasov, N. A. Teplykh, V. P. Kuchinov, A. N. Chebeskov, V. V. Shidlovsky	
ENSURING NUCLEAR NONPROLIFERATION REGIME WHEN EXPORTING CFC FAST REACTORS	159
N. V. Gorin, E. V. Kuznetsov, N. P. Voloshin, Yu. I. Chyurikov, A. N. Chebeskov, V. P. Kuchinov, E. O. Adamov, V. V. Shidlovsky	
SHAPE AND DYNAMICS OF CYLINDRICALLY EXPANDING ULTRALEAN HYDROGEN-AIR FLAMES STUDIED IN THE EXPERIMENTS IN A NARROW HORIZONTAL CHANNEL	160
V. P. Denisenko, S. S. Kingsep, I. A. Kirillov, A. S. Melikhov, V. Yu. Plaksin	
ON THE BALL FLAMES-TO-DEFLAGRATION TRANSITION IN HYDROGEN-AIR MIXTURES	161
I. A. Kirillov	
COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF PROBLEMS OF IMPROVING THE SAFETY OF OPERATION OF FUNCTIONAL MATERIALS OF MODERN REACTORS	162
E. I. Kurbatova, A. I. Ksenofontov, D. A. Savin	
ULTRASONIC ACTIVATION OF THE DISPERSED ALUMINUM OXIDATION PROCESS BY WATER	163
M. N. Larichev, N. S. Shaitura	
CODE SYSTEM FOR NUMERICAL JUSTIFICATION OF TECHNICAL SOLUTIONS IN THE COURSE OF CLOSED FUEL CYCLE TECHNOLOGIES DEVELOPMENT	164
I. R. Makeeva	
DIFFUSION AND MECHANISMS OF THORIUM CATION MIGRATION IN ThO ₂ CRYSTAL. A MOLECULAR DYNAMIC SIMULATION	165
K. A. Nekrasov, D. Seitov, S. S. Pitskhelaury, A. S. Boyarchenkov	
THE DEVELOPMENT OF THE METHODOLOGY FOR THE CALCULATED ASSESSMENT FIRE AND EXPLOSION SAFETY OF TECHNOLOGICAL RADIOCHEMICAL PROCESSES	166
I. V. Peshkichev, Y. S. Dramoretskaya, I. R. Makeeva, A. V. Rodin	
THE ROLE OF SIA CLUSTERS IN CALCULATION OF EFFECTIVE IRRADIATION DOSE	167
P. A. Pokatashkin, A. V. Yanilkin	
CALCULATION OF THE PYRAMIDAL OBJECTS MAGNETIC FIELD IN COMSOL MULTIPHYSICS	168
V. V. Saveliev, V. A. Sapunov, A. V. Sergeev	
COMPONENTS OF THE SAFETY OF NUCLEAR FACILITIES	169
A. A. Sadvovskiy	
SYSTEMATIC CHALLENGES OF HYDROGEN POWER PRODUCTION TECHNOLOGY SAFETY AND OPERATION	117
V. A. Simonenko	
RFNC – VNIITF RESEARCH COMPLEX DESIGNED FOR OBTAINING EXPERIMENTAL DATA ON HAZARDOUS FACTORS OF OUTFLOW, COMBUSTION, AND EXPLOSION OF HYDROGEN-CONTAINING GAS MIXTURES	171
A. A. Tarakanov, N. B. Anikin, E. V. Bezgodov, Yu. F. Davletchin, D. L. Moshkin, M. Yu. Nikiforov, S. D. Pasyukov, I. A. Popov, A. A. Tyaktev, Yu. S. Ufimtsev, A. V. Ushkov, D. V. Frolov, V. A. Simonenko	
THE USE OF SOFTWARE PACKAGE VIZART FOR MODELING VARIOUS SCENARIOS OF THE CNFC IMPLEMENTATION AND OPTIMIZING THE COSTS OF RADIOACTIVE WASTE TREATMENT	172
L. R. Fayrushina, I. R. Makeeva, V. Yu. Pugachyov, N. D. Dyrda	
DEVELOPMENT OF APPROACHES TO ESTABLISHING UNIFORM REGULATORY REQUIREMENTS FOR ASSESSING EFFECTIVENESS AND SAFE OPERATION LIMITS OF PASSIVE CATALYTIC HYDROGEN RECOMBINERS	174
N. L. Kharitonova, I. A. Kirillov, V. A. Simonenko, E. V. Bezgodov	

DEVELOPMENT OF TEST FACILITY BM-P MODEL TO TEST OF PASSIVE AUTOCATALYTIC HYDROGEN RECOMBINERS E. M. Shchennikova, Y. A. Tomilov	175
SECTION 6. NUMERICAL METHODS, ALGORITHMS, CODES AND ACCURATE SOLUTIONS	
THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION OF STEVEN TEST BY A COMBINED FINITE-DISCRETE ELEMENT METHOD Huang Bin-bin, Fu Hua, Yu Yin, Li Tao	179
THE THEORETICAL MODEL OF TENSILE STRENGTH FOR PBXS Li Ke-wu, Fu Hua, Li Tao, Zheng Xian-xu	180
PHASE TRANSITIONS AND EQUATION OF STATE OF β -HMX UNDER HIGH PRESSURE Sui Zhilei, Chong Tao, Zheng Xianxu	180
SIMULATION OF CRACK FORMATION IN LOCAL INTRUSION OF PBX USING 3D DISCRETE ELEMENT METHOD Wei Yi, Hu Qiushi, Fu Hua, Li Tao	181
A COUNTEREXAMPLE TO A GAS-DYNAMIC HYPOTHESIS S. P. Bautin	182
NUMERICAL SIMULATION OF SHOCKLESS GAS COMPRESSION FROM REST TO REST WITH GIVEN EXTERNAL INFLUENCE S. P. Bautin, Yu. V. Nikolaev	183
ON THE NUANCES OF THE IMPLEMENTATION AND APPLICATION OF k - ε TURBULENCE MODEL IN THE FINITE VOLUME METHOD M. I. Boldyrev, I. V. Glazyrin, N. A. Mikhailov, M. N. Chizhkov	185
COMPUTATIONAL SUBSTANTIATION OF WEDGE PLUG STRENGTH AT DIFFERENT HE CHARGE SIZES I. O. Borovsky, S. V. Balushkin, G. V. Kulikov, M. A. Lipatnikov, M. V. Nikulshin, A. Yu. Simonov, A. N. Khrulyov	185
PARTICULAR SOLUTIONS OF A LINEARIZED HYDRODYNAMICS EQUATIONS WITH CORIOLIS FORCE A. A. Bugayenko, I. Y. Krutova	186
USE OF NONLOCAL DISCRETE METHODS COMPUTATIONAL MODELLING TO NUMERICALLY SOLVE OF CONTINUUM MECHANICS PROBLEMS M. V. Vetchinnikov, M. A. Dyomina, N. S. Samsonova, V. N. Sofronov	187
THERMAL EXPLOSION OF EXPLOSIVES ON THE OCTOGEN BASIS USING MULTISTAGE KINETICS OF THERMAL DECOMPOSITION A. Yu. Vishnyakov, A. A. Kabaev, V. A. Glazunov, S. A. Kabaev	188
NUMERICAL STUDY OF SOLUTION STABILITY FOR THE POINT EXPLOSION PROBLEM V. I. Volkov, N. S. Eskov, V. N. Nogin	188
NUMERICAL SIMULATION OF IMPACT TESTS OF PROFILED COPPER CYLINDERS WITH A RIGID WALL N. A. Grachyova, A. E. Mayer, E. S. Rodionov	189
BOUNDARY LAYER AND HEAT EXCHANGE IN DUSTY GAS O. N. Dementev, G. F. Kostin, N. N. Tikhonov	190
PHOTOLUMINESCENCE THEORETICAL DESCRIPTION OF NANOCOMPOSITE MATERIAL BASED ON PMMA N. S. Dyuryagina, A. P. Yalovets	191
STATE OF THE IMPACTOR UNDER PENETRATION INTO CONCRETE E. Yu. Emel'yanova, V. V. Dotsenko, M. V. Nikulshin, V. V. Titov	192
NUMERICAL SIMULATIONS RESULTS CONCERNING SHIELD PENETRATIONS BY 3D DEBRIS O. S. Ilyutina, M. Yu. Sakharov	192
THE ANALYTICAL DECISION OF THE CHARACTERISTIC TASK CAUCHY WITH INITIAL DATA DESCRIBING THE TURNING OF GAS A. O. Kazachinsky	193
THE MODEL AND THE 1D-SIMULATIONS OF A TARGET IN SPHERE-SHAPED HOHLRAUM WITH THE CONSIDERATION OF THE X-RAY RADIATION LOSSES THROUGH LASER ENTRANCE HOLES N. G. Karlykhanov, V. A. Lykov	194
DYNAMIC LOAD BALANCING ALGORITHM FOR CONTINUUM MECHANICS PROBLEMS WITH ESSENTIAL REDISTRIBUTION OF COMPUTING LOADS AMONG THE PROCESSES A. V. Karpeev	195

NUMERICAL SIMULATION USING CYLINDRICAL COORDINATES OF AN RISING SWIRLING FLOW	196
S. N. Kononov, S. P. Bautin, E. S. Levunina	
THE LEGAK COMPUTATION METHOD FOR 3D NONSTATIONARY FLOWS OF MULTI-COMPONENT CONTINUUM USING SPECIAL TYPE OF BLOCK-STRUCTURED MESH	197
S. A. Krayukhin, N. A. Volodina, A. O. Naumov, S. V. Starodubov, T. V. Rezvova, K. V. Tsiberev, M. O. Shirshova, E. V. Shuvalova	
ANALYTICAL AND NUMERICAL SIMULATION GAS FLOWS IN UPLINING SWIRLED STREAMS	198
I. Yu. Krutova	
EXPERIMENTAL STUDIES OF SHOCK-LOADED SPECIMENS' DYNAMICS BY COMBINATION OF LASER AND OPTICAL TECHNIQUES	197
V. G. Kamenev, Yu. D. Arapov, P. V. Kubasov, P. N. Yaroshchuk, D. P. Kuchko, D. G. Pankratov, V. I. Tarzhanov, A. V. Vorobyov, A. G. Poptsov	
ASSIMILATION OF ALTIMETRY DATA IN TO THE OCEAN CIRCULATION MODEL NEMO	198
K. P. Belyaev, A. A. Kuleshov, I. N. Smirnov	
CONSTRUCTION OF DESCENDING SWIRLING VORTICES IN THE VICINITY OF THE OUTER BOUNDARIES OF THE CYCLONE	199
A. V. Mezentsev, S. L. Deryabin	
SIMULATION OF COMBUSTION OF REACTIVE GAS SUSPENSIONS DURING FLOW SWIRLING	200
K. M. Moiseeva, A. Yu. Krainov	
SOLVING HEAT CONDUCTION ON ADAPTIVELY EMBEDDED MESHES BY SUBSTITUTION	201
A. M. Mustafin, S. N. Lebedev, N. N. Pashentseva	
SIMULATION OF IRON MICROPARTICLE HEATING AND MELTING UNDER INTENSIVE HIGH-TEMPERATURE IMPACTS	202
A. M. Mustafin, S. N. Lebedev, N. N. Pashentseva	
IMPLEMENTATION AND TESTING OF A MULTI-TEMPERATURE HYDRODYNAMIC APPROXIMATION IN A THREE-DIMENSIONAL FOCUS PROGRAM	202
K. S. Nazarov, I. V. Glazyrin, N. A. Mikhailov	
VOXEL REPRESENTATION ALGORITHMS OF SCIENTIFIC DATA	203
V. S. Natynchik, A. V. Klimov	
ABOUT ONE TYPE OF TENSOR ARTIFICIAL VISCOSITY FOR SIMULATION OF 3D GAS DYNAMIC FLOWS	204
A. O. Naumov	
THE PROBLEM OF CENTERED RAREFACTION WAVE REFLECTED FROM A "SOFT" PISTON	205
V. N. Nogin	
NUMERICAL SIMULATION OF THE IMPACT OF A HEAT SOURCE ON THE FLOW OF GAS IN AN ASCENDING SWIRLING FLOW	205
A. G. Obukhov	
NUMERICAL SIMULATION OF BOTTOM PARTS OF A TORNADO AND A TROPICAL CYCLONE IN A STATIONARY CASE	206
O. V. Opryshko	
THE SOLUTION OF THE NEUTRON MULTI-GROUP TRANSPORT EQUATION IN SPHERICAL COORDINATES ON 2D UNSTRUCTURED MESHES	207
T. V. Ponomaryova, E. M. Vaziev, A. D. Gadzhiev	
INFLUENCE OF INITIAL PARTICLE CONFIGURATION UPON SPHERICITY OF SHOCK LOADED DENSITY INTERFACE DURING SPH MODELING OF RICHTMYER–MESHKOV INSTABILITY	208
F. A. Sapozhnikov, V. S. Rykovanov	
EGIDA-TEST-GPU. ADAPTATION OF THE EGAK METHOD TO GPU COUNTING	209
E. A. Sizov, A. M. Erofeev	
INFLUENCE OF THE MAXIMUM WATER DENSITY ON THE COOLING OF A WATER-SATURATED POROUS MEDIUM	210
O. A. Simonov, L. N. Filimonova	
ALGORITHM OF RETROSPECTIVE ANALYSIS OF TERRAIN USING DEEP LEARNING TECHNOLOGY	210
N. A. Teplykh, A. L. Karmanov, V. V. Vlasov, V. V. Fyodorov	

METHOD OF SOLVING HEAT CONDUCTION PROBLEMS TAKING INTO ACCOUNT ABLATIVE MASS LOSS IN THE “LOGOS HEAT” MODULE	211
R. A. Trishin, V. A. Glazunov, Yu. D. Seryakov	
PRESSURE CAPSULE STRENGTH AT ACCIDENTAL FALLING FROM 9 METERS HEIGHT	212
N. N. Tulaeva, M. A. Lipatnikov, I. V. Minaev, M. V. Nikulshin, A. A. Tabatchikov	
INCORPORATING SPECTRAL AND KINETIC EFFECTS IN THE RADIATIVE HEAT TRANSFER APPROXIMATION FOR RADIATIVE TRANSFER SIMULATIONS IN TWO-DIMENSIONAL AXISYMMETRIC CASE ON RECTANGULAR MESH	213
A. D. Khmel'nitskaya, N. G. Karlykhanov	
EXACT SOLUTION OF GENERALIZED ISING MODEL ON A SQUARE LATTICE BY VDOVICHENKO-FEYNMAN COMBINATORIAL METHOD	214
E. S. Tsuvarev, F. A. Kassan-Ogly	
MONOTONOUS METHOD OF FRACTIONAL PARTICLES FOR TWO-DIMENSIONAL ELASTOPLASTIC FLOWS	215
I. E. Cherednichenko, V. A. Shmelyov, Yu. V. Yanilkin	
SIMULATION OF LASER RADIATION TRANSFER AND ABSORPTION IN ICF INDIRECT IRRADIATION TARGETS	215
I. S. Chubarevshko, A. V. Vronsky, A. A. Shestakov	
SPECTRAL EFFECTS OF RADIATIVE TRANSFER IN DIFFERENT APPROXIMATIONS AND THE DEVELOPMENT OF SHORT-WAVE PERTURBATIONS IN ICF TARGETS	216
A. A. Shestakov, V. A. Lykov, E. L. Lyagina	
THE PROBLEM OF ILL CONDITIONING IN SOLVING HEAT TRANSFER EQUATIONS	217
A. A. Shestakov	
TEST PROBLEMS ON SHOCK COMPRESSION OF LAYERED SPHERICAL SYSTEMS	217
A. A. Shestakov	
ABOUT ONE LAGRANGIAN-EULERIAN METHOD FOR CALCULATING UNSTEADY FLOWS OF COMPRESSIBLE MEDIA	218
E. S. Shestakovskaya, F. G. Magazov, I. R. Makeeva	
2D CALCULATIONS OF TWO-CASCADE TARGET COMPRESSION AND COMBUSTION IN INDIRECT-DRIVE ICF	218
A. N. Shushlebin, V. A. Lykov, L. V. Sokolov, D. V. Boretskiikh	
SECTION 7. APPLICATION OF PHYSICO-MATHEMATICAL TECHNOLOGIES TO SOLVING BASIC MEDICAL PROBLEMS	
MATHEMATICAL MODELS IN EPIDEMIOLOGY: SOLVING PRACTICAL PROBLEMS IN EPIDEMIOLOGY OF TUBERCULOSIS	223
K. K. Avilov	
SOME ASPECTS OF OBTAINING DATA FOR A MULTI-AGENT MODEL OF THE SPREAD OF INFECTIOUS DISEASES	224
V. I. Baluta	
CIR MATHEMATICAL MODEL OF THE COVID-19 EPIDEMIC SPREAD	225
Y. E. Balykina, V. V. Zakharov	
COLLECTING AND PROCESSING TECHNOLOGY OF UNSTRUCTURED DATA FROM THE INTERNET	226
S. S. Varykhanov, A. A. Karandeev	
THE FORMULA OF THE EPIDEMIC PROCESS OF HIV INFECTION	227
E. I. Veselova, E. V. Karamov, Y. I. Prostov, D. A. Semyonova, A. S. Turgiev, G. D. Kaminskiy	
CONCEPT OF AUTOMATIC SEARCH OF SUBJECT INFORMATION IN THE INTERNET	228
V. V. Vlasov	
POPULATION TRANSFER IN AN AGENT-BASED VIRAL EPIDEMIC MODEL	229
A. M. Deyabin, A. A. Bragin, V. V. Vlasov, O. V. Zatsepin, A. L. Karmanov, S. N. Lebedev, G. N. Rykovanov, S. I. Samarin, A. V. Sokolov, N. A. Solomin, N. A. Teplykh, M. S. Urakov, K. E. Khatuntsev	
A COVID-19 AGENT-BASED MODEL	230
O. V. Zatsepin, A. A. Bragin, V. V. Vlasov, A. M. Deryabin, G. D. Kaminskiy, E. V. Karamov, A. L. Karmanov, S. N. Lebedev, G. N. Rykovanov, S. I. Samarin, A. V. Sokolov, N. A. Solomin, N. A. Teplykh, A. S. Turgiyev, M. S. Urakov, K. E. Khatuntsev	
THE MODELING OF HEALTHCARE SYSTEM ON THE EPIDEMY PROPAGATION	231
A. A. Zvekov, A. V. Kalenskii, A. S. Zverev, M. V. Anan'eva, E. S. Pomesyachnaya	

SIMULATION OF A CLONE EXPLOSION IN A CONTINUOUS EPIDEMIC MODEL	232
G. D. Kaminskiy	
NOVEL MATHEMATICAL EPIDEMIOLOGY FROM PERSPECTIVE OF INTERNIST	234
G. D. Kaminskiy	
CONTROL OF THE EPIDEMIC PROCESS OF HIV INFECTION	235
G. D. Kaminskiy, E. I. Veselova, E. V. Karamov, Y. I. Prostov, A. S. Turgiev, D. A. Semyonova	
SOME GEOPHYSICAL ASPECTS OF HUMAN ECOLOGY	237
F. H. Karimov	
PLATFORM FOR AUTOMATION OF COLLECTION OF INFORMATION FROM OPEN SOURCES	237
A. L. Karmanov, V. V. Vlasov, N. A. Teplykh, V. N. Pervinenko	
OPTIMIZATION METHODS FOR INVERSE PROBLEMS IN EPIDEMIOLOGY (REVIEW)	238
A. B. Kononov, V. V. Vlasov	
A SYSTEMIC APPROACH TO THE STUDY OF MULTI-PARAMETER MODELS OF THE COVID-19 SPREAD	239
S. P. Levashkin, O. I. Zakharova	
EMPIRICAL MODELING OF SOCIETY ACTIVITY IN THE CONTEXT OF THE COVID19 PANDEMIC: BUILDING A PREDICTIVE MODEL	240
E. M. Loskutov, A. F. Seleznyov, V. V. Vdovin, D. N. Mukhin, A. S. Gavrilov, A. M. Feigin	
EMPIRICAL MODELING OF SOCIETY ACTIVITY IN THE CONTEXT OF THE COVID-19 PANDEMIC: SELECTION OF DYNAMICAL VARIABLES AND FORCING	241
D. N. Mukhin, A. F. Seleznyov, V. V. Vdovin, E. M. Loskutov, A. S. Gavrilov, A. M. Feigin	
THE AGENT MODEL OF OPINIONS AS A TOOL FOR DESCRIBING THE BEHAVIOR OF SOCIETY IN AN EPIDEMIC	241
D. N. Mukhin, S. E. Safonov, A. Yu. Mukhina, E. M. Loskutov, A. M. Feigin	
CONVERGENCE OF THE INTEGRAL AND DIFFERENTIAL EPIDEMIC MODELS WITH UNIFORM CONTAGION PROFILE	242
M. Y. Prostov, D. A. Semyonova, V. V. Chernetsova, G. D. Kaminskiy	
CONVERGENCE OF THE INTEGRAL AND DIFFERENTIAL MODELS OF EPIDEMICS WITH AN EXPONENTIAL CONTAGION PROFILE	244
M. Y. Prostov, D. A. Semyonova, G. D. Kaminskiy	
THE STABILITY OF THE EPIDEMIC PROCESS	246
Y. I. Prostov, M. Y. Prostov, G. D. Kaminskiy	
MODERN METHODS OF TREATMENT OF PATIENTS WITH SINGLE METASTASES OF COLORECTAL CANCER TO THE LIVER	247
D. A. Rogacheva, M. M. Sarycheva, E. Ya. Moserova, A. A. Lozhkov, D. M. Timokhina, R. Yu. Karabut, A. Yu. Maksimovskaya, Zh. E. Sabelnikova	
POPULATION DYNAMICS OF MENTAL DISORDERS. VARIABLES, PROCESSES, SCENARIOS	248
A. A. Romanyukha	
A LOOK AT THE SYSTEMS OF QUASILINEAR CONSERVATION LAWS FROM THE POINT OF VIEW OF NEURAL NETWORK ALGORITHMS	249
Yu. G. Rykov	
PERFORMANCE EVALUATION OF STEREOTACTIC RADIATION THERAPY IN KIDNEY CANCER	250
Zh. E. Sabelnikova, M. M. Sarycheva, I. A. Vazhenin, E. Ya. Mozerova, A. T. Zhumbaeva	
POSSIBILITIES OF REPEATED RADIOTHERAPY IN THE TREATMENT OF PATIENTS WITH RECURRENT LOW-GRADE GLIOMA	251
M. M. Sarycheva, R. Yu. Karabut, E. Ya. Mozerova, A. A. Lozhkov, D. M. Timokhina, A. Yu. Maksimovskaya, Zh. E. Sabelnikova, D. A. Rogacheva	
NONLINEAR EPIDEMIC PROCESS OF VIRAL INFECTIONS	252
D. A. Semyonova, M. Y. Prostov, E. V. Karamov, A. S. Turgiev, G. D. Kaminskiy	
MODELING OF RECURRENT EPIDEMICS	254
D. A. Semyonova	
MAKING A FORECAST OF THE DEVELOPMENT OF THE EPIDEMIOLOGICAL SITUATION IN THE PESTHOLE OF THE SPREAD OF VIRAL INFECTION THROUGH THE DAILY SOCIAL CONTACTS OF RESIDENTS	255
A. V. Taranik, S. N. Lebedev, I. A. Litvinenko, G. V. Bajdin, O. N. Pavlenko, M. G. Belova, E. V. Besova	

EPIDEMIC PROCESS IN A SMALL COMPANY	255
A. L. Falkov	
MODELING OF ACUTE AND CHRONIC VIRAL INFECTIONS	256
V. V. Chernetsova, E. V. Karamov, M. Y. Prostov, Y. I. Prostov, D. A. Semyonova, A. S. Turgiev, G. D. Kaminskiy	
INVERSE PROBLEMS OF ACOUSTIC TOMOGRAPHY IN MEDICINE: THEORY AND ALGORITHMS	258
M. A. Shishlenin, N. S. Novikov, S. I. Kabanikhin	
AUTHORS	266

Забабахинские научные чтения:

Сборник тезисов докладов XV Международной конференции 27 сентября – 1 октября 2021. – РФЯЦ – ВНИИТФ, Снежинск

**Тезисы докладов публикуются в авторском изложении
без корректорской и редакторской правок.**

Подписано в печать 12.09.2021
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 35,12
Тираж 350 экз. Заказ №

Отпечатано в соответствии с оригинал-макетом,
подготовленным информационно-издательской группой РФЯЦ – ВНИИТФ,
в ОАО «ИПП «Уральский рабочий».
620990, г. Екатеринбург, ул. Тургенева, 13.
<http://www.uralprint.ru>, e-mail: sales@uralprint.ru

