

Забабакхинские научные чтения

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

18–22 МАРТА 2019 ГОД

ТЕЗИСЫ

Zababakhin Scientific Talks

INTERNATIONAL CONFERENCE

MARCH 18–22, 2019

ABSTRACTS

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

Забабахинские научные чтения: сборник материалов XIV Международной конференции 18–22 марта 2019. – Снежинск: Издательство РФЯЦ – ВНИИТФ, 2019. – 276 с, ил.

ISBN 978-5-902278-91-7

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,
Олег Владимирович Костицын

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

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

PLENARY SESSION

**НОВЫЕ ПОДХОДЫ
В ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОЙ ФИЗИКЕ
ЭКСТРЕМАЛЬНОГО СВЕТА**

В. Ю. Быченков

Всероссийский научно-исследовательский институт
автоматики им. Н. Л. Духова, Москва, Россия
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва,
Россия

Email: bychenk@lebedev.ru

Представлен обзор последних расчетно-теоретических результатов, полученных в ФИАН–ВНИИА по взаимодействию мощных лазерных импульсов с плазмой, образующейся при их воздействии на различные мишени. Представлены новые аспекты изучения лазерно-иницированного ускорения электронов и ионов из плотных газов, малоплотных мишеней и нано/микро-структурированных мишеней, генерации вторичного электромагнитного и корпускулярного излучения, различных режимов релятивистской самофокусировки ультракоротких и более длинных лазерных импульсов, перспективности метода диагностики острогофокусированных релятивистски интенсивных лазерных импульсов с помощью вакуумного ускорения электронов и протонов.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 18-02-00452-а).

**NEW APPROACHES
FOR LASER-PLASMA PHYSICS
OF EXTREME LIGHT**

V. Yu. Bychenkov

Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA), Moscow,
Russia
Lebedev Physics Institute, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

Email: bychenk@lebedev.ru

The paper presents recent progress in theoretical and numerical study of powerful laser-plasma interaction obtained in FIAN–VNIIA group. This includes new aspects of electrons and ions acceleration from dense gases, low-density, nano/micro-structured targets and generation of secondary electromagnetic and corpuscular radiation, different regimes of relativistic self-focusing of ultrashort laser pulses as well as longer ones. New diagnostics method based on accelerated electrons and protons in vacuum for relativistically-intense tightly focused laser pulses and its perspectives are also discussed.

The paper is partially supported by RFBR №18-02-00452-а.

**ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЕТОНАЦИИ
ГЕТЕРОГЕННЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВВ**

К. Ф. Гребёнкин

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

E-mail: k.f.grebyonkin@vniitf.ru

В докладе представлен обзор работ, посвященных построению полуэмпирических физических моделей детонации мощных пластифицированных взрывчатых составов. Моделируемые процессы анализируются на микро и мезо уровнях, и на этой основе строятся приближенные, модели с параметрами, значения которых уточняются по результатам детонационных экспериментов. Рассматривается полупроводниковая модель детонации, основанная на предположении об электронном переносе энергии из горячих точек, обсуждаются модели медленного энерговыделения, связанного с процессом роста углеродных кластеров во взрывчатых составах с высоким содержанием углерода в продуктах взрыва. Исходя из изложенных представлений, строятся полуэмпирические модели детонации, и проводится сравнение результатов расчетного моделирования с экспериментальными данными.

**PHYSICAL MODELS OF CRYSTALLINE
HETEROGENEOUS HE DETONATION**

K. F. Grebyonkin

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

E-mail: k.f.grebyonkin@vniitf.ru

Review of research work devoted to the development of semi-empirical models of detonation of plastic-bounded high explosives is presented. The processes modeled are analyzed at micro and mesoscale levels and some simplified models are developed on this base with the parameters corrected for the results of the detonation experiments. A semiconductor model of detonation based on the suggestion regarding the electron-energy transfer from “hot spots” is considered. Some models of the slow energy release originating from the carbon-cluster growth process in high explosives with high carbon content in the explosion products are also discussed. Using the formulation provided, semi-empirical models of detonation are developed and the relevant numerical modeling is compared with some experimental data.

ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ КУМУЛЯЦИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ СХЛОПЫВАНИИ ПАРОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ

Р. И. Нигматулин^{1,2}, А. А. Аганин¹,
А. И. Давлетшин¹, Д. Ю. Топорков¹, Т. Ф. Халитова¹

¹Институт механики и машиностроения – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», Казань, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук, Москва, Россия

E-mail: nigmar@ocean.ru

Изучаются закономерности кумуляции энергии при коллапсе кавитационного (парового) пузырька в горячем тетрадекане, а также возможные ограничения кумуляции, обусловленные несферичностью пузырька, несферичностью возникающих в нем радиально-сходящихся ударных волн и наличием соседних пузырьков. Температура и давление тетрадекана 663 К и 50 бар. В начале коллапса радиус пузырька 500 мкм, пар в его полости находится в состоянии насыщения с давлением 10,3 бар. Исследование проводится с применением численного моделирования в сопоставлении с особенностями коллапса аналогичного по размерам кавитационного пузырька в холодном ацетоне в условиях, близких к используемым в известных экспериментах по акустической кавитации дейтерированного ацетона (температура и давление ацетона 273 К и 15 бар, давление в пузырьке в начале коллапса 0,1 бар). Отличительной особенностью тетрадекана является высокая молекулярная масса и низкий показатель адиабаты его пара. Показано, что для достижения сверхвысоких уровней температур, плотностей и давлений пара на границе малой центральной области пузырьков при их коллапсе в указанных условиях тетрадекан благоприятнее ацетона.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №17-11-01135).

EXTREME CUMULATION OF ENERGY DURING THE COLLAPSE OF VAPOR BUBBLES

R. I. Nigmatulin^{1,2}, A. A. Aganin¹,
A. I. Davletshin¹, D. Yu. Toporkov¹, T. F. Khalitova¹

¹Institute of Mechanics and Engineering – Subdivision of the Federal State Budgetary Institution of Science «Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences» (IME – Subdivision of FIC KazanSC of RAS), Kazan, Russia

²P. P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences (IO RAS), Moscow, Russia

E-mail: nigmar@ocean.ru

Features of energy cumulation during the collapse of a cavitation (vapor) bubble in hot tetradecane, as well as possible restrictions on cumulation due to the non-sphericity of the bubble, the non-sphericity of the radially

converging shock waves arising in the bubble, and the presence of neighboring bubbles are studied, applying numerical simulation. The temperature and pressure of tetradecane are 663 K and 50 bar. At the beginning of the collapse, the bubble radius is 500 μm, the vapor in its cavity is in a state of saturation with a pressure of 10.3 bar. The study is carried out using comparison with the features of the collapse of an equal sized cavitation bubble in cold acetone under conditions similar to those used in the known experiments on acoustic cavitation of deuterated acetone (the temperature and the pressure of acetone are 273 K and 15 bar, the pressure in the bubble at the beginning of the collapse is 0.1 bar). An important feature of tetradecane is its high molecular weight and the low adiabatic index of its vapor. It is shown that for achieving super-high levels of the vapor temperature, density, and pressure at the boundary of a small central region of the bubbles during their collapse under the specified conditions, tetradecane is more favorable than acetone.

This study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 17-11-01135).

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ, ПРИКЛАДНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПО РЯДУ АКТУАЛЬНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЙ

В. А. Симоненко

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

В течение последних лет перед институтом были поставлены задачи участия в работах по направлениям, лежащим вдалеке от традиционной тематики. Укрупненно они охватывают ряд направлений ядерной энергетики, включая вопросы организации и замыкания ядерного топливного цикла перспективных ядерных реакторов, потребности и возможности создания специализированных ядерных реакторов для решения проблем трансмутации минорных актинидов и долгоживущих продуктов деления, вопросы водородной безопасности ядерных реакторов с легководным теплоносителем. Возникают проблемы, выходящие за пределы ядерной отрасли, при решении которых опыт наших специалистов и технологические наработки наших специалистов оказываются весьма полезными. К ним относятся исследования возможностей повышения эффективности извлечения нефти из месторождений, находящихся на поздней стадии эксплуатации, исследования опасностей столкновений малых космических объектов с Землей и возможностей предотвращений таких опасностей. Даже, казалось бы, изучение процессов, происходящих в окрестности и на нейтронной звезде в тесной двойной системе, является весьма информативно для упомянутых ранее направлений. Исходя из максимальной экономии ресурсов, мы стремимся разраба-

тивать и использовать многоплановые многоцелевые средства исследований, и максимально заинтересованы в объединении усилий с другими научными центрами страны.

**FUNDAMENTAL, APPLIED
AND TECHNOLOGY CHALLENGES
IN SEVERAL PRESSING FIELDS OF RESEARCH**

V. A. Simonenko

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

During the last years RFNC – VNIITF has been tasked to work in the fields far from traditional for the Institute. In broad strokes these fields embrace several domains in nuclear power engineering such as logistics and closing of nuclear fuel cycle for promising nuclear reactors, demand for and feasibility of development of specialized nuclear reactors for transmutation of minor actinides and long-lived fission products, hydrogen safety of reactors with light-water coolant. New problems emerge now, these problems are beyond the nuclear industry, but experience and developments of our specialists turn out to be quite helpful in solving these problems. These problems are research of opportunities of oil extraction enhancement from the aging oil fields and hazard of collision with small space bodies. Even so seemingly exotic process as research of process occurring in neutron star in close binary system turns out to be very meaningful for the fields mentioned above. Aiming at maximum efficiency in spending resources we are going to develop and utilize multi-facet and multipurpose research approaches and we are interested in joining our efforts with other research centers of the country to the greatest possible extent.

**ТУРБУЛЕНТНОСТЬ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СРЕД
С ОБЪЕМНЫМИ СИЛАМИ**

Э. Е. Сон

Объединенный институт высоких температур РАН,
Московский физико-технический Институт, Москва,
Россия

Рассмотрены методы описания и модели турбулентности в средах с объемными силами, к которым относятся гравитационные, электромагнитные силы, а также центробежные силы инерции, которые существенны во вращающихся и потоках. Рассматривается турбулентность за ударными волнами и в высокоскоростных потоках и возникающая при неустойчивостях Релея–Тейлора и Рихтмайера–Мешкова. Приведены обзор и анализ методов описания структуры турбулентного потока и поведения при различных внешних воздействиях, и поведение корреляционных одно- и двухточечных моментов разного порядка, интегральных и микромасштабов, спектральных распределений в потоке пари различных внешних воздействиях, когда корреляционные масштабы сравнимы

с характерным размером потока или областью воздействия внешних сил на поток. Анализируются подходы, основанные на методах функции плотности вероятности, для задач турбулентного смешения, пассивного смешения и горения. В докладе представлены результаты, изложенные в монографии Сон К. Э., Сон Э. Е. «Турбулентность сред с объемными силами», Изд. Янус-К, 2019 по гранту РФФИ № 19-11-0000419.

**TURBULENCE
OF HIGH-TEMPERATURE MEDIA
WITH VOLUMETRIC FORCES**

E. E. Son

Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow Institute
of Physics and Technology, Moscow, Russia

Methods and models applied for description of turbulence in media with volume forces are discussed in the paper. Gravitation, electromagnetic and centrifugal inertia forces are referred to such forces. These forces are significant in rotating flows. Considered the turbulence behind the shock-waves and in high-velocity flows, and turbulence occurring at Raleigh–Taylor and Richtmeyer–Meshkov instabilities. Overview and analysis of methods for description of turbulent flow structure are given as well as description of its behavior under various external influences, behavior of correlational one- and two-point moments of different orders, integral and micro-scale, spectral distributions in conditions when correlation scales are comparable with characteristic size of the flow or the domain of external forces influence on the flow. Approaches based on methods of probability density function for problems of passive mixing, burning and turbulent mixing are analyzed. Paper covers results discussed in details in monograph Son K. E., Son E. Ye. Turbulence of media with volume forces, Yanus-K Publishers, 2019, sponsored by Russian Foundation for Basic Research, grant No 19-11-0000419.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ
МАГНИТНОЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ
НА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ
СВЕРХВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ**

Б. Н. Четверушкин

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

В работе обсуждаются проблемы адаптации вычислительных алгоритмов на архитектуру систем с экстремальным параллелизмом. В качестве примера логически простого алгоритма и эффективного допускающего успешную адаптацию на архитектуру таких систем приводятся кинетически согласованные разностные схемы для решения задач газовой динамики. Их обобщение для задач магнитной газовой динамики реализуется на основе комплексно значного аналога одночастичной функции распределения,

зависящего помимо температуры, плотности и скорости от напряженности магнитного поля.

Приводятся результаты расчета пространственно трехмерной астрофизической задачи о поглощении массивным объектом вещества Галактики и образования коллинеарной космической струи. Задача описывается системой 3Д уравнений вязкого теплопроводного газа, уравнений магнитной индукции с учетом магнитной вязкости и гравитационного потенциала. Расчет велся на пространственной сетке, состоящей из восьми миллиардов узлов.

Литература

1. Четверушкин Б. Н. Кинетическая схемы и квазигазодинамическая система уравнений. Москва, Макс Пресс. 2004
2. Четверушкин Б. Н. Савельев А. В., Савельев В. И. Квазигазодинамическая модель для описания магнитогазодинамических явлений. ЖВМ и МФ 2018, т. 58, № 8.

SIMULATION OF MAGNETIC GAS DYNAMICS PROBLEM USING COMPUTING SYSTEMS OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE

B. N. Chetverushkin

Federal Research Center "Keldysh Institute of Applied
Mathematics", Moscow, Russia

The paper discusses problem of simulation algorithms adaptation to architecture of systems with extra-massive

parallelism. Kinetically consistent differential schemes for solving gas dynamics problems are described as logically simple and efficient algorithm allowing successful adaptation to such systems. Generalization of these problems to the problems of magnetic gas dynamics is implemented on the basis of complex-valued analogue of one-particle distribution function depending on magnetic field intensity besides temperature, density and velocity.

Presentation is illustrated with results of analysis of 3D astronomic problem about galactic matter absorption by massive body and formation of collinear cosmic jet. The problem is described by the system of 3D equations for viscous heat-conducting gas and equation of magnetic induction accounting for magnetic creep and gravitation potential. The analysis was performed using spatial mesh of 8 billion nodes.

References

1. Chetverushkin B. N. Kinetic schemes and quasi-gas-dynamic system of equations. Moscow, Max Press. 2004
2. Chetverushkin B. N. Saveliev A. V., Saveliev V. I. Quasi-gas-dynamic model for description of magnetic-gas-dynamic phenomena. Russian Journal: Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2018, vol. 58, N 8.

Секция 1

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

Section 1

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПЛАНЕТ – ГАЗОВЫХ ГИГАНТОВ В ПЛАНЕТЫ ЗЕМНОГО ТИПА

Э. Р. Прууэл, В. Ф. Анисичкин

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

E-mail: avf@hydro.nsc.ru

Из нескольких тысяч обнаруженных экзопланет большинство – газовые гиганты. Эти планеты находятся на орбитах, близких к своей звезде, что облегчает их обнаружение транзитными и доплеровскими методами. В нашей системе на близких к Солнцу расстояниях находятся относительно небольшие, железокаменные планеты.

Если планеты Солнечной системы также первично были газовыми гигантами, то необходим процесс, лишивший части из них газовых оболочек. Таковым могло быть взрывное выделение ядерной энергии в недрах планет [1, 2]. При этом была практически полностью, как в случае Марса, или частично, как в случае Венеры, сброшена первичная жидкогазовая оболочка с образованием пыли ледяных комет.

В нашей работе методами молекулярной динамики выполнено моделирование взрывного сброса внешней, относительно мало плотной оболочки планеты. Получено, что такой процесс возможен и результаты расчетов могут быть адекватны наблюдаемым характеристикам планет земного типа.

Циклическое, с временным затуханием, протекающее цепных ядерных реакций глубоко в недрах планеты [3] может объяснять многократные реверсии магнитного поля в истории Земли и изменения климата из-за изменения потока тепла из недр. Взрывной сброс жидкогазовых оболочек планет, поэтому, может быть дополнительным аргументом в пользу важности учета ядерных процессов в недрах планет.

Литература

1. Анисичкин В. Ф. Взрываются ли планеты? // Физика горения и взрыва. – 1997. – Т. 33, № 1. – С. 138–142.
2. Митрофанов В. В., Анисичкин В. Ф., Воронин Д. В., Жилин А. А., Федоров А. В., Крюков Б. П., Туркин А. И. О возможности взрывного ядерного энерговыделения в недрах планет // Международная конференция V Забабахинские научные чтения. – Труды. – Снежинск. – 1999. – С. 67–76.
3. Анисичкин В. Ф., Безбородов А. А., Суслов И. Р. Цепные ядерные реакции деления нуклидов в ядре Земли в течение миллиардов лет // Атомная энергия. – 2005. – Т. 98, № 5. – С. 370–379.

SIMULATION OF EXPLOSIVE TRANSFORMATION OF GAS GIANT PLANETS INTO THE EARTH-LIKE PLANETS

E. R. Prueel, V. F. Anisichkin

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS,
Novosibirsk, Russia

E-mail: avf@hydro.nsc.ru

Among the few thousand exoplanets the most detected are gas giant planets. These planets are in orbits close to its star, what facilitates their detection by transit or Doppler methods. In our system close to the Sun are orbited small, iron-stone planets.

If the Solar system planets also originally formed as gas giants, it needs a process which deprived them of gas shells. Thus the process it could be an explosive nuclear energy release in the deep interiors of the planets [1, 2]. Under that it was almost completely, as in the case of Mars, or in part, as in the case of Venus, reset liquid-gas shell and particularly stone shell, with the formation of dust-ice comets, chaotically moving across the Solar system.

In our work by the method of molecular dynamic the explosive resetting of the outer shell of the planet is simulating. It was proved, that such a process is possible and the results of calculations can be adequate to the observable characteristics of the planets.

Periodic chain nuclear reactions in the deep interior of the planet [3] may explain the repeated reversion of the magnetic field in the Earth's history and climate changes due to changes of the heat flow from the interior. The explosive resetting gas shells of the planets can be an additional argument in favor of the importance of nuclear processes in the deep interior of the planet.

References

1. Anisichkin V. F. Do planets burst? // Combustion, Explosion and Shock Waves. – 1997. – V. 33. – P. 117–120.
2. Митрофанов В. В., Анисичкин В. Ф., Воронин Д. В., Жилин А. А., Федоров А. В., Крюков Б. П., Туркин А. И. О возможности взрывного ядерного энерговыделения в недрах планет // Международная конференция V Забабахинские научные чтения. – Труды. – Снежинск. – 1999. – С. 67–76.
3. Anisichkin V. F., Bezborodov A. A., Suslov I. R. Georeactor in the Earth // Transport Theory and Statistical Physics. – 2008. – V. 37, n. 5–7. – P. 624–633.

1-2

О ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЕ ЭНЕРГИИ РАСШИРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВА ВСЕЛЕННОЙ

М. В. Астафурова

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

E-mail: astafurova.maria@mail.ru

Определение энергетического источника расширения пространства Вселенной является актуальной задачей современного естествознания. Анализ гипотез и возможных решений, относящихся к данной проблеме, показывает необходимость поиска принципиально новых подходов к ее решению. В этой связи представляет интерес поиск искомого решения на основе пространственно-электромагнитной модели физического вакуума (ФВ) [1].

ФВ (и материальный мир в целом) рассматривается в данной модели, как волновой векторный пространственно-электромагнитный континуум, и как совокупность взаимосвязанных осцилляторов, образующих иерархические структуры. Вещество и физический вакуум являются взаимосвязанными формами существования материального континуума и образуют единую систему. Наименьший, или «абсолютный», осциллятор (АО) является элементарной ячейкой физического вакуума и составляет его структурную основу.

Внутренняя энергия АО ($E_{\text{абс}}$) в общем случае представляет собой сумму энергий взаимодействия всех его структурных компонент: $E_{\text{абс}} = E_Q + E_{QR} + E_R$, где E_Q , E_{QR} , E_R – энергии взаимодействия соответственно: составляющих электромагнитного вектора; электромагнитного и пространственного векторов; составляющих пространственного вектора.

Взаимодействие электромагнитного и пространственного векторов и составляющих электромагнитного вектора порождает силы, направленные на сжатие АО. Взаимодействие составляющих пространственного вектора порождает силы, направленные на расширение АО. Эти силы уравниваются друг друга: $E_R = -(E_Q + E_{QR})$.

Явление расширения пространства Вселенной связано с энергией E_R . Получено аналитическое выражение этой энергии и рассчитано ее численное значение.

Литература

1. Астафурова М. В., Добрецов С. Л., Астафуров В. И. Пространственно-электромагнитная модель физического вакуума и ее приложения // Труды XII междунар. конф. «Забабакхинские научные чтения. ЗНЧ-2014». URL: <http://www.vniitf.ru/images/zst/2014/Trudi/Sec3/3-47.pdf>

ABOUT THE PHYSICAL NATURE OF THE EXPANSION ENERGY OF THE SPACE OF UNIVERSE

M. V. Astafurova

National Research University Higher School of Economics,
Moscow, Russia

E-mail: astafurova.maria@mail.ru

Determination of the energy source of the expansion of the space of Universe is an actual task of modern natural science. Analysis of hypotheses and possible solutions related to this problem shows the need to search for fundamentally new approaches to its solution. In this regard, it is of interest to search the desired solution based on the spatial-electromagnetic model of the physical vacuum [1].

This model considers the physical vacuum (and the material world in general) as a wave vector spatial-electromagnetic continuum and as a set of interrelated oscillators forming hierarchical structures. The substance and the physical vacuum are interconnected forms of the material continuum and form a unified system. The smallest or “absolute” oscillator (AO) is the unit cell of the physical vacuum and constitutes its structural basis.

The internal energy of AO (E_{abs}) in general is the sum of the interaction energies of all its structural components: $E_{\text{abs}} = E_Q + E_{QR} + E_R$, where E_Q , E_{QR} , E_R are the interaction energies, respectively: of the electromagnetic vector components; of electromagnetic vector with spatial vector; of components of the spatial vector.

The interaction of the components of the electromagnetic vector and of the electromagnetic vector with spatial vector generates forces aimed at compressing the AO. The interaction of the components of the spatial vector generates forces aimed at expanding the AO. These forces balance each other: $E_R = -(E_Q + E_{QR})$.

The phenomenon of expansion of the space of the Universe is connected with the energy E_R . An analytical expression of this energy is obtained and its numerical value is calculated.

References

1. Astafurova M. V., Dobretsov S. L., Astafurov V. I. Spatial-electromagnetic model of physical vacuum and its applications // Proceedings of the 12th Intern. Conf. “Zababakhin scientific talks. ZST-2014”. URL: <http://www.vniitf.ru/images/zst/2014/Trudi/Sec3/3-47.pdf> (In Russ.)

1-3

**ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО
ПРОНИКАНИЯ УДАРНИКОВ
ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА ОСНОВЕ ВОЛЬФРАМА
В СТАЛЬНУЮ ПРЕГРАДУ**

С. А. Афанасьева, Н. Н. Белов, В. В. Буркин,
А. Н. Ищенко, А. Ю. Саммель,
А. Б. Скосырский, Н. Т. Югов

Национальный исследовательский Томский
государственный университет, Томск, Россия

E-mail: s.a.afanasyeva@mail.ru

Одним из основных направлений повышения проникающей способности инертных металлических ударников в металлические преграды является использование материалов с более совершенным комплексом физико-механических свойств и увеличение скорости соударения. Были разработаны образцы металлокерамических материалов, представляющих собой пористые сплавы на основе системы ВНЖК с упрочняющими наполнителями, которые в составе кинетических ударников показали преимущество по глубине проникания на 30% по сравнению с массогабаритными аналогами из сплава ВНЖ-90 в диапазоне скоростей 2–3 км/с.

**FEATURES OF HIGH-VELOCITY PENETRATION
OF IMPACTORS FROM TUNGSTEN BASED
COMPOSITION MATERIALS
IN A STEEL SHIELD**

S. A. Afanas'eva, N. N. Belov, V. V. Burkin,
A. N. Ishchenko, A. Yu. Sammel,
A. B. Skosirsky, N. T. Yugov

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

E-mail: s.a.afanasyeva@mail.ru

One of the main directions of increasing the inert metal impactors penetrating ability to metal shields is the use of materials with a more advanced complex of physicom-mechanical properties and an increase of impact velocity. There were developed samples of metal-ceramic materials, which are porous alloys based on an WNiFeC system with hardening fillers, and they, as part of kinetic impactors, showed an advantage in penetration depth by 30% compared to weight and size analogues of WNiFe-90 alloy in the velocity range from 2 to 3 km/s.

1-4

**КУМУЛЯТИВНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ
ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР
ГАЛАКТИЧЕСКИМИ КОМЕТАМИ
НА ПЛАНЕТАХ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ**

А. А. Баренбаум

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

E-mail: azary@mail.ru

Известно [1], что при орбитальном движении в Галактике Солнце через 20–37 млн лет пересекает струйные потоки и спиральные галактические рукава, и тогда все объекты Солнечной системы подвергаются интенсивным бомбардировкам галактическими кометами. В эти эпохи длительностью $\approx 2 \div 5$ млн лет на Землю и другие планеты может упасть $\sim 10^4$ – 10^7 галактических комет диаметром от 0,1 до 3,5 км и энергией от 10^{20} до 10^{25} Дж. Плотность падений столь высока, что импактные эффекты от падения нескольких комет могут суммироваться. Это отражается на размерах и морфологических особенностях возникающих геологических структур. Образование таких структур в условиях случайного суммирования воздействий от падений многих комет названо нами «кумулятивным» [2].

Согласно [3], в зависимости от сочетания ряда условий галактические кометы могут создавать на планетах земной группы следующие типы структур: кратеры, диатремы, лавовые потоки, вулканы, куполообразные поднятия поверхности, а также короны и монсы (на Венере). Основными факторами, определяющими их образование, являются: 1) плотность газовой оболочки планеты, 2) толщина литосферы, 3) состав и степень нагрева пород литосферы, 4) частота падений галактических комет.

В сообщении рассмотрены геологические структуры на Земле, Марсе, Меркурии, Венере и Луне, кумулятивно созданные галактическими кометами. На Земле – это новейшие поднятия земной коры и излияния траппов, на Венере – диатремы, короны и монсы, а на Луне, Марсе и Меркурии – лавовые морские бассейны с масконами и без [4]. Обсуждается сходство и различия этих структур, а также выполнены оценки энергии, требуемой для их образования кометами.

Литература

1. Баренбаум, А. А. (2010) Галактоцентрическая парадигма в геологии и астрономии. М: ЛИБРОКОМ.
2. Barenbaum A. A., Shpekin M.I. (2018) Cumulative formation of mares and mascons on Moon by galactic comets // Ninth Moscow Solar System Symposium. Moscow, IKI RAS, 9MS3-PS-81.
3. Barenbaum A. A. (2015) On the mechanism of energy dissipation of galactic comets bombarding terrestrial planets // Journal Physics: Conf. Ser. 653 012073, doi:10.1088/1742-6596/653/1/012073.

4. Barenbaum A.A., Shpekin M.I. (2018) Origin and formation mechanism of craters, seas and mascons on the Moon // *J. Phys.: Conf. Ser.* <http://www.ihed.ras.ru/elbrus18/proc/accepted>.

CUMULATIVE FORMATION OF GEOLOGICAL STRUCTURES BY GALACTIC COMETS ON TERRESTRIAL PLANETS

A. A. Barenbaum

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

It is known [1] that at orbital motion in Galaxy, the Sun each 20–37 million years crosses the jet streams and spiral galactic sleeves, and in these times all objects of Solar System are subjected to intense bombardments by galactic comets. In such epochs of duration 2–5 million years, $\sim 10^4$ – 10^7 galactic comets with a diameter of ~ 0.1 to 3.5 km and energy from 10^{20} to 10^{25} J can fall to Earth and other planets. The density of their falls is so high, that the effects of falling several comets will be summarized. This is reflected in the size and morphological features of the emerging geological structures. The formation of such structures under conditions of random summation of the effects from the fall of many comets we called «cumulative» [2].

According to [3], depending on a combination of a number of conditions, galactic comets can create the following types of structures on terrestrial planets: craters, diatremes, lava flows, volcanoes, dome-shaped surface elevations, as well as coronae and mounts (on Venus). The main factors determining formation these structures are: 1) the density of the planet's gas shell, 2) the thickness of the lithosphere, 3) the composition and degree of heating of the lithosphere rocks, and 4) the frequency of falls of galactic comets.

The report examines geological structures on the Earth, Mars, Mercury, Venus and the Moon, cumulatively created by galactic comets. On the Earth, these are the newest uplifts of the Earth's crust and effusions of traps, on the Venus are diatremes, coronae and mounts, and on the Moon, Mars and Mercury are lava mares basins with and without the mascons [4]. The similarities and differences of these structures are discussed, and the energy required for their formation by comets is estimated.

References

1. Barenbaum A. A. (2010) *Galactocentric Paradigm in Geology and Astronomy*. M: LIBROCOM.
2. Barenbaum A. A., Shpekin M.I. (2018) Cumulative formation of mares and mascons on Moon by galactic comets // Ninth Moscow Solar System Symposium. Moscow, IKI RAS, 9MS3-PS-81.
3. Barenbaum A. A. (2015) On the mechanism of energy dissipation of galactic comets bombarding terrestrial planets // *J. Phys.: Conf. Ser.* 653 012073, doi:10.1088/1742-6596/653/1/012073.
4. Barenbaum A. A., Shpekin M.I. (2018) Origin and formation mechanism of craters, seas and mascons on the Moon // *J. Phys.: Conf. Ser.* <http://www.ihed.ras.ru/elbrus18/proc/accepted>.

1-5

О РЕАЛЬНОСТИ «БОЛЬШОГО ВЗРЫВА» В КОСМОЛОГИИ

А. А. Баренбаум

Учреждение ФАНО Институт проблем нефти и газа РАН
(ИПНГ РАН), Москва, Россия
E-mail: azary@mail.ru

Современная космология основана на гипотезе возникновения Вселенной в результате Большого взрыва 13,77 млрд лет назад. В соответствии с этой гипотезой, линейное уменьшение частоты света от расстояния до далеких галактик в законе Хаббла и микроволновый космический фон объясняют эффектом Доплера при расширении Вселенной. Считается, что доплеровский механизм является твердо установленным фактом, и ему нет альтернативы.

Автором показано [1–4], что закон Хаббла и микроволновый космический фон вполне адекватно можно объяснить не космологическим расширением Вселенной, а взаимодействием фотонов света с космическими гравитационными полями. При этом закон Хаббла и микроволновый космический фон являются необходимыми следствиями действия на фотоны в космосе четырех фундаментальных законов физики: сохранения энергии, постоянства скорости свет, закона тяготения Ньютона и закона Планка, а микроволновый фон есть результат термализации фотонов в космическом пространстве, температура которого определяется энергией оптического излучения звезд. Передача энергии фотонов микроволновому фону и наоборот происходит согласно квантовому закону Планка.

Разработана модель, обосновывающая эти выводы. Модель построена на сбалансированном круговороте в Метагалактике барионного вещества, который сопровождается разрушением звезд в галактиках и образованием новых молодых звезд из их газопылевых продуктов. Круговорот находится в динамическом равновесии, при котором плотность энергии, выделяющейся при синтезе ${}^4\text{He}$ из водорода в молодых звездах и затем излучаемой ими в оптическом диапазоне длин волн, соответствует плотности энергии космического фона. Обсуждаются другие следствия этой модели.

Литература

1. Баренбаум А. А. Природа красных смещений в спектрах далеких галактик // *Инженерная физика*. 2018. № 6. С. 18–23. DOI:10.25791/infizik.06.2018.044
2. Баренбаум А. А. Закон Хаббла в свете Галактоцентрической парадигмы и его следствия // *Инженерная физика*. 2018. № 7. С.25-31. DOI:10.25791/infizik.07.2018.085
3. Баренбаум А. А. Науки о Космосе в преддверии смены научных парадигм // *Инженерная физика*. 2018. № 9. С. 30–46. DOI: 10.25791/ infizik.09.2018.175
4. Баренбаум А. А. Происхождение микроволнового космического фона // *Инженерная физика*. 2019. № 1. С. 39–48. DOI: 10.25791/infizik.01.2019.392

ON THE REALITY OF THE “BIG BANG” IN COSMOLOGY

A. A. Barenbaum

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

Modern cosmology is based on the hypothesis of the Universe emergence as a result of the Big Bang 13.77 billion years ago. In accordance with this hypothesis, the linear decrease in the frequency of light from distance to distant galaxies in the Hubble law and the existence of microwave cosmic background are explained by the Doppler Effect during the Universe expansion. It is believed that the Doppler mechanism is a well-established fact, and there is no alternative to it.

The author showed [1–4] that the Hubble law and microwave cosmic background can be adequately explained not by the cosmological expansion of the Universe, but by the interaction of photons of light with cosmic gravitational fields. The Hubble law and microwave background are necessary consequences of the action on photons in cosmos of four fundamental physics laws: conservation of energy, constancy of speed light, Newton's gravity law and Planck's law, and the microwave background is the result thermalization of photons in cosmic space which temperature determines by the energy of stars optical radiation. The transfer photons energy into microwave background and vice versa occurs according to Planck's quantum law.

A model has been developed to substantiate these conclusions. The model is built on a balanced circulation in the Metagalaxy of baryonic matter what is accompanied by the destruction of stars in galaxies and the formation of new young stars from their gas-dust products. The circulation of matter is in dynamic equilibrium, in which the density of energy released during the synthesis of ${}^4\text{He}$ from hydrogen in young stars and then emitted by them in the optical wavelength range corresponds to the energy density of the cosmic background. Other consequents of this model are discussed also.

References

1. Barenbaum A. A. The nature of redshifts in the spectra of distant galaxies // *Engineering Physics*. 2018. № 6. P. 18–23. DOI: 10.25791/infizik.06.2018.044
2. Barenbaum A. A. Hubble's law in the light of Galactocentric paradigm and its consequences // *Engineering Physics*. 2018. № 7. P. 25–31. DOI: 10.25791/infizik.07.2018.085
3. Barenbaum A. A. Sciences on space on the threshold of changes in scientific paradigms // *Engineering Physics*. 2018. № 9. P. 30–46. DOI: 10.25791/infizik.09.2018.175
4. Barenbaum A. A. The origin of microwave cosmic background // *Engineering Physics*. 2019. № 1. P. 39–48. DOI: 10.25791/infizik.01.2019.392

1-6

УПРАВЛЯЕМЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МАГНИТОСФЕРНУЮ ПЛАЗМУ С ПОМОЩЬЮ МОЩНОГО КОРОТКОВОЛНОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

А. С. Белов

Филиал РФЯЦ – ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова»,
Нижний Новгород, Россия
E-mail: alexis-belov@yandex.ru

Магнитосфера, являясь верхней частью атмосферы Земли, определяющим образом влияет как на характер жизнедеятельности на Земле, так и, как одна из частных технических проблем, на функционирование глобальных космических систем.

Особую опасность для низкоорбитальных искусственных спутников Земли представляют потоки высокоэнергичных электронов радиационных поясов. В связи с этим, становится актуальной задача не только контроля, но и управления состоянием магнитосферной плазмы.

Важную роль в динамике околоземной плазмы играют низкочастотные электромагнитные волны. Низкочастотные радиоизлучения ОНЧ диапазона эффективно взаимодействуют с высокоэнергичными электронами радиационных поясов Земли. В результате этого взаимодействия изменяетсяpitch-угол энергичных частиц, приводя к высыпаниям их в ионосферу. По этой причине контролируемое возбуждение ОНЧ волн в магнитосфере может обеспечивать снижение числа высокоэнергичных частиц для обеспечения безопасного функционирования низкоорбитальных искусственных спутников, как в случае экстремальных геомагнитных бурь, так и при антропогенных воздействиях. Основная сложность практического использования этих волн для регулирования населенности радиационных поясов, состоит в том, что взаимодействие волна-частица наиболее эффективно происходит в нелинейном режиме, зависящем от амплитуды волны. По этой причине крайне важным аспектом этого вопроса является не только генерация ОНЧ излучений, но и эффективная передача излучения из ионосферы в экваториальную магнитосферу, где происходит взаимодействие с высокоэнергичными электронами.

Наиболее адекватной методикой формирования искусственных дактов плотности, позволяющих локализовать низкочастотные волновые поля в окрестности узкой магнитной силовой трубки, является нагрев ионосферы мощным коротковолновым (КВ) радиоизлучением.

В работе представлены результаты натурных экспериментов по формированию искусственных дактов плотности и численного моделирования пространственной структуры и динамики развития возмущений околоземной плазмы при воздействии мощного КВ радиоизлучения нагревного стенда «Сура». Определены условия и характерные времена

формирования и релаксации возбуждаемых крупномасштабных неоднородностей плотности плазмы. Используя результаты численного моделирования, разработаны рекомендации по проведению контролируемого высокоэффективного воздействия на магнитосферную плазму.

**CONTROLLED IMPACTS
ON MAGNETOSPHERIC PLASMA
WITH THE HELP OF INTENSE SHORT-WAVE
RADIO EMISSION**

A. S. Belov

Sedakov Research Institute of Measuring Systems (NIIS),
Nizhny Novgorod, Russia

E-mail: alexis-belov@yandex.ru

Magnetosphere being the upper part of the Earth atmosphere to a certain extent influences both the character of the Earth vital activity, and functioning of global space systems.

Of special danger for low-orbit artificial Earth satellites are the flows of high-energy electrons of radiation belts. In this connection, the problem of managing the state of magnetospheric plasma becomes even more urgent than the problem of monitoring it.

Low-frequency electromagnetic waves play an important role in the dynamics of near Earth plasma. VLF emission effectively interacts with high-energy electrons of the Earth radiation belts. As the result of this interaction, pitch angle of energetic particles changes causing their precipitation in ionosphere. For this reason, controlled excitation of VLF waves in magnetosphere can provide decrease in the number of high-energy particles for ensuring safe functioning of low-orbital artificial satellites, both for the case of extreme geomagnetic storms, and for the case of anthropogenic impacts. The main challenge of practical use of these waves for adjusting radiation belts population is due to the fact that wave-particle interaction reaches the highest efficiency in nonlinear mode, which depends on wave amplitude. That is why very important aspect of this issue is not only generation of very low band radiation, but also effective radiation transport from ionosphere into equatorial magnetosphere, where interaction with high-energy electrons takes place.

Ionosphere heating by powerful short-wave radiation is the most adequate technique for forming artificial density ducts, which permits localization of low-frequency wave fields near narrow magnetic flux tube.

The work presents the results of full-scale experiments on forming artificial density ducts, and numerical modeling of spatial structure and dynamics of near Earth plasma perturbations under the impact of powerful short-wave emission induced by heating stand "Sura". The conditions and characteristic times of formation and relaxation of excited large-scale inhomogeneities of plasma density were determined. Using the results of numerical modeling, recommendations were developed on how to conduct controlled high-effective impact on magnetospheric plasma.

1-7

**НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ
k-EPS МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА
ПО ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ УДАРНОЙ ВОЛНЫ
С ТУРБУЛИЗОВАННЫМ СЛОЕМ**

М. И. Болдырев, С. А. Бабань, И. В. Глазырин,
Д. Н. Куприянец, Н. А. Михайлов, М. Н. Чижков

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

E-mail: i.v.glazyrin@vniitf.ru

Эксперимент, в котором ударная волна (УВ) два раза проходит через контактную границу воздуха и гексафторида серы в ударной трубе, позволяет определить особенности развития неустойчивости Рихмайера–Мешкова (РМ) [1]. После первого прохождения УВ начинается перемешивание веществ, затем зона турбуленности (ЗТ) резко сжимается во время второго прохода УВ, отраженной от торцевой стенки. Далее ЗТ существенно увеличивается в размерах. Для описания такого сложного поведения ширины ЗТ от времени модель турбулентности в газодинамической программе должна корректно описывать турбулентную диффузию. Один из вариантов *k-eps* модели, добавленный в программу Фокус [2], заимствована из работы [3] с небольшими изменениями в вычислении искусственной постоянной адиабаты. Модель позволяет получать решение, слабо зависящее от расчетной сетки. Для задания начальных данных для турбулентной кинетической энергии и скорости ее диссипации задаются однородные значения во всей расчетной области. Начальная величина турбулентной кинетической энергии *k* определяется из предположения, что амплитуда роста зоны составляет 1 процент от величины, характеризующей развитую турбулентность. Величина скорости диссипации турбулентной кинетической энергии *eps* связана с *k* через амплитуду изменения скорости при прохождении контактной границы и характерную длину волны возмущения. В данных расчетах девиаторная часть тензора Рейнольдса не учитывалась.

Из серии расчетов на последовательности разностных сеток от 10 тыс. до 75 тыс. ячеек получено, что предсказанная моделью ширина зоны до прихода УВ несколько ниже по сравнению с экспериментом, а в момент сжатия описывается достаточно точно. Ширина зоны после прохода отраженной УВ описывается также удовлетворительно. В серии расчетов определена зависимость результатов от параметров модели: констант затухания однородной турбулентности, сдвиговой турбулентности и эволюции при резком однородном сжатии.

Литература

1. E. Leinov, G. Malamud, Y. Elbaz, L. A. Levin, G. Ben-Dor, D. Shvarts, O. Sadot. Experimental and numerical investigation

of the Richtmyer-Meshkov instability under re-shock conditions // *J. Fluid Mech.* – 2009. – Vol. 626. – pp. 449–475.

2. Н. А. Михайлов, И. В. Глазырин, Метод укручения контактных границ для моделирования трехмерных многофазных сжимаемых течений в эйлеровых переменных. Заббахинские научные чтения: сборник тезисов XIII Международной конференции 20–24 марта 2017. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, с. 326, 2017

3. J. T. Moran-Lopez, O. Schilling. Multi-component Reynolds-averaged Navier-Stokes simulations of Richtmyer-Meshkov instability and mixing induced by reshock at different times // *Shock Waves.* – 2014. – Vol. 24(3). – pp. 325–343.

CALIBRATION OF K-EPS TURBULENCE MODEL FOR DESCRIPTION OF EXPERIMENTS ON INTERACTION OF SHOCK WAVE WITH TURBULENT LAYER

M. I. Boldyrev, S. A. Baban', I. V. Glazyrin,
D. N. Kupriyanec, N. A. Mikhailov, M. N. Chizhkov

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

E-mail: i.v.glazyrin@vniitf.ru

The experiment in which a shock wave (SW) passes twice through the contact boundary of air and sulfur hexafluoride in a shock tube, makes it possible to determine the features of the Richtmyer–Meshkov (RM) instability development [1]. After the first passage of the SW, the mixing of substances begins, then the turbulence zone (TZ) is sharply compressed during the second pass of the SW, reflected from the end wall. Further TZ significantly increases in size. To describe such a complex behavior of the TZ width over time, the turbulence model in the gas-dynamic code should correctly describe the turbulent diffusion. One of the variants of the k - ϵ s model, added to the code Focus [2], is borrowed from [3] with small changes in the calculation of the artificial adiabatic constant. The model allows obtaining a solution that is weakly dependent on the computational grid. To set the initial data for the turbulent kinetic energy and its dissipation rate, homogeneous values are set in the entire computational domain. The initial value of the turbulent kinetic energy k is determined from the assumption that the amplitude of the zone growth is 1 percent of the value characterizing the developed turbulence. The rate of dissipation of the turbulent kinetic energy ϵ is related to k through the amplitude of the velocity change during the passage of the contact boundary and the characteristic wavelength of the perturbation. The deviator part of the Reynolds tensor was not taken into account in these calculations.

From a series of calculations on a sequence of difference grids from 10 thousand to 75 thousand cells, it is obtained that the predicted width of the zone before the arrival of SW is slightly lower compared to the experiment, and at the time of compression is described quite accurately. The width of the zone after the passage of the reflected SW is also described satisfactorily. In the series of calculations, the dependence of the results on the model parameters is determined: the damping constants

of homogeneous turbulence, shear turbulence, and evolution under sharp uniform compression.

References

E. Leinov, G. Malamud, Y. Elbaz, L. A. Levin, G. Ben-Dor, D. Shvarts, O. Sadot. Experimental and numerical investigation of the Richtmyer-Meshkov instability under re-shock conditions // *J. Fluid Mech.* – 2009. – Vol. 626. – pp. 449–475.

2. Mikhaylov N. A., Glazyrin I. V. Method of contact bound steepening for the simulation of 3D multiphase compressible flows in Euler variables. XIII Zababakhin Scientific Talks, RFNC – VNIITF, Snezhinsk, march 20–24, 2017. – P. 326.

3. J. T. Moran-Lopez, O. Schilling. Multi-component Reynolds-averaged Navier-Stokes simulations of Richtmyer-Meshkov instability and mixing induced by reshock at different times // *Shock Waves.* – 2014. – Vol. 24(3). – pp. 325–343.

1-8

ЯВЛЕНИЯ НЕИДЕАЛЬНОЙ КУМУЛЯЦИИ

В. М. Фомин, В. И. Звегинцев, Е. Я. Брагунцов

Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: fomin@itam.nsc.ru, zvegin@itam.nsc.ru,
braegor@yandex.ru

Процесс формирования кумулятивной струи при косом соударении пластин, метаемых продуктами детонации, или при взрывном обжатии осесимметричных металлических облицовок, впервые объяснила гидродинамическая теория кумуляции, основанная на модели идеальной несжимаемой жидкости. В целом гидродинамическая теория кумулятивного эффекта остается простым и универсальным приближением. Однако некоторые факты, наблюдаемые экспериментально, в частности особенности поведения металла в условиях формирования и растяжения кумулятивной струи, а также при ее проникании в преграду послужили причиной уточнения гидродинамической теории.

На сегодняшний день прикладной интерес к кумулятивному эффекту растет. Разнообразие прикладных задач, растущий практический интерес диктуют необходимость более полного и адекватного чем гидродинамическая теория описания процесса кумуляции.

В данной работе предложен подход к объяснению особенностей деформации металла в процессе кумуляции основанный на использовании дислокационных механизмов пластической деформации и с учетом ударно-волновых процессов, происходящих на стадии обжатия облицовки и при растяжении струи. Получены аналитические выражения для определения предельного удлинения и времени разрушения кумулятивной струи, которые позволяют анализировать влияние на растяжение и разрушение струи прочностных и пластических свойств материала, его структурных характеристик, геометрических параметров облицовки и кинематических характеристик струи.

На основе дислокационных механизмов пластической деформации объяснен ряд особенностей в процессах растяжения и разрушения кумулятивных струй, которые наблюдаются на практике и не нашли до сих пор адекватного объяснения, в частности, зависимость предельного удлинения струи от структурно-механических характеристик металла (величины зерна, наклепа, текстуры), а также причины аномально большого удлинения материала кумулятивной струи перед разрушением.

Показано влияние структурной неоднородности материала облицовки на характер разрушения кумулятивной струи при ударно-волновом воздействии на стадии взрывного обжатия облицовки.

Установлена практически целесообразная степень чистоты металла облицовки, которая определяется пределом растворимости легирующих элементов и примесей.

Предлагаемый подход позволяет получить более глубокое понимание физических явлений, происходящих при деформировании металла в процессе кумуляции.

PHENOMENA OF NONIDEAL CUMULATIVE ACTION

V. M. Fomin, V. I. Zvegintsev, Ye. Ya. Braguntsov

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics
SB RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: fomin@itam.nsc.ru, zvegin@itam.nsc.ru,
braegor@yandex.ru

The process of the cumulative jet formation in the oblique collision of plates thrown by detonation products or in the explosive compression of axisymmetric metal liners was first explained by the hydrodynamic theory of cumulative action based on the model of an ideal incompressible fluid. In general, the hydrodynamic theory of the cumulative effect remains a simple and universal approximation. However, some facts observed experimentally, in particular, the behavior of metal under formation and stretching conditions of a cumulative jet, and also at its penetration into an obstacle, caused a refinement of the hydrodynamic theory.

Today, the applied interest in the cumulative effect is growing. A variety of applied problems, a growing practical interest dictate the need for a more complete and adequate description of the cumulative process than the hydrodynamic theory does it.

In this paper, an approach is proposed to explain the features of metal deformation in the cumulative process based on the use of dislocation mechanisms of plastic deformation and taking into account shock-wave processes occurring at the stage of liner collapse and jet stretching. Analytical expressions have been obtained for determining the ultimate elongation and time of disturbance of a cumulative jet which make it possible to analyze the effect of strength and plastic properties of a material, its structural characteristics, liner geometric parameters and kinematic characteristics of the jet on its stretching and disturbance.

Based on the dislocation mechanisms of plastic deformation, the authors have explained a number of features in the stretching and disturbance processes of cumulative jets, which are observed in action and have not yet been adequately explained, in particular, the dependence of the ultimate elongation of the jet on the metal structural and mechanical characteristics (sizes of grains, hammering harden, texture) as well as reasons for abnormally large elongation of the material cumulative jet before its disturbance.

The influence of structural heterogeneity of the liner material on the nature of the cumulative jet disturbance under shock action at the stage of explosive compression of the liner is shown.

A practically reasonable degree of purity of the liner metal which is determined by the solubility limit of alloying elements and impurities is established.

The proposed approach allows us to obtain a more fundamental understanding of the physical phenomena that occur during the deformation of metal in the process of cumulative action.

1-9

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НА СЦЕНАРИИ СХОЖДЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

И. Г. Бродова¹, И. Г. Ширинкина¹, А. Н. Петрова¹,
А. В. Коваль², Е. В. Шорохов², Е. Б. Смирнов²,
В. В. Астафьев¹, Т. И. Яблонских¹

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

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

E-mail: brodova@imp.uran.ru

Приведены результаты структурных исследований полых составных цилиндрических оболочек (толщина стенки 2 мм) из алюминиевых сплавов Д16 и АМц, нагруженных методом скользящей детонации по двум режимам, отличающихся длительностью импульса ударной волны. Установлены условия взрывного нагружения для полного схождения и схлопывания оболочек. Методом световой оптики, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии изучены структурные и фазовые превращения в оболочках в процессе ударно-волнового нагружения. Показана взаимосвязь состава, структуры и физико-механических характеристик сплавов с их поведением под действием ударного нагружения. Получены несколько сценариев схождения оболочек в зависимости от их состава и условий нагружения – от полного и устойчивого схождения до образования множественных отколов. В частности, при коротком импульсе ударной волны оболочка из сплава Д16 хрупко разрушается, образуется большое количество пор, трещин и зон

локализованной деформации. Более пластичная оболочка из сплава АМц сохраняет свою форму. Увеличение длительности импульса ударной волны приводит к схлопыванию оболочки из сплава Д16, эффектам кумуляции и плавления. Анализ структуры оболочки из сплава АМц, нагруженной по такому же режиму, показал ее полное и устойчивое схождение при отсутствии откольных явлений. Обнаружено, что в результате высокоскоростной деформации материал оболочек упрочняется, но микротвердость повышается не более чем на 250–285 МПа. Вероятно, незначительный рост микротвердости относительно репера отражает конкуренцию двух процессов – дислокационного упрочнения под действием высокоскоростной деформации и разупрочнения за счет разогрева оболочки при инерционном сжатии.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Структура» Г.р.№ АААА-А18-118020190116-6.

INFLUENCE OF COMPOSITION AND MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINUM ALLOYS ON SCENARIOS OF CONVERGENCE OF CYLINDRICAL SHELLS

I. G. Brodova¹, I. G. Shirinkina¹, A. N. Petrova¹,
A. V. Koval², E. V. Shorohov², E. B. Smirnov²,
V. V. Astafiev¹, T. I. Yablonskikh¹

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

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

E-mail: brodova@imp.uran.ru

The results of structural studies of the D16 and AMts aluminum alloys cylindrical shells (wall thickness is 2 mm) loaded by sliding detonation are presented. The conditions of explosive loading are established in order to complete convergence and collapse of shells. Structural and phase transformations in the shells during shock-wave loading were studied by means of light optics, scanning and transmission electron microscopy. The interrelation of the chemical composition, structure, physical and mechanical properties of the alloys with their behavior under the action of shock loading is shown. Several scenarios for the convergence of shells were obtained depending on their composition and loading conditions (from complete and stable convergence to the formation of multiple spalls). In particular, during a short impulse of a shock wave, the brittle D16 alloy shell breaks down. Large number of pores, cracks and zones of localized deformation are formed. The shell of more plastic AMts alloy retains its shape. The increasing in the duration of the shock wave pulse leads to the collapse of D16 alloy shell, and cumulation and melting effects. Analysis of the structure of the AMts alloy shell loaded according to the same mode shows its complete and stable convergence in the absence of spall phenomena. It was found that the material of the shells is strengthened, but the microhardness increases by no more than 250–285 МПа as a result

of high-speed deformation. Probably, a small increase in microhardness is attributed to the competition of two processes – dislocation hardening under the action of high-speed deformation and softening due to the heating of the shell during inertial convergence.

The work was performed in the framework of State Task № АААА-А18-118020190116-6 (Struktura).

1-10

25 ЛЕТ ПЕРВОМУ СОВМЕСТНОМУ РОССИЙСКО-АМЕРИКАНСКОМУ ЭКСПЕРИМЕНТУ С ДИСКОВЫМ ВМГ

А. М. Буйко¹, С. Ф. Гаранин¹,
И. Р. Линдемут², Р. Е. Рейновски²

¹Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

²Лос-Аламосская национальная лаборатория, Лос-Аламос, США

E-mail: AMBuyko@vniief.ru

Двадцать пять лет назад, 22 сентября 1993 г. в Арзамасе-16 (сейчас Саров), Россия, произошло событие, беспрецедентное в ядерную эру: Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (ВНИИЭФ) и Лос-Аламосская национальная лаборатория (ЛАНЛ), два института, создавшие ядерное оружие для своих стран, провели совместный научный эксперимент [1]. В эксперименте использовался дисковый взрывомагнитный генератор (ВМГ) с электровзрывным фольговым размыкателем тока (ФРТ), обеспечивающий передачу многих мегаджоулей электрической энергии за микросекундное время. В эксперименте, несмотря на пробой в передающей линии, в нагрузке был получен ток 20 МА, в те годы недостижимый для стационарных лабораторных экспериментов, и разогнан электровзрывающийся лайнер до скорости 25 км/с. В эксперименте были продемонстрированы возможности системы импульсной мощности, основанной на ВМГ, что привело к последующему развитию совместных работ с использованием ВМГ для имплозии лайнеров и их применениям. Успех совместных работ привел [2, 3] к новым проектам в области физики плазмы и термоядерных исследований, исследований свойств веществ и разработки импульсных электрофизических технологий и послужил толчком к разворачиванию программ по контролю и учету материалов и других международных соглашений высокого уровня по сотрудничеству. Результаты, полученные в этих работах, остаются важными вехами развития физики и техники и широко используются и в настоящее время. Среди них можно выделить:

1. Исследование свойств замагниченной горячей плазмы применительно к получению зажигания термоядерных реакций в системах МАГО-МТФ;
2. Получение рекордного по энергии лайнера в эксперименте HEL-1 (рекорд 25 Мдж не побит

и к настоящему времени), пригодного для сжатия плазмы в системе МАГО-MTF;

3. Использование дисковых ВМГ с ФРТ для разгона конденсированных лайнеров и исследований свойств веществ (эксперименты ALT-1, 2, RHSR-1, 2).

Литература

1. Buyko A. M., Bidylo N. P., Canada J. W., et al. / IEEE Trans. Plasma Sci. 25, 145 (1997).
2. Lindemuth I. R. and Reinovsky R. E., in *Doomed to Cooperate*, S. S. Hecker, Ed. (Bathtub Row Press, Los Alamos, NM, 2016), V. II, 199–213.
3. Garanin S. F. *ibid*, 215–234.

25TH ANNIVERSARY OF THE JOINT US- RUSSIAN DISK EMG EXPERIMENT

A. M. Buyko¹, S. F. Garanin¹,
I. R. Lindemuth², R. E. Reinovsky²

¹Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Research
Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

²Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, USA
E-mail: AMBuyko@vniief.ru

Twenty-five years ago, on September 22, 1993, an event, unprecedented in the nuclear age, took place at Arzamas-16, Russia, as the All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics (VNIIEF) and the Los Alamos National Laboratory (LANL), the two institutes that designed the first nuclear weapons of their respective nations, combined capabilities to conduct a joint scientific experiment [1]. The experiment used a VNIIEF disk explosive magnetic flux compression generator (EMG) with an electrically exploded foil opening switch (FOS) to transfer multi-megajoule pulse of electric energy on a microsecond timescale to a magnetic implosion assembly. Despite a breakdown in the transmission line, the experiment delivered a load current of 20 MA, then-unattainable in stationary laboratory-scale experiments, and drove an electrically exploded liner to a velocity of 25 km/s. The experiment demonstrated the applications of the EMG-based pulsed power system to high energy density research, and resulted in the subsequent expansion through the 1990s and into the 2000s of joint VNIIEF/LANL EMG-enabled work on imploded liners and their applications. The success of the joint efforts led [2, 3] to new projects in plasma physics and fusion research, materials science, and driver technology development; and set the stage for additional programs in material control and accountability and several other high level international agreements on cooperation. The results of this work constitute important milestones in physics and engineering development and are widely used today. These results include but are not limited to the following:

1. Magnetized hot plasma studies as applied to fusion ignition in MAGO-MTF systems;
2. Record-setting liner energy in the HEL-1 experiment (the 25-MJ record of this experiment has not been beaten yet) making the liner suitable for plasma compression in the MAGO-MTF system;

3. Use of disk EMGs with FOS to drive condensed-matter liners and to study materials properties (ALT-1, 2, RHSR-1, 2 experiments).

References

1. Buyko A. M., Bidylo N. P., Canada J. W., et al. / IEEE Trans. Plasma Sci. 25, 145 (1997).
2. Lindemuth I. R. and Reinovsky R. E., in *Doomed to Cooperate*, S. S. Hecker, Ed. (Bathtub Row Press, Los Alamos, NM, 2016), V. II, 199–213.
3. Garanin S. F. *ibid*, 215–234.

1-11

ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ КОМЕТЫ ЧУРУМОВА-ГЕРАСИМЕНКО

М. Ф. Валеев

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

Комета Чурумова-Герасименко имеет необычную форму, напоминающую гантель с некруглыми телами на концах соединенных коротким перешейком. В работе рассматривается гипотеза образования такой формы кометы Чурумова-Герасименко за счет деформаций ползучести, возникающих от действия центробежных сил при вращении кометы в невесомости. Рассматривается деформирование за счет ползучести тела в виде цилиндра со скругленными краями, длина цилиндра на 10% превышает его диаметр. Расчеты проведены методом конечных элементов при вращении цилиндра вокруг оси, проходящей через центр масс перпендикулярно оси симметрии цилиндра.

По результатам расчетов показано, что возможно получение деформированного тела в форме подобной форме кометы Чурумова-Герасименко за счет длительного деформирования первоначально компактного тела. При этом принимаются допущения, выполнение которых трудно доказать при данном уровне данных о комете Чурумова-Герасименко.

Показано, что доводом в пользу формообразования за счет вытягивания является гладкая поверхность перешейка, тогда как поверхность остальной части является неровной. Неровности в виде углублений при вытягивании частично закрываются, и поверхность становится более гладкой.

POSSIBLE FORMATION MECHANISM OF CHURUMOV-GERASIMENKO COMET

M. F. Valeev

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

Churumov-Gerasimenko comet has unusual shape which resembles a dumb bell with noncircular bodies at the ends connected by a short bridge. In this paper we

consider the hypothesis according to which Churumov-Gerasimenko comet was formed due to creep strain arising from centrifugal force action as the comet was spinning in zero-gravity conditions. Deformation was caused by creep strain in the cylinder-shaped body with rounded edges. The cylinder length is 10% bigger than its diameter. Calculations were carried out using finite-element method for the case when the cylinder spins on its axis which passes through the center of masses; the spin axis is perpendicular to the axis of the cylinder symmetry.

The calculations show that the shape similar to that of Churumov-Gerasimenko comet can be the result of the long-lasting deformation of the initially compact body. In this case one makes assumptions which are difficult to prove considering the present amount of data on Churumov-Gerasimenko comet.

The surface of the bridge, in contrast to the surface of the remaining part, is rough; the fact supports the theory of stretching formation. Dimples are partially closed in the course of elongation and the surface becomes smoother.

1-12

СРАВНЕНИЯ ЯВЛЕНИЙ С ОГРАНИЧЕННОЙ КУМУЛЯЦИЕЙ В ФЕМТО-, НАНО-, МЕЗО- И МАКРОМИРАХ

Ф. И. Высикайло

Московский государственный областной университет,
Москва, Россия

Рассматриваются проблемы адекватного и верифицированного экспериментальными наблюдениями аналитического и численного описания явлений с ограниченной кумуляцией (фокусировкой) и диссипацией (распылом) энерго-массово-импульсных потоков (ЭМИП) в фемто- (атомном ядре), нано-(фуллеренах, экситонах большого радиуса), мезо-(тропические циклоны, наноструктурированные материалы, ионосфера) и макромирах (процессы кумуляции и диссипации в гелиосфере, спиральные галактики и кулоновские пульсары – квантовые звезды и стратифицированные струи из черных дыр). Исследованы степень кумуляции энергии (СКПЭ), поверхностные натяжения таких плазмидов и нейтральных кумулятивно-диссипативных структур. Исследуются общие теоретические аспекты этих проблем. Сформулирован принцип обобщенного математического транспонирования МОМТ – переноса математических моделей из хорошо исследованных областей естественных наук в области, исследованные, пока, недостаточно хорошо. Обсуждаются экспериментальные подтверждения МОМТ и полученные с его помощью новые знания о ранее не известных кумулятивных явлениях в природе. Подчеркивается практическая ценность сравнительного анализа разноразмерных (разноразмерных) кумулятивных явлений.

COMPARISONS OF PHENOMENA WITH LIMITED CUMULATION IN FEMTO-, NANO-, MEZO- AND MACRO-WORLDS

P. I. Vysikaylo

Moscow Region State University, Moscow, Russia

The principle of generalized mathematical transposition (PGMT) is formulated: the transfer of mathematical models from well-studied fields of natural sciences in the field that have not been studied well enough. Experimental confirmations of MOMT and new knowledge obtained about previously unknown cumulative phenomena in nature are discussed. The practical value of a comparative analysis of cumulative phenomena of different sizes (multi-level) is underlined.

1-13

ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦ И ОБЪЕКТОВ ВО ВСЕЛЕННОЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГРАВИТАЦИИ МАССИВНОГО ТЕЛА

П. М. Гаврилов

ФГУП «Горно-химический комбинат»,
Железнодорожск, Россия

E-mail: gln@mcc.krasnoyarsk.su

В работе [1] Ф. Цвикки сравнивал наблюдаемые относительные скорости галактик через телескоп с абсолютными расчетными значениями. Для объяснения полученной разницы в ~500 раз в [1] предполагается наличие некой «темной энергии», обусловленной «темной массой».

Решая уравнение [2] в работе [3] в предположении отсутствия существования «темной энергии» (в отличие от [1]) получено автомодельное безразмерное решение:

$$\tilde{a} = \frac{1}{\tilde{r}} - \frac{1}{\tilde{r}^2},$$

где безразмерные функционалы $\tilde{a} = a/(3v^2/r_e)$, $\tilde{r} = r/r_e$. a – ускорение частицы (объекта); v – скорость частицы (объекта); r – радиус; $r_e = GM/(3v^2)$ – радиус равновесия сил гравитации и инерции.

Функционал \tilde{a} не зависит от времени t , а зависит только от \tilde{r} , тогда получим некий безразмерный функционал \tilde{v} , который зависит от $\tilde{r}(r; v(t))$:

$$\tilde{v}(\tilde{r}) = \int \tilde{a}(\tilde{r}) d\tilde{r} = \ln \tilde{r} + \frac{1}{\tilde{r}}.$$

Физический смысл функционала $\tilde{v}(\tilde{r})$ означает относительное движение частицы (объекта), что делает корректным сравнение $\tilde{v}(\tilde{r})$ с наблюдениями [1].

Литература

1. F. Zwicky. On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae. *Astrophysical Journal*, Vol. 86, p. 217.
2. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Теоретическая физика, механика. М.: Наука, 1988. Т. 1.

3. Гаврилов П. М. Инерционное движение и гравитационное взаимодействие тел во Вселенной. // Тезисы докладов. XII Забабакхинские научные чтения. РФЯЦ – ВНИИТФ. 2014. С. 57–58.

MOTION OF PARTICLES AND OBJECTS IN THE UNIVERSE INFLUENCED BY MASSIVE BODY GRAVITATION

P. M. Gavrilov

Federal State Unitary Enterprise “Mining and Chemical Combine”, Zheleznogorsk, Russia

E-mail: gln@mcc.krasnoyarsk.su

In his study [1] F. Zwicky compared the relative velocities of galaxies observable through the telescope to the absolute calculated values. To explain the difference in ~500 times in [1] he assumes a certain “dark energy” resulting from “dark mass”.

Solving equation [2] within paper [3] in the assumption of no existence of “dark energy” (in contrast to [1]) a self-similar dimensionless solution is obtained:

$$\tilde{a} = \frac{1}{\tilde{r}} - \frac{1}{\tilde{r}^2},$$

where the dimensionless functionals are $\tilde{a} = a/(3v^2/r_e)$, $\tilde{r} = r/r_e$. a – acceleration of the particle (object), v – the speed of the particle (object), r – radius, $r_e = GM/(3v^2)$ – radius of equilibrium of gravity and inertia forces.

The functional \tilde{a} does not depend on time t , and depends on \tilde{r} only, then we obtain a dimensionless functional \tilde{v} which depends on: $\tilde{r}(r; v(t))$

$$\tilde{v}(\tilde{r}) = \int \tilde{a}(\tilde{r}) d\tilde{r} = \ln \tilde{r} + \frac{1}{\tilde{r}}.$$

The physical meaning of the functional $\tilde{v}(\tilde{r})$ means the relative motion of a particle (object), which makes a correct comparison of $\tilde{v}(\tilde{r})$ with the observations [1].

References

1. F. Zwicky. On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae. *Astrophysical Journal*, Vol. 86, p. 217.
2. L. D. Landau, E. M. Lifshitz, *Theoretical physics, mechanics*. M.: Nauka, 1988. V.1.
3. Gavrilov P. M. Inertial motion and gravitational interaction of bodies in the Universe. // Abstracts. XII Zababakhin scientific readings. VNIITF. 2014. pp 57–58.

1-14

ДИНАМИКА ОБРАЗОВАНИЯ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КРАТЕРОВ В КАТОДНОМ ПЯТНЕ ВАКУУМНОЙ ДУГИ

М. А. Гашков, Н. М. Зубарев,
Г. А. Месяц, И. В. Уйманов

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия
E-mail: gashkov@iep.uran.ru

В работе теоретически исследуется формирование вторичных струй при функционировании ячеек катодного пятна, которое, согласно эктонной модели, играет существенную роль в самоподдержании вакуумного дугового разряда. В рассматриваемой модели процесс образования струй разбивается на два этапа. На первом этапе по контуру кратера происходит формирование осесимметричного вала. Этот процесс был рассчитан численно. На втором этапе образовавшийся вал распадается на капли и струи. Установлено, что за распад вала в широком диапазоне токов и размеров ячеек ответственна неустойчивость Релея–Плато.

Работа выполнена в рамках темы гос. задания 0389-2014-0006 при поддержке РФФИ (проекты 18-38-00313, 17-02-00346, 17-08-00430, 19-08-00098) и Президиума РАН (программа № 9 «Электрофизика и электроника мощных импульсных систем»).

DYNAMICS OF LIQUID-METAL JETS FORMATION DURING THE FORMATION OF CRATERS IN A VACUUM ARC CATHODE SPOT

M. A. Gashkov, G. A. Mesyats,
I. V. Uimanov, N. M. Zubarev

Institute of Electrophysics UB RAS, Ekaterinburg, Russia

E-mail: gashkov@iep.uran.ru

The paper theoretically studies the formation of secondary jets during the operation of the cells of the cathode spot, which, according to the ecton model, plays a significant role in the self-maintenance of a vacuum arc discharge. In the considered model, the jet formation process is divided into two stages. At the first stage, the axisymmetric rim is formed around the crater. This process was numerically calculated. At the second stage, the formed rim breaks up into droplets and jets. It was determined that the Rayleigh–Plateau instability is responsible for the rim breakup in a wide range of currents and cell sizes.

This work was performed in the framework of state programs 0389-2014-0006 and supported in part by the Russian Academy of Sciences (program of the Presidium of RAS No. 9) and by the RFBR (projects No. 18-38-00313, 17-02-00346, 17-08-00430, 19-08-00098).

1-15

МЕТЕОРИТИКА ПОСЛЕ ЧЕЛЯБИНСКОГО СОБЫТИЯ 15.02.2013 ГОДА

В. И. Гроховский

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

E-mail: grokh47@mail.ru

Обзор. Классическое явление планетарного масштаба. Междисциплинарный интерес. Множественная регистрация. Важные знания в определении размеров, орбиты, разрушения, взрыва, минерального состава

и космической истории метеороида. Опыт сбора, расщепления и подъема из озера фрагментов метеорита. Анализ темной траектории и атмосферных явлений. По уточненным моделям находки метеоритов Аннама и Озерки. Проведение 7 конференций и съезда международного Метеоритного общества в Москве. Экспериментальное моделирование природы различных литологий в метеорите Челябинск.

**METEORITE SCIENCE
AFTER CHELYABINSK EVENT
OF FEBRUARY 15, 2013**

V. I. Grokhovsky

Physical and Technological Institute, Ural Federal University,
Ekaterinburg, Russia
E-mail: grokh47@mail.ru

Review. Classical phenomenon of planetary scale. Interdisciplinary interest. Multiple registration. Important knowledge in determining the sizes, orbit, destruction, explosion, mineral composition and space history of meteorite. Experience of collection, dispersion, and lifting of meteorite fragments from the lake. Analysis of the dark trajectory and atmospheric phenomena. The findings of meteorites Annama and Ozerki according to refined models. Conducting 7 conferences and congress of international Meteorite society in Moscow. Experimental modeling of the nature of various lithologies in Chelyabinsk meteorite.

1-16

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СХОЖДЕНИЯ
МЕДНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК**

В. И. Зельдович¹, Н. Ю. Фролова¹, А. Э. Хейфец¹,
И. В. Хомская¹, Е. Б. Смирнов²,
А. А. Дегтярев², 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

Медные цилиндрические оболочки диаметром 24 и 48 мм и толщиной стенки 2 и 4 мм, соответственно, были подвергнуты действию взрыва цилиндрического заряда ВВ, окружающего оболочки. Толщины заряда была 1 и 4 мм, соответственно. Оболочка диаметром 24 мм разделилась в результате откола на два кольца. Внутреннее кольцо потеряло устойчивость и скомкалось при инерционном сжатии. Из этого следует, что высокоскоростная деформация при сжатии данной оболочки осуществлялась преимущественно изгибом.

В оболочках диаметром 48 мм образовалась широкая кольцевая зона откольных явлений в виде мик-

ропор и трещин, которые залечивались при последующей высокоскоростной деформации в процессе инерционного сжатия. Следы залеченных пор сохранялись в микроструктуре в виде деформационных вихреобразных участков, следы залеченных трещин – в виде ломаных линий с микродвойниками. Структура оболочек диаметром 48 мм в поперечном сечении состояла из трех характерных кольцевых зон. В средней зоне деформация была хаотическая, так как разнообразные структуры залечивания искажали осевую симметрию радиальной деформации.

В наружной и внутренней зонах деформация происходила, главным образом, в радиальном направлении, с некоторыми закономерными отклонениями от этого направления. На поверхности сжатого цилиндра возникли периодически расположенные выступы и вмятины, что указывает на потерю устойчивости круглого деформационного фронта. В местах вмятин образовались удлиненные участки локализованной сдвиговой деформации, направление которых отклонено от радиального на углы ~30 градусов. Данная сдвиговая деформация является причиной возникновения выступов на поверхности. В остальном, деформация в наружной зоне была радиальной.

Во внутренней зоне радиальная деформация носила периодический характер: сильно деформированные участки чередовались со слабее деформированными. Было обнаружено, что на завершающей стадии сжатия на внутренней поверхности оболочки возникают периодически расположенные выступы (выбросы), что свидетельствует о потере устойчивости фронта деформации. Для выступов подходит название «пластические струи», которое ввел В. В. Рыбин при изучении сварки взрывом. Это название отражает и форму, и гидродинамическое происхождение выступов. При дальнейшем сжатии выступы сближаются и соединяются, сходясь к центру оболочки. При соприкосновении выступов в микроструктуре сохраняются их боковые границы, похожие на трещины.

Таким образом, при исследовании процесса сжатия данных оболочек были обнаружены разные случаи откольных явлений и потери устойчивости гладкого деформационного фронта.

Работа выполнена в рамках темы «Структура» (№ АААА-А18-118020190116-6), при частичной поддержке Комплексной программы УрО РАН (проект 18-10-2-39).

STUDY OF THE CONVERGENCE PROCESS OF COPPER CYLINDRICAL SHELLS

V. I. Zel'dovich¹, N. Yu. Frolova¹, A. E. Kheyfets¹,
I. V. Khomskaya¹, E. B. Smirnov²,
A. A. Degtyarev², E. V. Shorokhov²

¹M. N. Miheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

²Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia
E-mail: zeldovich@imp.uran.ru

Copper cylindrical shells with a diameter of 24 and 48 mm and a wall thickness of 2 and 4 mm, respectively, were subjected to the explosion of a cylindrical explosive charge surrounding the shell. The thickness of the charge was 1 and 4 mm, respectively. The shell with a diameter of 24 mm was divided as a result of spalling into two rings. The inner ring lost stability and crumpled during inertial convergence. From this it follows that the high-speed deformation during the convergence of this shell was carried out mainly by bending.

A wide annular zone of spall phenomena in the form of micropores and cracks formed in the shells with a diameter of 48 mm. Micropores and cracks healed during subsequent high-speed deformation during inertial convergence. The traces of the healed pores remained in the microstructure in the form of deformation vortex-shaped sections, the traces of the healed cracks – in the form of broken lines with microtwins. The structure of shells with a diameter of 48 mm in cross section consisted of three characteristic annular zones. In the middle zone, the deformation was chaotic, since the various healing structures distorted the axial symmetry of the radial deformation.

In the outer and inner zones, the deformation occurred mainly in the radial direction, with some regular deviations from this direction. Periodically located protrusions and dents appeared on the surface of the collapsed cylinder, which indicates a loss of stability of the circular deformation front. Elongated localized shear deformations were formed in places of dents, the direction of which is deviated from the radial angles of ~30 degrees. This shear deformation causes protrusions on the surface. For the rest, the deformation in the outer zone was radial.

In the inner zone, the radial deformation was periodic: strongly deformed areas alternated with weaker deformed ones. It was found that at the final stage of convergence on the inner surface of the shell there are periodically located protrusions (outliers), which indicates a loss of stability of the deformation front. Protrusions can be called “plastic jets”, which introduced V.V.Rybin in the study of explosive welding. This name reflects both the shape and hydrodynamic origin of the protrusions. With further convergence, the protrusions getting closer and connect, converging to the center of the shell. Upon contact of the protrusions in the microstructure maintain their side of the border, similar to cracks.

Thus, in the study of the convergence of these shells were found different cases of spall phenomena and loss of stability of the smooth deformation front.

This work was supported by RAS theme “Structure” (№ АААА-А18-118020190116-6) and partially supported by projects of Presidium of RAS (project 18-10-2-39).

1-17

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ АСТЕРОИДА АПОФИС, ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРИТА И АСТЕРОИДА 2008 ТСЗ ПО ОПТИЧЕСКИМ ИЗМЕРЕНИЯМ СИСТЕМЫ «НЕБОСВОД»

В. В. Ивашкин, П. Гуо

Институт прикладной математики имени М. В. Келдыша РАН, Москва, Россия

E-mail: ivashkin@keldysh.ru; 869792831@qq.com

Разработка космической системы с телескопами, предназначенной для обнаружения и каталогизации объектов, сближающихся с Землей, является актуальной задачей для обеспечения астероидно-кометной безопасности Земли. В России исследуются несколько таких систем, среди них – проектируемая корпорацией «Комета» система «Небосвод». В состав этой системы входят два космических комплекса. Первый комплекс, «Небосвод-1», имеет два космических аппарата с телескопами. Они устанавливаются на геосинхронных орбитах, близких к геостационарной орбите, и регулярно осматривают всю небесную сферу, кроме околосолнечной области, где есть засветка Солнцем оптической аппаратуры. Второй комплекс, «Небосвод-2», с двумя космическими аппаратами с телескопами, устанавливается на гелиоцентрической орбите Земли, на некотором расстоянии от нее, например, около 40 млн км – по двум сторонам от Земли, и регулярно осматривает «сбоку» пространство между Солнцем и Землей, недоступное для наблюдения оптическими средствами с Земли и с околоземных орбит.

Разрабатываемая система «Небосвод» дает возможность массово обнаружить сближающиеся с Землей астероиды, кометы и метеороиды, определить или уточнить их орбиты по результатам оптических измерений с космических аппаратов этой системы. Для выявления навигационных характеристик системы «Небосвод» рассмотрена задача моделирования движения, наблюдения, измерений и определения параметров орбиты опасного астероида по данным измерениям. Приведены результаты анализа точности навигации при применении системы «Небосвод» для наблюдения и измерений некоторых сближающихся с Землей астероидов – астероида Апофис, Челябинского метеорита и астероида 2008 ТСЗ. Анализ показал потенциальную возможность наблюдений данной системой даже «дневных» небесных тел, приближающихся к Земле со стороны Солнца.

**ACCURACY ANALYSIS FOR DETERMINING
ORBITAL PARAMETERS OF THE APOPHIS
ASTEROID, CHELYABINSK METEOROID
AND ASTEROID 2008 TC3 USING «NEBOSVOD»
SYSTEM'S OPTICAL MEASUREMENTS**

V. V. Ivashkin, P. Guo

Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS,
Moscow, Russia

E-mail: ivashkin@keldysh.ru; 869792831@qq.com

The development of space survey system with telescopes for detecting and cataloging Near-Earth objects is an important task for ensuring the safety of Earth against collisions with asteroids and comets. In Russia, several such systems are being investigated, among them the “Nebosvod” system being projected by corporation “Cometa”. This system includes two space complexes. The first complex, “Nebosvod-1”, has two spacecraft with telescopes, they are installed in geosynchronous orbits, close to geostationary orbit, and regularly inspects the entire celestial sphere, except for Near-Sun region, where there is Sun illumination for optical equipment. The second complex, “Nebosvod-2”, including two spacecraft with telescopes, is installed in Earth’s heliocentric orbit, at some distance from it, for example, about 40 million km – on both sides of Earth, and regularly “from the side” inspects the space between Sun and Earth, where is impossible to observe by optical means from Earth and Near-Earth orbits.

The projected “Nebosvod” system makes it possible to massively detect Near-Earth asteroids, comets and meteoroids, and to determine or refine their orbits according to results of optical measurements from spacecraft of this system. To identify navigation characteristics of “Nebosvod” system, the task of modeling the motion, observation, measurement, and determination of orbital parameters of a hazardous asteroid from these measurements was considered. The analysis results for navigation accuracies are presented using observation and measurements by “Nebosvod” system for some Near-Earth asteroids – Apophis, the Chelyabinsk meteorite and asteroid 2008 TC3. The analysis showed potential possibility of observations by this system even for “daytime” celestial bodies approaching Earth from the Sun side.

1-18

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ
РАДИАЦИОННЫХ И ТЕПЛОВЫХ ЯВЛЕНИЙ,
ОБРАЗУЕМЫХ ПРИ КАВИТАЦИИ СТРУЙ
ЖИДКОСТИ НА ДЕЙТЕРИРОВАННЫЙ ТИТАН**

А. А. Корнилова¹, С. Н. Гайдамака¹, А. Г. Сверчков²

¹Московский государственный университет имени
М. В. Ломоносова, Москва, Россия

²Общество с ограниченной ответственностью «Регнум»,
Москва, Россия

E-mail: prfnart@mail.ru

В работе рассмотрены оптические и радиационные процессы, которые сопутствуют режиму кавитации при свободном выходе сверхзвуковой струи воды из узкого канала. Обнаружено, что выходная часть канала камеры, внутри которой происходит зарождение и эволюция кавитационных пузырьков, а также начальный участок струи воды являются источниками интенсивного рентгеновского излучения, генерация которого связана с процессами кавитации и последующим возбуждением ударных тепловых волн. Полная активность рентгеновского излучения в исследуемой установке в режиме свободного выхода струи превышает 0,1 Кюри. Впервые обнаружено, что воздействие на толстые отдаленные экраны ударных акустических волн, которые формируются в воздухе в результате кавитации струи воды, приводит к генерации квазикогерентного направленного рентгеновского излучения с обратной стороны этих экранов. Пространственные параметры этого излучения зависят от формы и сечения экрана и от пространственных характеристик ударной волны. Предсказана возможность и проведены эксперименты по использованию «классических» твердотельных (стеклянных и металлических) линз для итоговой фокусировки комбинированных акусторентгеновских волн.

В работе представлены результаты экспериментов по изучению влияния незатухающих высокочастотных тепловых волн, генерируемых и распространяющихся в воздухе при кавитации струи воды в закрытой камере, на структуру и ядерные процессы в объеме удаленного дейтерированного поликристаллического образца титана с размерами зерен не более 50 микрон. Рентгенодифрактометрический анализ образцов показал, что после 5-минутного облучения насыщенными дейтерием и чистых образцов титана тепловыми волнами их фазовый состав не изменился, однако, все дифракционные максимумы на соответствующих дифрактограммах сдвинулись в сторону больших углов дифракции относительно их положения при рентгенографировании образцов до облучения, что свидетельствует о сжатии их кристаллических решеток при взаимодействии с облучением. Также незначительно изменились доли сосуществующих фаз и форма дифракционных линий. Кроме того, по результатам альфа-трекового анализа впервые обнаружено, что при таком воздействии происходит устойчивая генерация альфа-частиц в процессе реакций синтеза ядер с участием ядер дейтерия при комнатной температуре.

Показано, что метод такого дистанционного стимулирования ядерного синтеза открывает новые возможности и перспективы реализации управляемого ядерного синтеза.

**INVESTIGATION OF THE EFFECT
OF RADIATION AND HEAT PHENOMENA,
FORMED BY THE CAVITATION OF LIQUID
JETS TO DEUTERATED TITANIUM**

A. A. Kornilova¹, S. N. Gaydamaka¹, A. G. Sverchkov²

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Limited Liability Company «Regnum», Moscow, Russia

E-mail: prfnart@mail.ru

The investigation deals with optical and radiation processes that accompany the cavitation regime with a free exit of a supersonic water jet from a narrow channel. It was found that the output part of the chamber channel, inside of which the nucleation and evolution of cavitation bubbles occurs, as well as the initial part of the water jet are sources of intense X-ray radiation, the generation of which is associated with cavitation processes and with subsequent excitation of shock thermal waves. The total X-ray activity in the installation under study in the free-jet regime exceeds 0.1 Curie. For the first time it was discovered that the impact on thick distant screens of shock acoustic waves, which are formed in air as a result of cavitation of a jet of water, leads to the generation of quasi-coherent directional x-ray radiation from the back side of these screens. The spatial parameters of this radiation depend on the shape and section of the screen and on the spatial characteristics of the shock wave. The possibility was predicted and experiments were conducted on the use of «classical» solid-state (glass and metal) lenses for the final focusing of combined acousto-x-ray waves.

The research presents the results of experiments to study the effect of continuous high-frequency heat waves generated and propagating in air during cavitation of a water jet in a closed chamber on the structure and nuclear processes in the volume of a remote deuterated polycrystalline titanium sample with grain sizes of not more than 50 microns. X-ray diffraction analysis of the samples showed that after 5-minute irradiation of deuterium-saturated and pure titanium samples with thermal waves, their phase composition did not change, however, all diffraction peaks on the corresponding diffraction patterns shifted towards large diffraction angles relative to their position during the X-ray diffraction of the samples before irradiation, which indicates on the compression of their crystal lattices when interacting with radiation. Also, the proportions of coexisting phases and the shape of diffraction lines have slightly changed. In addition, according to the results of the alpha-track analysis, it was found for the first time that with such an effect, stable generation of alpha particles occurs in the process of nuclear fusion reactions with the participation of deuterium nuclei at room temperature.

It is shown that the method of such remote stimulation of nuclear fusion opens up new opportunities and prospects for the implementation of controlled nuclear fusion.

1-19

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ
НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ
РИХТМАЙЕРА–МЕШКОВА, РЕЛЕЯ–ТЕЙЛОРА
И КЕЛЬВИНА–ГЕЛЬМГОЛЬЦА НА МОЩНЫХ
ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВКАХ**

О. Г. Котова, И. В. Глазырин, К. Ф. Гребёнкин,
Н. А. Михайлов, К. С. Назаров, М. Н. Чижков

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

E-mail: ogkotova@vniitf.ru

Применение мощных лазерных установок для исследования газодинамических неустойчивостей Кельвина–Гельмгольца (КГ), Рихтмайера–Мешкова (РМ) и Релея–Тейлора (РТ) позволяет проводить эксперименты в сильно сжимаемых средах при высоких плотностях энергии. На лазерной установке OMEGA [1] ударная волна (УВ) генерируется 5 кДж 1 нс лазерным импульсом. При прохождении УВ через возмущенную границу раздела разноплотных сред развивается неустойчивость РМ. По мере торможения границы создаются условия для развития на ней неустойчивости РТ. Когда УВ создает поток вещества в верхнем слое относительно возмущенного нижнего слоя, возникает неустойчивость КГ.

В работе приводятся результаты численного моделирования по программе Фокус [2] развития перечисленных газодинамических неустойчивостей. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными данными и численным моделированием [1, 3]: временные зависимости координат УВ, контактной границы, размера струй и пузырей. Для неустойчивости КГ дополнительно изучается рост амплитуды возмущений отдельных вихрей.

Показано отличие двухмерных и трехмерных описаний развития неустойчивостей.

Литература

1. Miles A. R., Edwards M. J., Blue B., Hansen J. F., Robey H. F., Drake R. P., Kuranz C., Leibbrandt D. R. The effect of a short-wavelength mode on the evolution of a long-wavelength perturbation driven by a strong blast wave // *Physics of Plasmas* 2004, 11, 5507.
2. Михайлов Н. А., Глазырин И. В., Ершова А. В. и др. Особенности многокомпонентного Эйлера подхода в расчетах сжатия лазерных мишеней. Забабахинские научные чтения: сборник материалов XII Международной конференции 2–6 июня 2014. – Снежинск: Издательство РФЯЦ – ВНИИТФ, 2014. – С. 310.
3. Raman K. S., Hurricane O. A., Park H. S., Remington B. A., Robey H., Smalyuk V. A. Three-dimensional modeling and analysis of a high energy density Kelvin-Helmholtz Experiment // *Physics of Plasmas*, 2012, 22. LLNL-JRNL-531731.

**MODELLING OF RICHTMYER-MESHKOV,
RAYLEIGH-TEYLOR AND KELVIN-HELMHOLTZ
INSTABILITY DEVELOPMENT
ON POWER LASER FACILITIES**

O. G. Kotova, I. V. Glazyrin, K. F. Grebyonkin,
N. A. Mikhailov, K. S. Nazarov, M. N. Chizhkov

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

E-mail: ogkotova@vniitf.ru

The use of high-power laser systems for the study of Kelvin-Helmholtz (KH), Richtmyer-Meshkov (RM) and Rayleigh-Taylor (RT) gas-dynamic instabilities allows experiments in highly compressible fluids at high energy densities. The shock wave (SW) on the OMEGA laser facility [1] is generated by 5 kJ 1 ns laser pulse. During the passage of SW through the perturbed interface of different-density fluids, the RM instability develops. Because the interface is slowed down, conditions are created for the development of RT instability on it. When SW creates the flow of the material in the upper layer relative to the perturbed bottom layer, there is the condition for KH instability.

The work presents the results of numerical simulation of above-listed gas-dynamic instabilities development using the code Focus [2]. The results of calculations are compared with experimental data and numerical simulation [1, 3]: SW coordinates time dependences, the same for contact boundary, sizes of jets and bubbles. For the KH instability, the growth of the perturbation amplitude of individual vortices is also studied.

The difference between two-dimensional and three-dimensional descriptions of instability development is shown.

References

1. Miles A. R., Edwards M. J., Blue B., Hansen J. F., Robey H. F., Drake R. P., Kuranz C., Leibbrandt D. R. The effect of a short-wavelength mode on the evolution of a long-wavelength perturbation driven by a strong blast wave // *Physics of Plasmas* 2004, 11, 5507.
2. Mikhaylov N. A., Glazyrin I. V., Ershova A. V., etc. Numerical details of multicomponent Eulerian approach in the simulation of laser targets compression // *Zababakhin Scientific Talks: XII International Conference June 2–6, 2014. – Snezhinsk: RFNC – VNIITF, 2014. – P. 310.*
3. Raman K. S., Hurricane O. A., Park H. S., Remington B. A., Robey H., Smalyuk V. A. Three-dimensional modeling and analysis of a high energy density Kelvin-Helmholtz Experiment // *Physics of Plasmas*, 2012, 22. LLNL-JRNL-531731.

1-20

**ПОЛУЭМПИРИЧЕСКАЯ АНАЛИТИЧЕСКАЯ
МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК
УДАРНОЙ ВОЛНЫ В МЕТАЛЛАХ**

С. Ю. Гуськов¹, И. К. Красюк^{1,2}, А. Ю. Семенов¹,
И. А. Стучебрюхов^{1,2}, К. В. Хищенко³

¹Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН,
Москва, Россия

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
Москва, Россия

³Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

E-mail: krasyyuk@kapella.gpi.ru

Разработана нелинейная теория затухания плоской ударной волны в металлах для широкого диапазона изменения давления (0,1–10 ТПа). Для верификации теоретических выводов выполнены эксперименты, в которых ударная волна инициировалась воздействием лазерного импульса с длительностью 70 пс и интенсивностью (1–10²) ТВт/см². В экспериментах проведено экспериментальное измерение времен выхода гидродинамического возмущения на тыльные стороны мишеней. Выполнено численное моделирование изучаемых ударно-волновых процессов с использованием гидродинамического кода.

Работа выполнена при финансовой поддержке по программе РАН № 13 «Конденсированное вещество и плазма при высоких плотностях энергии» и гранта РФФИ № 18-02-00652.

**SEMI-EMPIRICAL ANALYTICAL MODEL
FOR CALCULATION OF SHOCK WAVE
CHARACTERISTICS IN METALS**

S. Yu. Gus'kov², I. K. Krasyyuk^{1,2}, A. Yu. Semenov²,
I. A. Stuchebrukhov^{1,2}, K. V. Khishchenko³

¹A. M. Prokhorov General Physics Institute of RAS,
Moscow, Russia

²P. N. Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, Russia

³Joint Institute for High Temperatures of RAS,
Moscow, Russia

E-mail: krasyyuk@kapella.gpi.ru

A nonlinear theory of plane shock wave attenuation in metals for a wide range of pressure changes (0.1–10 TPa) is developed. To verify the theoretical conclusions, experiments were carried out in which the shock wave was initiated by a laser pulse with duration of 70 ps and intensity (1–10²) TW/cm². The experimental measurement of the time of hydrodynamic perturbation release on the back sides of the targets was carried out. Numerical simulation of the studied shock-wave processes using a hydrodynamic code is performed.

This work was financially supported by the RAS program № 13 “Condensed matter and plasma at high energy densities” and by the RFBR Grant No. 18-02-00652.

1-21

**ИМИТАТОР ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ИМПУЛЬСОВ И ТОКОВ МОЛНИИ
С АМПЛИТУДОЙ ДО 150 кА**

В. Г. Филиппов, Н. М. Лепёхин, В. П. Мирошниченко,
А. Н. Бережнов, Ю. А. Назаров

Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ
технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
ВНИЦ 900, Истра, Россия
E-mail: n.m.lepehin@vniitf.ru

Научные исследования, связанные с современными достижениями в области физики молнии, теории и практики молниезащиты, а также разработкой устройств защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП) и методами их испытаний на надежность работы и устойчивость к токам молнии, требуют наличия специальных испытательных средств. Подобные научные исследования актуальны как для объектов гражданского назначения, так и для электротехнического оборудования, производимого для МО РФ и АЭС дизайна ГК «Росатом».

В состав «Уникальной научной установки “Комплексный высоковольтный стенд”» (УНУ КВС), предназначенной для проведения электрофизических исследований и входящей, в свою очередь, в состав исследовательской инфраструктуры Российской Федерации (<http://ckp-rf.ru/usu/73578/>), входит имитатор электромагнитных импульсов и токов молнии. С целью расширения функциональных возможностей УНУ КВС при модернизации Испытательного Центра ВНИЦ будет проведена реконструкция имитатора токов молнии.

В работе представлены технические характеристики и особенности проекта имитатора электромагнитных импульсов и токов молнии, который предназначен, в частности, для полномасштабных (током до 150 кА) испытаний УЗИП различных классов защиты.

**SIMULATOR OF ELECTROMAGNETIC
IMPULSES AND LIGHTNING CURRENTS
WITH AMPLITUDE UP TO 150 kA**

V. G. Filippov, N. M. Lepyokhin, V. P. Miroshnichenko,
A. N. Berezhnov, Yu. A. Nazarov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian
Research Institute of Technical Physics,
VNIC 900, Istra, Russia
E-mail: n.m.lepehin@vniitf.ru

Scientific research related to modern advances in lightning physics, the theory and practice of lightning protection, as well as the development of surge protective devices (SPDs) and methods for testing their reliability and resistance to lightning currents, require special test tools. Such research is relevant for both civilian objects and electrical equipment produced for the Russian Defense Ministry and NPP design “Rosatom” State Corporation.

The structure of the “Unique scientific installation Integrated high-voltage stand” (UNU KVS), intended for electrical research and included, in turn, the research infrastructure of the Russian Federation (<http://ckp-rf.ru/usu/73578/>), includes a simulator of electromagnetic pulses and lightning currents. In order to expand the functional capabilities of the KVS ULU, while upgrading the VNIC Test Center, a lightning current simulator will be reconstructed.

The paper presents the technical characteristics and features of the project of the simulator of electromagnetic pulses and lightning currents, which is intended, in particular, for full-scale (current up to 150 kA) tests of SPDs of various protection classes.

1-22

**УДЛИНЕННЫЕ КУМУЛЯТИВНЫЕ ЗАРЯДЫ
С МЕТАЕМОЙ СЕГМЕНТНО-ПРОФИЛЬНОЙ
ОБЛИЦОВКОЙ**

И. Р. Мингалеев, В. Я. Базотов,
А. А. Марсов, А. А. Мокеев

Казанский национальный исследовательский
технологический университет, Казань, Россия
E-mail: ttxb@mail.ru, alexander_mokeev@mail.ru

Методом рентгено-импульсной съемки исследованы закономерности детонационного метания сегментно-профильной облицовки удлинёнными кумулятивными зарядами. Установлены изменения кинетических параметров метания и формы метаемого элемента в зависимости от длительности инерционных деформационных процессов, протекающих в материале облицовки. Выполнены экспериментальные исследования по изучению изменений геометрических параметров прорези, формируемой зарядом в полубесконечной преграде в зависимости от конструктивных параметров заряда и условий его применения.

По результатам проведенных исследований установлено, прогиб h/d оказывает определенное влияние, как на глубину пробития, так и на ширину пробоины. Увеличение глубины пробития с увеличением прогиба очевидно связано с увеличением общего импульса, приходящегося на поверхность облицовки, вследствие чего образуется ударник практически с одинаковыми скоростями, но разными по массе, что предопределяет повышение эффекта. Для зависимости ширины образованной пробоины от величины прогиба, наблюдается обратная зависимость. Это связано с тем, что при увеличении прогиба облицовка испытывает большие деформационные превращения, появляется значительное радиальное истечение материала к центру, что в конечном итоге приводит к образованию ударника малой толщины.

Исследования влияния расстояния до преграды позволила установить, что существуют определенные интервалы расстояния до пробиваемой преграды, бли-

же которых значительно снижается глубина пробития. Это связано, прежде всего с наличием пространства, на котором происходит формирование метаэлемента из облицовки. В этот период происходят различные превращения, и весь процесс формирования является многостадийным. Влияние на параметры пробития толщины слоя взрывчатого вещества в предложенном диапазоне носит незначительный характер.

ELONGATED CUMULATIVE CHARGES WITH PROJECTED SEGMENT-PROFILE LINER

I. R. Mingaleyev, V. Ya. Bazotov,
A. A. Marsov, A. A. Mokeyev

Kazan National Research Technological University,
Kazan, Russia

E-mail: ttxb@mail.ru, alexander_mokeyev@mail.ru

The regularities of detonation projection of segment-profile liner by elongated cumulative charges were investigated using pulse radiography method. The variations in kinetic parameters of projection and shape of the projected element were determined depending on the duration of inertial deformation processes occurring in liner material. Experiments were carried out to investigate variations in geometry of the cut formed by the charge in the semi-infinite obstacle depending on the charge design parameters and the conditions of its use.

The results obtained showed that the h/d deflection exerted a specific influence on both penetration depth and hole width. The increase in penetration depth with the increase in deflection is evidently connected to the growth of the overall pulse occurring on the liner surface that results in the formation of impactors having almost the same velocities but different masses that predetermines the enhancing of the effect. The dependence of the final hole on the deflection amount is an inverse one. This is due to the fact that the increase in deflection is accompanied by extensive deformation of the liner and significant radial outflow of the material towards the center that eventually lead to the formation of an impactor having a small thickness.

The study of the effect of the distance to the obstacle permitted to establish that there are certain intervals to the penetrated obstacle closer which penetration depth becomes substantially lower. First of all, this results from the space available for the formation of the projected element from the liner. In this time, various transformations take place, the whole formation process being multi-stage. The effect of the explosive layer thickness on the penetration parameters is insignificant within the suggested range.

1-23

ЗАТУХАНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В ДРЕВЕСИНЕ БЕРЕЗЫ

А. К. Музыря

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

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

Древесина обладает рядом полезных свойств, предопределивших ее широкое использование в разнообразных областях человеческой деятельности (строительство, промышленность и многие другие). В частности, высокая степень деформации при нагружении делает ее эффективным амортизатором (демпфером), защищающим конструкции от удара. Демпфирующие свойства ряда пород описаны ранее. В этих исследованиях образцы подвергались удару массивным телом (5 кг) со скоростями до 10 м/с. Установлена степень ослабления ударной нагрузки на защищаемую конструкцию и ее связь с физико-механическими свойствами вещества. Эти исследования стимулировали дальнейший интерес к древесине и ее свойствам в области более интенсивных нагрузок, создаваемых контактным взрывом и сопровождающихся возникновением и распространением сильных ударных волн. Защитный механизм в этом случае основан на ослаблении ударной волны за счет диссипации энергии в процессе адиабатического сжатия вещества. Соответственно по мере распространения ударной волны происходит ее затухание. Закономерности убывания амплитуды ударной волны в древесине березы при различной ориентации волокон явились предметом выполненных исследований.

Описывается объект исследования – древесина березы, а также образцы, отражающие трехмерную анизотропию механических свойств древесины. Излагается способ создания взрывной нагрузки и описывается рентгенографический метод регистрации ударных волн. Полученные экспериментальные результаты представлены в виде зависимости скорости ударной волны от глубины проникания в древесину. Установлено наличие двух участков с разным темпом ослабления фронта. Диапазон относительных расстояний в древесине, выраженный в толщинах взрывчатого вещества, достигает 15. По результатам оценена эффективность древесины в качестве ослабителя ударных волн. На участке 0–6 мм скорость ударной волны уменьшается в 2,5 раза.

SHOCK WAVE ATTENUATION IN BIRCHWOOD

A. K. Muzyrya

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

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

Wood has a number of useful properties that predefined its wide use in different fields of human activities (building, industry and many others). In particular, high deformation ratio at loading makes it an effective shock absorber (damper) protecting the constructions from shock impact. Damping properties of some wood species were described earlier. During the research, the samples were subjected to shock impact by a massive body (5 kg) at speeds up to 10 km/s. We determined attenuation degree of shock load on the protected construction and its relation to physical-mechanical properties of the substance. These researches stimulated further interest to wood and its properties in the field of more intensive loads imposed by contact detonation and accompanied by origination and propagation of the strong shock waves. In this case the protection mechanism is based on shock wave attenuation due to energy dissipation while adiabatic compression of the substance. Correspondingly, the shock wave is decayed with propagation. Regularity of the shock wave amplitude decrease in the birch wood at various fiber orientations was the subject of the performed studies.

We have described the subject of our studies – birch wood, and the samples reflecting three-dimensional anisotropy of wood mechanical properties. We have reported the way of explosive loading generation and described X-ray diffraction method for shock waves recording. The obtained experimental results are presented in the form of dependence of shock wave speed on the wood penetration depth. Presence of two areas with different attenuation rates of the shock wave front was determined. The relative distances range in wood, expressed in thickness of high explosives, attains 15. Wood efficiency as an attenuator of shock waves was estimated by the results. Shock wave velocity 2.5 times decreases at the segment 0–6 mm.

1-24

**СТРУКТУРНЫЕ И ФАЗОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ
В МЕТЕОРИТЕ ЧЕЛЯБИНСК LL5 ПОСЛЕ
УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ**Р. Ф. Муфтахетдинова, В. И. Гроховский,
Г. А. ЯковлевУральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

E-mail: gizrozka91@bk.ru

Ранее были исследованы структурные изменения нескольких метеоритов (октаэдрит Сихотэ-Алинь, атаксит Чинге, хондрит Саратов) после нагружения сходящимися ударными волнами. В данной работе было исследовано воздействие сферического взрыв-

ного обжатия на структуру светлой литологии обыкновенного хондрита Челябинск. Образец был в форме шара диаметром 40 мм. Пиковые давления и температуры, достигаемые в центре шара, могут быть оценены примерно в 500 ГПа и 5000°C соответственно. С помощью оптической и электронной микроскопии были изучены четыре визуально различимые зоны, полученные после эксперимента. На расстоянии 0,25 см радиуса шарика (R) от центра находится зона ударного расплава. От 0,4 до 0,45 см от центра расположено кольцо темного цвета, а между ними – более светлая область. Далее на расстоянии 0,45–1,0 см светлая литология. С помощью экспериментов со сходящимися ударными волнами была продемонстрирована возможность формирования различных литологий в одном образце.

**STRUCTURAL AND PHASE CHANGES
IN THE CHELYABINSK LL5 METEORITE
AFTER SHOCK-WAVE LOADING**

R. F. Muftakhedinova, 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

Previously, structural changes of several meteorites (the Sikhote-Alin octahedrite; the Chinga ataxite; the Saratov chondrite) were investigated after loading with converging shock waves. In this work, the effect of spherical explosive compression on the structure of light lithology of Chelyabinsk ordinary chondrite was investigated. A sample was prepared in the shape of the ball of 40 mm in diameter. The peak pressures and temperatures reached in the center of the ball can be estimated to be about 500 GPa and 5000°C, respectively. The four visually different zones obtained from the spherical shock experiment on the light-colored lithology of Chelyabinsk LL5 were studied by optical and electron microscopy. At distance of 0,25 of the ball radius (R) from the center is the shock melted zone. From the 0,4 R to 0,45 R from the center the dark-colored ring is situated, while a brighter zone is situated between them. Further at the distance of 0,45–1,0 R light-colored lithology presented. Possibility of various lithologies formation in one sample has been demonstrated during converging shock waves experiment.

1-25

**ПОИСК КОСМИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА
В ХОЛОДНЫХ И ГОРЯЧИХ ПУСТЫНЯХ МИРА.
ОПЫТ МЕТЕОРИТНОЙ ЭКСПЕДИЦИИ УрФУ**А. Ю. Пастухович, М. Ю. Ларионов,
В. И. ГроховскийФизико-технологический институт,
Уральский Федеральный Университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

E-mail: a.iu.pastukhovich@urfu.ru

Метеоритная экспедиция УрФУ провела поисковые работы в 4-х пустынях мира – участки голубого льда вблизи гор Ломоносова (Земля Королевы Мод, Антарктида) 2015/2016, пустыня Деште-Лут (Иран), пустыня Атакама (Чили) 2017, пустыня Гоби (Монголия) 2018.

Найдено свыше 80 образцов метеоритов различных типов, общим весом ок. 70 кг. Установлены различные механизмы накопления космического вещества в зависимости от климатических и топографических условий пустыни. Разработана методика визуального поиска метеоритов.

**SEARCH FOR COSMIC SUBSTANCE
IN COLD AND HOT DESERT OF THE WORLD.
EXPERIENCE OF UrFU
METEORITE EXPEDITION**

A. Yu. Pastukhovich, M. Yu. Larionov, V. I. Grokhovsky

Institute of Physics and Technology,
Ural Federal University named after the first President
of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia
E-mail: a.iu.pastukhovich@urfu.ru

The search works have been carried out by the UrFU Meteorite Expedition in the 4 deserts of the world – blue ice fields near Lomonosov Mountains (Queen Maud Land, Antarctica) 2015/2016, Deshte-Lut desert (Iran), Atacama desert (Chile) 2017, Gobi Desert (Mongolia) 2018.

More than 80 samples of meteorites of various types were found, with a total weight of approx. 70 kg. Various mechanisms of accumulation of cosmic matter are established depending on the climatic and topographical conditions of the desert. The meteorites search technique was developed.

1-26

**КОНЦЕПЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАЛЫХ
КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРАНСПОРТНО-
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ**

С. Д. Ваулин, Р. А. Пешков, В. Б. Федоров

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», Челябинск, Россия

E-mail: peshkovra@susu.ru

Рассматривается концепция доставки целевой нагрузки с орбиты Земли к астероиду с использованием разрабатываемого в настоящее время Транспортно-энергетического модуля (ТЭМ) с ядерной энергетической установкой [1, 2]. ТЭМ сможет обеспечить оперативную доставку группы космических аппаратов для комплексного мультифизического исследования астероидов, систему анализа данных на базе мощного компьютера с элементами искусственного

интеллекта. Кроме того, наличие на борту источника электроэнергии мегаваттного класса позволит включить в состав аппаратуры энергоёмкое оборудование для локационного исследования поверхности космических объектов, а так же лазерного оборудования для воздействия на его поверхность.

Концепция предполагает использование полярных областей вращающихся астероидов в качестве мест предпочтительного размещения как модулей сопровождения, сбора, передачи, хранения и обработки данных, так и десантируемых модулей. ТЭМ обеспечит выравнивание вектора скорости центра масс экспедиционного комплекса с вектором скорости центра масс астероида. Так как большая часть известных малых тел вращаются вокруг центра масс и одной из главных осей, то нет необходимости орбитального движения космического аппарата вокруг астероида. Астероид за счет своего вращательного движения обеспечит возможность фото-видео съёмки большей части своей поверхности. Предварительная информация о параметрах вращательного движения астероида позволит локализовать две полюсные области, линейная скорость поверхности на которых, относительно космического аппарата, может быть минимальной.

После выполнения своей задачи посадочные модули в совокупности с модулем сопровождения, могут играть роль «маяков» для передачи информации на Землю об астероиде. Вывод транспортно-энергетическим модуля и космических аппаратов может осуществляться ракета-носителями космического назначения большого и среднего классов типа «Союз», «Протон», «Ангара», «Зенит» [3, 4] в перспективе возможно использование многоразовых ракета-носителей.

Литература

1. Сиявский В. В. Научно-технический задел по ядерному электроракетному межорбитальному буксиру «Геркулес» // Космическая техника и технология. – 2013. – № 3. – С. 25–45.
2. Щербина П. А., Сиявский В. В. Оптимизация параметров многоразового электроракетного межорбитального буксира в программе обеспечения грузопотоков // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2015. – № 5. – С. 70–80.
3. Дегтярь В. Г., Позин Г. Б., Сайтгараев С. С. Возможности ракетно-космических комплексов для создания ближнего эшелона защиты Земли // Сборник тезисов докладов XII Забабахинских Научных Чтений. – Снежинск. – 2014. – С. 9–10.
4. Бакланов О. Д., Зайцев А. В., Махутов Н. А. и др. Проблемы и основы создания международной системы планетарной защиты // Труды XII международной конференции «Забабахинские научные чтения» – Снежинск. – 2014.

CONCEPT OF SMALL SPACE OBJECTS RESEARCH USING TRANSPORT ENERGY MODULE

S. D. Vaulin, R. A. Peshkov, V. B. Fedorov

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «South Ural State University (national research university)», Chelyabinsk, Russia

E-mail: peshkovra@susu.ru

The concept of delivery of the target load from the earth orbit to the asteroid using the currently developed Transport and energy module (TEM) with a nuclear power plant is considered [1, 2]. TEM will be able to provide prompt delivery of a group of spacecraft for complex multiphysical research of asteroids, a data analysis system based on a powerful computer with elements of artificial intelligence. In addition, the presence of a megawatt-class power source on board will allow the equipment to include energy-intensive equipment for the location study of the surface of space objects, as well as laser equipment for the impact on its surface.

The concept involves the use of polar regions of rotating asteroids as preferred locations for both tracking modules, collection, transmission, storage and processing of data, and landing modules. TEM will align the velocity vector of the center of mass of the expedition complex with the velocity vector of the center of mass of the asteroid. Since most of the known small bodies revolve around the center of mass and one of the main axes, there is no need for orbital motion of the spacecraft around the asteroid. The asteroid due to its rotational motion will provide the possibility of photo-video shooting most of its surface. Preliminary information on the parameters of the asteroid's rotational motion will make it possible to localize two pole regions, where the linear velocity of the surface relative to the spacecraft may be minimal.

After completing its task, the landing modules in conjunction with the tracking module, can play the role of «beacons» to transmit information to Earth about the asteroid. The output of the transport and energy module and spacecraft can be carried out by space launch vehicles of large and medium classes such as «Soyuz», «Proton», «Angara», «Zenith» [3, 4] in the future, it is possible to use reusable launch vehicles.

References

1. Sinyavskiy V. V. Advanced technology for nuclear electric propulsion orbital transfer vehicle HERCULES // The Space Engineering and Technologies. – 2013. – № 3. – P. 25–45.
2. Scherbina P. A., Sinyavskiy V. V. Optimization of the parameters of a reusable space tug based in the program to ensure cargo traffic // Proceeding of the Russian Academy of Science. Power Engineering. – 2015. – № 5. – P. 70–80.
3. Degtyar V. G., Pozin G. B., Saitgaev S. S. Possibilities of the rocket-space complexes for building the near echelon of the earth protection system // Abstracts of Zababakhin Scientific Talks. – Snezhinsk. – 2014. – P. 9–10.
4. Baklanov O. D., Zaitsev A. V., Makhutov N. A. et al. Problems and fundamentals of the international planetary defence system

development // Proceeding of XII International Conference «Zababakhin Scientific Talks». – Snezhinsk, 2014.

1-27

О РОЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В ЭФФЕКТЕ СОНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КОЛЛАПСИРУЮЩИХ ПУЗЫРЬКОВ

В. А. Борисёнок¹, С. Ю. Седов^{1,2}

¹Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Саров, Россия

²Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

E-mail: vaborisenok@mephi.ru, SYuSedov@vniief.ru

В настоящей работе, в русле развития электрической модели образования источника свечения коллапсирующего пузырька в полярной жидкости [1, 2], проведены оценки напряженности электрического поля в приповерхностном слое. В качестве источников электрического поля за счет поляризации жидкости рассмотрены:

- 1) двойной электрический слой (тонкий поверхностный слой пространственно разделенных электрических зарядов противоположного знака, образующийся в окрестности границы раздела двух фаз) [3],
- 2) поляризация жидкости при действии градиента давления (флексозлектрический эффект) [4],
- 3) поляризация жидкости при действии градиента температуры (термоэлектрический эффект) [4].

Рассмотрены предполагаемые источники излучения пузырька. Предложены эксперименты для верификации рассмотренных механизмов.

Литература

1. Борисёнок В. А. Сонолюминесценция – два источника света / Материалы международной конференции «Харитоновские научные чтения». – Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2009. – С. 678–687.
2. Седов С. Ю., Борисёнок В. А. Флексозлектрический эффект и ударная поляризация в полярных жидкостях // Ядерная физика и инжиниринг, 2018 (в печати).
3. Салем Р. Р. Теория двойного слоя / М. : Физматлит, 2003.
4. Таганцев А. К. Пиро-, пьезо-, флексозлектрический эффекты в ионных кристаллах // УФН. – 1987. – Т. 153. – вып. 3. – С. 423–448.

ON THE ROLE OF ELECTRIC POLARIZATION IN THE SONOLUMINESCENCE EFFECT OF COLLAPSING BUBBLES

V. A. Borisyonok¹, S. Yu. Sedov^{1,2}

¹Sarov Engineering Physics Institute NNRI MEPHI, Sarov, Russia

²Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

E-mail: SYuSedov@vniief.ru, vaborisenok@mephi.ru

In the tideway of developing the electric luminosity model of a collapsing bubble in a polar liquid [1, 2] the electric field intensity in a near-surface layer has been evaluated in the present work. The following phenomena have been studied as the electric field sources caused by polarization of molecules:

1) a double electric layer – a thin surface layer of spatially-divided opposite-sign electric charges generated near the interface of two phases [3],

2) polarization of a liquid under the pressure gradient effect (flexoelectric effect) [4],

3) polarization of a liquid under the temperature gradient effect (thermoelectric effect) [4].

Probable radiation sources are discussed and experiments are proposed for the verification of these radiation sources.

References

1. Borisyonok V. A. Sonoluminescence: two sources of light / Proceedings of International Conference “Khariton’s Topical Scientific Readings”. Sarov: RFNC – VNIIEF, 2009. – P. 678–687.
2. Sedov S. Yu., Borisyonok V. A. Flexoelectric effect and shock-induced polarization in polar liquids // Nuclear Physics and Engineering. – 2018 (to be published).
3. Salem R. R. Теория двойного слоя / М. : Fizmatlit, 2003.
4. Tagantsev A. K. Piro-, piezo-, flexoelectric effects in heteropolar crystals // UFN. – 1987. – V.153. – Issue 3. – P. 423–448. (in Russian)

1-28

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПОРОХОВЫХ ЗАРЯДОВ НА ПРОДУКТОВЫЙ ПЛАСТ ТЕРРИГЕННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, НАХОДЯЩЕГОСЯ НА ПОЗДНЕЙ СТАДИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В. Г. Байдин¹, В. М. Крюков¹, А. С. Иванов¹,
Н. С. Жилиева¹, Ю. В. Лапина¹, И. А. Литвиненко¹,
А. Г. Нескин¹, О. Е. Петрова¹, Е. Е. Пигасов¹,
В. А. Симоненко¹, В. П. Соколов¹, Т. В. Чапурова¹,
А. В. Чернов¹, А. В. Хусаинов², В. М. Хусаинов²

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

²ООО «АРМ–Сервис», Москва, Россия

При разработке пластов, находящихся на поздней стадии эксплуатации, осуществляется динамическое воздействие на призабойную зону скважин с помощью пороховых генераторов давления [1]. Специалистами ООО «АРМ–Сервис» было обращено внимание [2, 3] на целесообразность развития технологий избирательного воздействия, учитывающих неоднородности и особенности геологических усло-

вий, включая характеристики остаточного насыщения нефтью, свойства межскважинного пространства пласта и разработаны технологические приемы, при которых достигается очистка призабойной зоны или обрабатывается удаленная зона пласта. В таких случаях совместно со специалистами недропользователей было замечено увеличение пластового и забойного давлений (соответственно, увеличение дебита нефти) в соседних скважинах [3].

Для определения эффекта воздействия, обусловленного работой пороховых генераторов давления, в единичной скважине ООО «АРМ–Сервис» был проведен промысловый эксперимент (08.08.2017 г. – 28.09.2017 г.). В эксперименте с помощью датчика, установленного в основной скважине ниже пороховых зарядов, измерялись давление и температура до, в процессе и после работы пороховых генераторов. Развитие динамических процессов в пласте наблюдалось с помощью двух полей сейсмодатчиков, размещенных на поверхности вокруг оголовка скважины и вблизи эпицентра воздействия. Протекание волновых процессов в пласте наблюдалось в двух пьезометрических скважинах с помощью трехкомпонентных сейсмодатчиков и гидрофонов, размещенных в районе пласта. Интегральная эффективность воздействия проверялась с помощью метода фильтрационных волн давления до и после опыта и по контролю пластового давления. Более полно результаты представлены в [4]. Специалисты РФЯЦ – ВНИИТФ участвовали в определении состава и постановки измерительных методик, в текущем анализе результатов динамических измерений, как во время опыта, так и при последующей обработке. На них также легла ответственность за отработку технологии математического моделирования процессов, возникающих при работе пороховых генераторов давления. С помощью программного комплекса «СПРУТ» [5] были выполнены работы по математическому моделированию основных процессов. Некоторые результаты моделирования были представлены в [6]. В настоящее время продолжается работа по развитию моделей и кода.

Литература

1. Р. Х. Муслимов, Нефтеотдача: прошлое, настоящее, будущее (оптимизация добычи, максимизация КИН). – Казань: Изд-во «ФЭН» АН РТ, 2014. – 750 с.
2. В. М. Хусаинов, М. Ф. Шамсутдинов Волновые технологии избирательного воздействия и управление силами межфазного взаимодействия для извлечения запасов нефти // Научно-технический и производственный журнал «Нефтяное хозяйство», – 2012 – № 5 – С. 62–65.
3. А. Э. Манасян, Ю. С. Кузнецов, А. В. Хусаинов Промысловый опыт внедрения комплексной технологии увеличения текущей нефтедобычи // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море, – 2017 – № 4 – С. 34–38.
4. ООО АРМ–Сервис, РТ, Отчет о научно-исследовательской работе по теме: «Анализ данных по оценке масштаба по воздействию на нефтяной пласт на участке Ташлиарской площади Ромашкинского месторождения пороховыми

генераторами давления на единичных скважинах. Оценка возможности контроля за этим процессом имеющимся оборудованием // Азнакаев, 2017 – 154 с.

5. В. А. Быченков, В. В. Гаджиева. Метод «СПРУТ» расчета двумерных неустановившихся течений разрушаемых сред // ВАНТ, сер. «Методики и программы численного решения задач математической физики», в.2(2), 1978, с. 17–22.

6. А. В. Хусаинов, Н. С. Жилыева, Е. Е. Пигасов. О моделировании процессов при динамическом воздействии на пласт. Научная сессия НИЯУ МИФИ СФТИ, 19-22.12.2018, Снежинск, Тезисы докладов, с. 102.

STUDY OF DYNAMIC PROCESSES CAUSED BY POWDER CHARGE EXPLOSION IN THE VICINITY OF TERRIGENOUS DEPOSITS BEING AT THE LATER STAGE OF EXPLOITATION

V. G. Baydin¹, V. M. Krukov¹, A. S. Ivanov¹,
N. S. Zhilyaeva¹, Yu. V. Lapina¹, I. A. Litvinenko¹,
A. G. Neskin¹, O. E. Petrova¹, E. E. Pigasov¹,
V. A. Simonenko¹, V. P. Sokolov¹, T. V. Chapuriva¹,
A. V. Chernov¹, A. V. Husainov², V. M. Husainov²

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

²LLC “ARM-Service”, Moscow, Russia

When reservoir is at the later stage of exploitation, dynamic impact is introduced on the bottomhole zone with powder pressure generators [1]. LLC “ARM-Service” experts considered the expediency of selective action technology development, which would take into account inhomogeneity and specific features of geologic conditions including residual oil saturation characteristics, the properties of the crosshole space [2], [3]. They also developed technological examples when bottom-hole or distant zone is treated. In such cases the increase of reservoir and bottomhole pressures was observed (i.e. oil production rate) in the neighboring wells [3].

A field experiment was carried out in a single well exploited by LLC “ARM-Service” (08 Aug 2017 – 28 Sep 2017) in order to determine the impact of powder pressure generators application. During the experiment the sensor situated in the main well below the powder charges measured the pressure and temperature before the powder generators were operated, in the course of their operation, and after it. Dynamic processes evolution in the reservoir was monitored with the help of two fields of seismic sensors situated at the surface around the well head and near the epicenter. Wave processes evolution in the reservoir was monitored via two pressure-observation wells with three-piece seismic sensors and hydrophones, placed in the vicinity of the reservoir. The integral impact efficiency was monitored using the filtration pressure waves method before and after the experiment and by checking the reservoir pressure. More detailed results are given under the reference [4]. RFNC – VNIITF experts helped to choose the measurement techniques and the setup; they also took part in the analysis of the results of dynamic measurements both during the test itself and in

the course of postprocessing. They were also responsible for the development of the math model of the processes taking place when powder pressure generators are operated. The main processes were simulated with the use of SPRUT code [5]. Some simulation results were presented in the work [6]. At the moment the model and the code are further improved.

References

1. R. H. Muslimov Oil recovery: past, present, future (oil production optimization, oil recovery maximization) (in Russian). – Kazan: FEN Publishers TAS, 2014 - 750 p.
2. V. M. Husainov, M. F. Shamsutdinov Wave technologies of selective action and phase interaction management for oil production // Scientific and industrial magazine “Neftyanoe hozaystvo” – 2012 – #5 – p. 62–65.
3. A. E. Manasan, Yu. S. Kuznetsov, A. V. Husainov Experience of industrial implementation of enhanced oil production technologies // Construction of oil and gas wells offshore and on the land – 2017 – #4 – p. 34–38
4. LLC ARM-Service, the Republic of Tatarstan, Scientific report “Data analysis of the scale of impact on the oil reservoir at the Tashliyar field of the Romashkinskoe deposit using powder pressure generators at singular wells. Assessment of the control capabilities using the available facilities” // Азнакаев, 2017 – 154 p.
5. V. A. Bichenkov, V. V. Gadzhieva SPRUT method for calculation of 2-D nonsteady flows of the destructible media // VANT, “Methods and codes for numerical solution of the problems of math physics” v. 2(2), 1978, p. 17–22.
5. A. V. Husainov, N. S. Zhilyaeva, E. E. Pigasov Simulation of processes during the dynamic reservoir impact. Scientific conference in National Research Nuclear University MPhI SFTI 19–22 Dec 2018, Snezhinsk, Abstracts, p. 102.

1-29

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ МОДУЛЕЙ ДЕТЕКТИРУЮЩЕЙ СТАНЦИИ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Г. В. Ставрицкий

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

E-mail: ypah238@gmail.com

В докладе представлен ход работ по созданию системы контроля параметров детектирующей станции рентгенографического комплекса. Описаны принцип работы и архитектура детектирующей станции.

Раскрывается необходимость разработки, концепция и устройство составных частей системы контроля параметров модулей детектирующей станции. Описаны проблемы, возникшие в ходе создания системы контроля, и технические решения по их устранению. Показана работа по сборке модулей детектирующей станции с применением разработанной системы кон-

троля. Приведены результаты испытаний модулей на базе макета ускорителя.

В заключение доклада выносятся перспективы по развитию системы контроля.

THE DEVELOPMENT OF THE SYSTEM CONTROLLING THE PARAMETERS OF DETECTING SYSTEM MODULES FOR RADIOGRAPHIC COMPLEX

G. V. Stavrietsky

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

E-mail: ypah238@gmail.com

The presentation describes the course of activities on building the system to control the parameters of detecting station of radiographic complex. Work principles and architecture of detecting station are given.

During this work, it was learned that it is necessary to develop and build a device with components for the system, which will control the parameters of detecting station modules. The work also describes the problems that arose in the course of building the system and technical solutions for their elimination. The work on assembling the modules for detecting station is shown using the developed control system. The results of modules testing on the base of accelerator mock-up are given.

The conclusion is devoted to perspectives on the development of the control system.

1-30

ЛАЗЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШИТЕЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА НА КАМЕННЫЕ, ЛЕДЯНЫЕ И ЖЕЛЕЗНО-НИКЕЛЕВЫЕ АСТЕРОИДЫ

А. Ю. Аристова, И. А. Белов, Р. В. Гаранин,
В. А. Денисова, В. Н. Деркач, А. В. Золотовский,
А. А. Краюхин, Н. С. Мальцева, В. В. Мисько,
В. Г. Рогачёв, Ю. В. Скорочкин, А. Л. Стадник,
П. В. Стародубцев, В. Ю. Телегина, В. Ю. Хатункин

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

E-mail: PVStarodubtsev@vniief.ru

На лазерной установке «Луч» создан стенд [1] для проведения испытаний по разрушению мини-макетов астероидов под воздействием мощного импульсного лазерного излучения, имитирующего действие взрыва ядерного заряда на реальные космические объекты.

Проведены теоретические расчеты, в которых показано подобие газодинамических процессов, происходящих в реальном астероиде и имитирующем его мини-макете.

Разработаны технологические процессы создания образцов, идентичных натуральным астероидам

по химическому составу, микроструктуре, плотности и прочности на сжатие и растяжение. Из них были изготовлены различные мини-макеты каменных (хондриты) и ледяных астероидов.

Проведена серия экспериментов по облучению различных астероидоподобных мини-макетов. В ходе исследований варьировались форма, плотность, прочность, размеры и масса макетов [1]. Использовалось излучение на длине волны 527 нм с длительностью импульса от 2 до 4 нс и энергией от 100 до 600 Дж. Исследовалось влияние точки прицеливания и условий облучения на значения удельной энергии, необходимой для полного разрушения макетов [2]. В ряде экспериментов был смоделирован взрыв над поверхностью хондритного астероида. Получены предварительные результаты по разрушению железо-никелевых макетов.

Процесс разрушения фиксировался теневым способом в режиме девяти кадровой съемки и оптогетеродинным способом с регистрацией отраженного излучения от движущихся частиц [1].

Анализ результатов экспериментальных и расчетных исследований позволил предложить рекомендации по мощности и тактике применения ядерных зарядов в борьбе с опасными астероидами.

Литература

1. Аристова А. Ю., Аушев А. А., Баранов В. К. и др. Лазерное моделирование разрушительного воздействия ядерных взрывов на опасные астероиды // ЖЭТФ. – 2018. – т. 153, вып. 1. – С. 157–172.
2. Аристова А. Ю., Белов И. А., Кузин М. Г. и др. Исследование макетов разрушения каменных, ледяных и железных астероидов при воздействии на них мощного импульсного излучения // Сборник тезисов X семинара молодых ученых и специалистов госкорпорации «Росатом» и китайской академии инженерной физики (КАИФ). – Москва. – 2018. – С. 11.

LASER MODELING OF DESTRUCTIVE EFFECT OF NUCLEAR EXPLOSION ONTO STONE, ICY AND IRON-NICKEL ASTEROIDS

A. Yu. Aristova, I. A. Belov, R. V. Garanin,
V. A. Denisova, V. N. Derkach, A. V. Zolotovskiy,
A. A. Krayukhin, N. S. Maltseva, V. V. Misko,
V. G. Rogachev, Yu. V. Skorochkin, A. L. Stadnik,
P. V. Starodubtsev, V. Yu. Telegina, V. Yu. Khatunkin

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

E-mail: PVStarodubtsev@vniief.ru

A testbed for carrying out destruction tests of miniaturized models of asteroids by high-power pulse laser light which simulates action of a nuclear charge explosion onto real space objects was designed as a part of a “Luch” laser facility.

Theoretical calculations show similarity of gas-dynamic processes that occur in a real asteroid and a mini-model that simulates it.

Workflows for production of prototypes identical to natural asteroids in chemical composition, microstructure,

density as well as compression and tensile strength were developed. They were used to manufacture different mini-models of stone (chondrites) and icy asteroids.

Different asteroid-like mini-models were exposed to radiation in a series of tests. Geometry, density, strength, dimensions and mass of the models were varied in the course of studies. [1]. Test parameters used: radiation wavelength – 527 nm, pulse duration – 2–4 ns, energy – 100–600 J. Effect of the point of aim and irradiation conditions onto a value of specific energy needed for complete destruction of the models was studied. [2]. Explosion above the surface of a chondritic asteroid was modeled in a number of experiments. Preliminary results on destruction of iron-nickel models were obtained.

A process of destruction was recorded by a shadow method in the mode of nine-frame photography and by an optoheterodyne method with recording radiation back-scattered from moving particles [1].

Analytical treatment of experimental results and calculation data enabled to suggest recommendations related to the power and tactics of use of nuclear charges to combat hazardous asteroids.

References

1. A. Yu. Aristova, A. A. Aushev, V. K. Baranov et. al. Laser Modeling of Destructive Effect of Nuclear Explosions onto Hazardous Asteroids, JETP, 2018, Vol. 153, Issue 1, pp. 157–172.
2. A. Yu. Aristova, I. A. Belov, M. G. Kuzin et. al. Study of Models of Destruction of Stone, Icy and Iron Asteroids by High-Power Pulse Radiation. Report at the X Workshop of young scientists and specialists of the State Corporation “Rosatom” and the Chinese Academy of Engineering Physics (CAEP), Moscow, October 9–13, 2018.

1-31

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ С ЭНЕРГИЕЙ КВАНТОВ $E_\gamma < 1$ МэВ С МЕТАЛЛАМИ $Z = 26 \div 92$

В. Н. Смирнов, В. Е. Черемазов, М. Ю. Столбиков,
А. Н. Власов, В. А. Пашенцев

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

E-mail: michael.yu.snz@mail.ru

В исследованиях быстротекающих процессов рентгенография занимает особое место в силу своей наглядности и простоты интерпретации полученных результатов играет роль «арбитражного» метода, по которому можно утверждать о достоверности зарегистрированных эффектов. Результатом рентгенографирования являются данные, форме и границах исследуемого объекта, и основное – распределение плотности регистрируемого явления.

При использовании излучения с энергией квантов $E_\gamma > 4$ МэВ для рентгенографирования больших толщин металлов ослабление излучения в материале

осуществляется в соответствии с хорошо известной зависимостью $N/N_0 = f(ph)$, где h – толщина (см), ρ – плотность (г/см³), Z – атомный номер металла, N_0 и N – падающее и прошедшее γ – излучение. При этом основными механизмами взаимодействия излучения с веществом являются эффекты Комптон и образование электро-позитронных пар, для которых характерно $\mu \sim Z^2$.

Иная ситуация возникает при рентгеновской диагностике низкоплотных объектов типа пылевого облака с использованием излучения с энергией квантов $E_\gamma < 1$ МэВ. Материал пылевого облака и калибровочных металлических пленок – металл с $Z = 26 \div 92$. Для этой области энергии доминирующим процессом взаимодействия излучения с веществом является поглощение квантов электронами (фотоэффект), для которого характерно $\mu \sim Z^3 \div Z^5$. Наличие фотоэффекта для описания ослабления излучения в металлах и определения массовых коэффициентов ослабления потребовало учета не только массовой толщины рлоблака, но и номера атомов Z -металла. Расчетно-экспериментальные исследования взаимодействия нерассеянных квантов выявили, что массовые коэффициенты поглощения излучения в металлах с $Z = 26 \div 92$ можно выразить обобщенной зависимостью $\mu(E) = f(\mu_L/(Z^k \rho))$ (см²/г), а ослабление излучения в металлах описывается в обобщенном виде $N/N_0(Z^k \rho h)$, где $\mu(E)$ – массовый коэффициент ослабления излучения, $k > 0$ – безразмерный параметр.

Для диапазона энергий $E_\gamma = 0,01 \div 0,15$ МэВ универсальная зависимость имеет вид $N/N_0(Z^k \rho h)$, где $Z_1 < Z$. Величина Z_1 равна количеству электронов внешних оболочек, которые участвуют во взаимодействии с фотонами заданной энергии. В первую очередь такое уточнение касается металлов с большим количеством электронных оболочек.

В докладе представлены результаты экспериментально-расчетных исследований взаимодействия излучения с металлами плотностью $8 \div 20$ г/см³ $Z = 26 \div 92$, включая исследование ослабления излучения в металлах $N/N_0 = f(Z^k \rho h)$, зависимость « k » от энергии моноэнергетических квантов, определение массовых коэффициентов затухания (см²/г) в металлах $Z = 26 \div 92$.

THE FEATURES OF RADIATION ATTENUATION WITH QUANTA ENERGY $E_\gamma < 4$ MeV IN METALS WITH $Z = 26 \div 92$

V. N. Smirnov, V. E. Cheremazov, M. Yu. Stolbikov,
A. N. Vlasov, V. A. Pashentsev

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

E-mail: chael.yu.snz@mail.ru

X-ray radiography holds a specific place in the research of fast processes due to its visibility and simplicity in interpreting the results obtained and plays the role of so-called “referee method”, which allows to judge about the plausibility of the effects recorded. X-ray radiography allows to obtain data about the shape and boundaries of

the given object, as well as density distribution of the given phenomenon, which is the most important result of X-ray diagnostic.

When radiation with quanta energy $E_\gamma > 4$ MeV is used to radiograph thick metals, radiation attenuation in material takes place according to the well-known dependence, i.e. $N/N_0 = f(ph)$, where h is the thickness (cm), p is the density (g/cm^3), Z is the atomic number of a metal, and N_0 and N are the incident radiation and the radiation exposed to γ -radiation, correspondingly. The main mechanisms of radiation-matter interaction include the Compton effects and the formation of electron-positron couples characterized by $\mu \sim Z^2$.

Fairly different situation occurs, when radiation with quanta energy 4 MeV is used to radiograph thin metal films. For the given energy range, absorption of quanta by electrons (photoeffect) is the dominating process of interaction between radiation and matter characterized by $\mu \sim Z^3 \div Z^5$. The use of the photoeffect to describe radiation attenuation in metals and to determine attenuation mass-factors required to take into account not only the cloud mass thickness ph , but also the atomic numbers Z of a metal. Calculations and experimental studies of undissipated quanta interaction revealed that the mass-factors of radiation attenuation in metals with $Z = 26 \div 92$ can be expressed by a generalized dependence $\mu(E) = f(\mu_L/(Z^k \rho))$ (cm^2/g), and radiation attenuation in metals is described in a generalized form $N/N_0(Z^k \rho h)$, where $\mu(E)$ is the mass-factor of radiation attenuation, and $k > 0$ is the dimensionless parameter.

While describing radiation attenuation in metals for the energy range $E_\gamma < 0 \div 0.15$ MeV, it is essential to take into account the fact that radiation interacts not with the entire electronic cloud of an element, which is equivalent to the number of electrons Z on energetic shells but only with a part of the latter ones. In this case, when determining « k » one chooses the value $Z_{0 \div 0.15} < Z$ corresponding to the number of electrons, for which the energy of interacting quanta $E_\gamma < 0 \div 0.15$ MeV is sufficient to release these electrons from K-, L-, M-, N-, O-, P-, and 0-shells.

The presentation gives the computational and experimental results of the studies related to the interaction of radiation and metals of density $8 \div 20$ g/cm^3 and with $Z = 26 \div 92$, including the research into radiation attenuation in metals $N/N_0 = f(Z^k \rho h)$, dependence of « k » on monoenergetic quanta energy, and estimation of attenuation mass-factors (cm^2/g) in metals with $Z = 26 \div 92$.

1-32

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ
НЕУСТОЙЧИВОСТИ
РИХТМАЙЕРА–МЕШКОВА
НА КОНТАКТНЫХ ГРАНИЦАХ
РАЗНОПЛОТНЫХ ГАЗОВЫХ СРЕД
С ОДНОМОДОВЫМИ НАЧАЛЬНЫМИ
ВОЗМУЩЕНИЯМИ**

А. А. Тяктев, А. В. Павленко, Н. Б. Аникин,
Ю. А. Пискунов, И. Л. Бугаенко

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

E-mail: dep5@vniitf.ru

На вертикальной многофункциональной ударной трубе (МУТ) с внутренним сечением канала 138×138 мм^2 экспериментально исследовалось развитие неустойчивости Рихтмайера–Мешкова на контактных границах разноплотных газовых сред.

В первой части работы описаны эксперименты, направленные на исследование развития одномодовых 2D начальных возмущений границы раздела газовых сред, под действием неустойчивости Рихтмайера–Мешкова. Использовались газовые системы с начальным числом Атвуда 0,2 и 0,7. Контактная граница с одномодовыми возмущениями создавалась с использованием технологии жидких разделительных мембран. Отношение амплитуды к длине волны начальных возмущений $a/\lambda = 0,14$, число Маха ударной волны в экспериментах составляло $\sim 1,2$. Экспериментальные результаты сравнивались с моделью К. Микаэляна.

Вторая часть описывает предложенный и опробованный новый способ формирования границы раздела разноплотных газов в экспериментах по изучению гидродинамических неустойчивостей на ударных трубах в результате горения бедной водородо-воздушной смеси. Проведены первые эксперименты в двух однородных смесях водорода в воздухе: 6% и 16% по объему. В этом случае фронт пламени, образовывал 3D границу раздела разноплотных газов, по толщине не превышающей 1 мм. Концентрация водорода определяла перепад плотности на поверхности пламени, а также форму пламени. Представлены результаты по взаимодействию ударной волны с такими 3D возмущениями.

INVESTIGATION INTO THE DEVELOPMENT OF RICHTMYER-MESHKOV INSTABILITY AT CONTACT BOUNDARIES OF GAS MEDIA OF DIFFERENT DENSITIES WITH SINGLE MODE INITIAL PERTURBATIONS

A. A. Tyaktev, A. V. Pavlenko, N. B. Anikin,
Yu. A. Piskunov, I. L. Bugaenko

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia
E-mail: dep5@vniitf.ru

Richtmyer-Meshkov instability development at contact boundaries of gas media with different densities was experimentally investigated on vertical multi-functional shock tube with internal channel section $138 \times 138 \text{ mm}^2$.

The first part of work describes the experiments aimed at investigation of single mode 2D initial perturbations of gas media separation boundary under the impact of Richtmyer-Meshkov instability. Gas systems were used with initial Atwood number 0.2 and 0.7. Contact boundary with single mode perturbations was created using liquid separating diaphragms technology. The ratio of amplitude to wave length of initial perturbations makes $a/\lambda = 0.14$, Mach number of shock wave was ~ 1.2 . Experimental results were compared with K. Mikaelyan model.

The second part describes the proposed and tested new method to form the boundary of gases with different density within the experiments on studying hydrodynamic instabilities on shock tubes as the result of burning poor hydrogen-air mixture. The first experiments in two uniform mixtures of hydrogen in the air: 6% and 16% by volume were performed. In this case, the fire front formed 3D separating boundary of gases with different density, with the thickness not exceeding 1 mm. Hydrogen concentration determined the density drop on the fire surface, as well as the shape of fire. The work presents the results on shock wave interaction with such 3D perturbations.

1-33

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ ПРИ АБЛЯЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИШЕНИ В ЖИДКОСТЬ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

В. Б. Фокин*, П. Р. Левашов, М. Е. Поварницын

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: Vladimir.Fokin@phystech.edu

Наночастицы различных размеров и их коллоидные водные растворы можно получать, воздействуя фемтосекундным лазерным импульсом на мишень в водной среде. Для более эффективного их получе-

ния необходимо понимать механизмы, лежащие в основе лазерной абляции.

Для моделирования лазерной абляции используется континуально-атомистическая модель [1, 2], основанная на приближении [3], в которой для описания ионной подсистемы металла используется молекулярная динамика, тогда как электронная подсистема описывается путем решения уравнения сохранения энергии. Используемая модель точно воспроизводит все процессы на атомарном уровне, в том числе нуклеацию в метастабильной жидкой фазе и динамику формирования смеси жидкость–газ с учетом эффектов поверхностного натяжения.

Исследуются режимы формирования и разрушения отдельных наночастиц алюминия разного размера (5–100 нм) в воде под действием лазерного излучения различной интенсивности и частоты.

Литература

1. М. Е. Поварницын, В. В. Фокин, П. Р. Левашов // Appl. Surf. Sci. 2015. Vol. 357. P. 1150–1156.
2. М. Е. Поварницын, В. В. Фокин, П. Р. Левашов, Т. Е. Итина // Phys. Rev. B. 2015. Vol. 92. P. 174104.
3. Д. С. Иванов, Л. В. Жигилей // Phys. Rev. B. 2003. Vol. 68. P. 064114.

ANALYSIS OF NANOPARTICLES FORMATION BY ABLATION OF A METAL TARGET INTO LIQUID UNDER THE ACTION OF FEMTOSECOND LASER PULSES

V. B. Fokin*, P. R. Levashov, M. E. Povarnitsyn

Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

*E-mail: Vladimir.Fokin@phystech.edu

Nanoparticles of different sizes and water colloid mixtures of them can be produced as a result of femtosecond laser pulse action on a target in water surroundings. In order to generate the particles more effectively, it is necessary to understand the mechanisms underlying the laser ablation.

For simulation of the laser pulse a continuum-atomistic model [1, 2] based on approach [3] is used. In this model the molecular dynamics is used for description of the ionic subsystem of metal while the electronic subsystem is described by the energy conservation equation solving. The model which is used represents all processes on the atomic level accurately including the nucleation processes in the metastable liquid state and the dynamics of the formation of a liquid–gas mixture taking into account the effects of surface tension.

The regimes of formation and destruction of aluminum nanoparticles of different sizes (5–100 nm) in water under the action of laser radiation of various intensities and frequencies are investigated.

References

1. М. Е. Поварницын, В. В. Фокин, П. Р. Левашов // Appl. Surf. Sci. 2015. Vol. 357. P. 1150–1156.

2. M. E. Povarnitsyn, V. B. Fokin, P. R. Levashov, T. E. Itina // Phys. Rev. B. 2015. Vol. 92. P. 174104.
 3. D. S. Ivanov, L. V. Zhigilei // Phys. Rev. B. 2003. Vol. 68. P. 064114.

1-34

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО МОДИФИКАЦИИ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ МОЩНЫМИ КВ РАДИОВОЛНАМИ

В. Л. Фролов

Национальный исследовательский нижегородский
государственный университет им. Н. И. Лобачевского,
Нижегород, Россия
E-mail: frolov@nirfi.unn.ru

В докладе представлен обзор экспериментальных результатов по модификации плазмы верхней ионосферы Земли мощными КВ радиоволнами. Эксперименты выполнялись на нагревных стендах «ЗИМЁНКИ» и СУРА (НИРФИ, Н. Новгород), используя для нагрева плазмы вертикальные или почти вертикальные пучки мощных радиоволн обыкновенной поляризации с эффективной мощностью излучения до 280 МВт.

В докладе обсуждаются:

- 1) характеристики российских и зарубежных нагревных стендов;
- 2) типы возбуждаемых при нагреве плазмы неустойчивостей;
- 3) свойства искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ), развивающейся под воздействием этих неустойчивостей;
- 4) характеристики искусственных ионосферных неоднородностей, возбуждаемых в возмущенной области ионосферы в диапазоне масштабов от долей метра до десятков километров;
- 5) пространственная структура плазменных возмущений, эффект «магнитного зенита»;
- 6) особенности транспортных процессов при распространении плазменных возмущений вдоль силовых линий геомагнитного поля;
- 7) генерация плазменных возмущений на высотах внешней ионосферы при модификации плазмы на высотах F₂-области, формирование дактов с повышенной плотностью плазмы;
- 8) генерация перемещающихся ионосферных возмущений при периодическом нагреве ионосферной плазмы мощными радиоволнами;
- 9) возможности влияния нагрева ионосферы на ионосферно-магнитосферные связи.

В докладе на многочисленных примерах будет продемонстрировано, что, несмотря на достаточную пространственную локальность нагрева плазмы мощными радиоволнами, генерация плазменных возмущений наблюдается в существенно больших объемах, захватывая фактически все тело ионосферы от высот ее E-области (~100 км) до высот внешней ионосферы (1000 км и больше). При этом ИИТ спо-

собна оказывать сильное влияние на распространение радиоволн различных диапазонов и на работу систем радиосвязи и радионавигации.

EXPERIMENTAL RESULTS ON MODIFICATION OF THE EARTH IONOSPHERE BY HIGH-POWER SHORT WAVES

V. L. Frolov

Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod – National
Research University, Nizhni Novgorod, Russia
E-mail: frolov@nirfi.unn.ru

The presentation reviews the experimental results on plasma modification of the Earth upper ionosphere by high-power short waves. The experiments were conducted using “Zimyonki” and “Sura” heating test beds (Scientific Research Radio Physics Institute, Nizhni Novgorod), where plasma was heated by vertical or almost vertical beams of high-power radio waves having ordinary polarization and effective radiated power of 280 MW.

The presentation covers the following topics:

- 1) characteristics of Russian and foreign heating test beds;
- 2) types of instabilities induced during plasma heating;
- 3) properties of artificial ionospheric turbulence (AIT) induced by these instabilities;
- 4) characteristics of artificial ionospheric inhomogeneities induced in the perturbed region of the ionosphere within the range from fractions of a meter to dozens of kilometers;
- 5) spatial structure of plasma perturbations, the effect of “magnetic grain”;
- 6) peculiarities of transporting processes during propagation of plasma perturbations along the lines of geomagnetic field;
- 7) generation of plasma perturbations in the external ionosphere during plasma modification at the height of F₂ region, formation of ducts with high plasma density;
- 8) generation of moving ionospheric perturbations during regular heating of ionospheric plasma by high-power radio waves; and
- 9) possible influence of ionosphere heating on ionosphere and magnetosphere interrelation.

The presentation gives numerous examples to show that though plasma heating by high-power radio waves is spatially isolated, generation of plasma perturbations is characterized by substantially wider range covering almost all the ionosphere body starting from E-region (height of ~100 km) up to the upper ionosphere (1000 km and higher). Moreover, artificial ionospheric turbulence is able to exert a strong influence both on propagation of waves of different ranges and operation of radio communication and radio guidance systems.

1-35

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ СХОДЯЩИХСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЗРЫВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

А. Э. Хейфец¹, В. И. Зельдович¹, Н. Ю. Фролова¹,
И. В. Хомская¹, А. А. Дегтярев², Е. В. Шорохов²,
Е. Б. Смирнов², С. М. Долгих², А. В. Коваль²

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: kheifetz@imp.uran.ru

Исследованы структурные механизмы изменения формы и деформационное поведение медных и стальных цилиндрических оболочек различного размера при схождении под действием скользящей детонационной волны. Установлено, что устойчивость радиального схождения зависит не от относительных, а от абсолютных размеров оболочки; при этом схождение оболочек большого диаметра протекает более устойчиво. Установлено, что деформация на внутренней и внешней поверхностях исследованных оболочек осуществляется независимо. Нарушение устойчивости на внутренней поверхности имеет место, вне зависимости от условий эксперимента и свойств материала, в то время как нарушение устойчивости на внешней поверхности и вблизи нее могут иметь или не иметь место, в зависимости от свойств материала и размеров нагружаемой оболочки.

Нарушение устойчивости во внешних слоях оболочки осуществляется за счет формирования в образце характерной картины локализованной деформации, состоящей из однотипных упорядоченно расположенных структурных элементов, размер которых слабо зависит от свойств материала и условий эксперимента. В поперечном сечении структурный элемент локализованной деформации представляет собой треугольную область, очерченную полосами сдвига. В зависимости от свойств нагружаемого материала, полосы сдвига могут иметь разную ширину (в рассмотренных случаях, это тонкие ПАС в стали и широкие размытые течения в меди). Показано, что чем шире полосы сдвига, тем больше искажается форма треугольников, и тем больше становится изгибная составляющая деформации.

Показано, что при одинаковых размерах структурных элементов, чем меньше радиус оболочки, тем больше искажение ее формы при схождении. На основании этого факта предложен следующий феноменологический критерий устойчивого схождения: если отношение размера структурного элемента локализованной деформации к радиусу оболочки мало, то схождение устойчиво, а локализация деформации приводит лишь к малым возмущениям на поверхности; если это отношение достигает некоторого крити-

ческого значения, форма оболочки искажается, а радиальное схождение становится неустойчивым.

Работа выполнена в рамках темы «Структура» (№ АААА-А18-118020190116-6), при частичной поддержке Комплексной программы УрО РАН (проект 18-10-2-39).

DEFORMATION MECHANISMS OF STABILITY LOSS OF THE METAL CYLINDRICAL SHELLS, CONVERGING UNDER THE EXPLOSION ACTION

A. E. Kheyfets¹, V. I. Zel'dovich¹, N. Yu. Frolova¹,
I. V. Khomskaya¹, A. A. Degtyarev², E. V. Shorokhov²,
E. B. Smirnov², S. M. Dolgikh², A. V. Koval²

¹M. N. Miheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of
RAS, Ekaterinburg, Russia

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

E-mail: kheifetz@imp.uran.ru

The structural mechanisms of the shape change and deformation behavior of copper and steel cylindrical shells of various sizes when converging under the action of a sliding detonation wave are investigated. It has been established that the stability of the radial convergence depends not on the relative, but on the absolute dimensions of the shell; at the same time, the convergence of large-diameter shells proceeds more steadily. It is established that the deformation on the inner and outer surfaces of the investigated shells is carried out independently. A violation of stability on the inner surface takes place, regardless of the experimental conditions and material properties, while a violation of stability on the outer surface and near it may or may not occur, depending on the material properties and the dimensions of the loaded shell.

The violation of stability in the outer layers of the shell is due to the formation in the sample of a typical pattern of localized deformation consisting of similarly arranged structural elements of the same type, the size of which weakly depends on the properties of the material and the conditions of the experiment. In cross-section, the structural element of localized deformation is a triangular region outlined by shear bands. Depending on the properties of the loaded material, the shear bands can have different widths (in the cases considered, these are thin ASB in steel and wide diffuse flows in copper). It is shown that the wider the shear band, the more distorted the shape of the triangles, and the greater the bending component of the deformation.

It is shown that with the same sizes of the structural elements, the smaller the radius of the shell, the greater the distortion of its shape during convergence. Based on this fact, the following phenomenological criterion of stable convergence is proposed: if the ratio of the size of the structural element of localized deformation to the shell radius is small, then the convergence is stable, and the localization of deformation leads only to small perturbations on the surface; if this ratio reaches a certain critical value, the shape of the shell is distorted, and the radial convergence becomes unstable.

This work was supported by RAS theme «Structure» (№ АААА-А18-118020190116-6) and partially supported by projects of Presidium of RAS (project 18-10-2-39).

1-36

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ БАЗА
ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ
В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ
ПРОСТРАНСТВЕ**

А. Б. Буянов, С. В. Воеводин, В. С. Корчилов,
А. В. Лимонов, Р. В. Нечайкин, А. В. Перминов,
А. А. Тренкин, П. А. Цицилин

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

E-mail: trenkin@ntc.vniief.ru

Представлено описание лабораторного электрофизического стенда для моделирования электромагнитных процессов в околоземном космическом пространстве (ОКП). Основными компонентами стенда являются: вакуумная камера моделирования диаметром 1 м и длиной 7,5 м, система формирования квазистационарного осесимметричного магнитного поля индукцией до 0,3 Тл, система формирования фоновой плазмы, средства генерации волн и высокоэнергичных электронов, система автоматизированного управления и средства диагностики. Стенд способен обеспечить моделирование широкого спектра процессов в ОКП, включая генерацию и распространение низкочастотных волн в замагниченной плазме и процессы в областях захваченной радиации. Представлены результаты формирования в гелиевой среде при давлении $10^{-4} \dots 10^{-3}$ Тор столба замагниченной плазмы длиной 6 м и диаметром от 10 до 20 см с плотностью до 10^{12} см^{-3} , а также результаты экспериментальных исследований по генерации и распространению в нем магнитогидродинамических волн. Описаны постановка и результаты исследования движения пучка электронов с энергией 20 кэВ длительностью 200 нс в магнитной ловушке пробкотронного типа длиной 5,5 м.

**EXPERIMENTAL CAPABILITIES
FOR LABORATORY SIMULATION
OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES
IN NEAR-EARTH SPACE**

A. B. Buyanov, S. V. Voyevodin, V. S. Korchikov,
A. V. Limonov, P. V. Nechaykin, A. V. Perminov,
A. A. Tren'kin, P. A. Tsitsilin

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

The work describes the laboratory electrophysical test bed to simulate electromagnetic processes in near-earth space (NES). The main components of the test bed include simulation vacuum chamber 1 m in diameter and

7.5 m long, system producing quasi-steady axially symmetric magnetic field with the induction of 0.3 Tesla, background plasma formation system, wave and high-energy electron generators, automated control system, and diagnostics tools. The test bed allows simulating the wide range of processes occurring in NES including generation and propagation of low-frequency waves in magnetized plasma, and also processes in captured radiation regions. The work presents the results on formation of magnetized plasma column 6 m long and 10–20 cm in diameter having the density of up to 10^{12} cm^{-3} in the helium-containing medium at the pressure of $10^{-4} \dots 10^{-3}$ Torr as well as the experimental results on generation and propagation of magnetic hydrodynamic waves in this column. The work describes the experimental set and gives the results of the investigation into motion of electron beam with the energy of 20 keV and duration of 200 ns in magnetic mirror-type trap 5.5 m long.

1-37

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ
СИНУСОИДАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ
ПРИ НИЗКИХ (10^2 – 10^3) ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА**

О. Е. Шестаченко, А. В. Павленко,
Е. В. Свиридов, А. М. Андреев

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

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований начальной стадии эволюции синусоидальных возмущений контактной границы разноплотных газов, вызванных неустойчивостью Рэлея–Тэйлора при низких числах Рейнольдса. В качестве рабочих газов использовался воздух и элегаз (число Атвуда $A = 0,7$), разделенных жидкой мембраной синусоидальной формы (с различной амплитудой и длиной волны). В заданный момент разделительная мембрана разрушается внешней силой и на контактной границе газов начинается рост начальных возмущений. С помощью шлирен-метода и скоростного регистратора получены теневые изображения процесса перемешивания газов.

После обработки экспериментальных фотоизображений были получены временные зависимости координат проникновения тяжелого газа в легкий и легкого газа в тяжелый, скорости взаимного проникновения газов друг в друга, а также коэффициенты асимметрии развития зоны перемешивания.

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION
INTO THE EVOLUTION
OF SINUSOIDAL PERTURBATIONS
AT LOW REYNOLDS NUMBERS (10^2 – 10^3)**

A. V. Pavlenko, O. E. Shestachenko,
E. V. Sviridov, A. M. Andreev

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

The work presents the results of experimental investigation into the initial stage of the evolution of sinusoidal perturbations of contact boundary of gases with different densities that are caused by Rayleigh-Taylor instability at low Reynolds numbers. Air and electronegative gas were used as working media (Atwood number $A=0.7$). They were separated by liquid diaphragm of sinusoidal form (with different amplitude and wave length). At a specified moment, separating diaphragm is destructed by external force, and initial perturbations begin to grow at gas contact boundary. With the help of schlieren method and speed adjuster, shadow images for the process of gas mixing were obtained.

After experimental photo images processing, they got time dependences for the coordinates of heavy gas penetration into the light gas and light gas into the heavy one, velocities of mutual penetration of gases into one another, as well as asymmetry coefficients of mixing zone development.

1-38

**ИЗМЕРЕНИЯ УДЕЛЬНОГО
ИМПУЛЬСА ОТДАЧИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА
ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫЕ АСТЕРОИДЫ**

И. Н. Бурдонский^{1,2}, А. Г. Леонов¹,
К. Н. Макаров^{1,2}, В. Н. Юфа^{1,2}

¹Московский физико-технический институт, Москва,
Россия

²Государственный научный центр Российской Федерации
Троицкий институт инновационных и термоядерных
исследований, Троицк, Россия

E-mail: yufa_v@mail.ru

Потенциальная возможность столкновения с Землей космических тел размером в десятки и более метров представляет собой серьезную угрозу человечеству. В этой связи возникают сложные научно-технические проблемы организации эффективной защиты от массивных объектов (главным образом, астероидов), орбиты которых проходят в опасной близости от Земли [1]. Предлагаются различные подходы к решению этой задачи: разрушение ядерным взрывом, воздействие кинетическим ударником, гравитационная буксировка и т. д. Как показано в работах [2, 3], одним из наиболее эффективных средств воздействия является абляция поверхностных слоев астероидов под действием мощного лазерного излу-

чения. При этом испаренное вещество образует интенсивную реактивную струю, генерирующую импульс отдачи, отклоняющий объект от потенциально опасной траектории. Наиболее важным параметром, характеризующим эффективность абляции, является величина удельного импульса отдачи C_m , возникающего под действием мощного потока излучения. Для надежного прогнозирования результатов воздействия на астероиды и выработки сценария практических мер необходимо иметь достоверные данные, описывающие зависимости величины C_m от различных параметров (интенсивности облучения, характеристик вещества опасного объекта и т. д.), которые могут быть получены в модельных экспериментах.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных измерений величины C_m на лазерной установке «Сатурн», генерирующей лазерные импульсы с параметрами $E \sim 30$ Дж, $\tau = 30$ нс, $\lambda = 1,054$ мкм. Определена зависимость C_m от интенсивности излучения в диапазоне 10^9 – 10^{11} Вт/см² для искусственных хондритных микромишеней ($\rho \sim 2,2$ г/см³), имитирующих вещество наиболее распространенных астероидов, а также для железо-никелевых микромишеней ($\rho \sim 7$ – 8 г/см³), изготовленных из метеоритного вещества.

Литература

1. Шустов Б. М., Рыхлова Л. В. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра. Физматлит, 384 с., 2013 г.
2. Phipps, C. Can Lasers Play a Rôle in Planetary Defense., AIP Conference Proceedings 1278, 502-508 (2010).
3. Gibbings et al. On testing Laser ablation processes for asteroid deflection, 2011 IAA Planetary Defence Conference, Bucharest, Romania, 9–12th May (2011).

**MEASUREMENT OF THE SPECIFIC RECOIL
MOMENTUM TO SIMULATE THE EFFECTS
OF LASER RADIATION EXPOSURE
ON POTENTIALLY DANGEROUS ASTEROIDS**

I. N. Burdonsky^{1,2}, A. G. Leonov¹,
K. N. Makarov^{1,2}, V. N. Yufa^{1,2}

¹MIPT, Moscow, Russia

²JC SSC RF TRINITY, Troitsk, Russia

E-mail: yufa_v@mail.ru

The potential for collisions of cosmic bodies of tens of meters and more meters in size with Earth is a serious threat to humanity. In this regard, there are complex scientific and technical problems of organizing effective protection from massive objects (mainly asteroids), whose orbits pass dangerously close to the Earth [1]. Various approaches are proposed to solve this problem: destruction by a nuclear explosion, impact by a kinetic impactor, gravitational tugging, etc. As shown in [2, 3], one of the most effective means of action is the ablation of the surface layers of asteroids under the action of high-power laser radiation. In this case, the vaporized substance forms an intense jet, generating a recoil impulse, deflecting the object from a potentially dangerous trajectory. The most

important parameter characterizing the ablation efficiency is the value of the specific recoil momentum C_m , arising under the action of a powerful flux of radiation. To reliably predict the results of exposure to asteroids and develop practical action scenarios, it is necessary to have reliable data describing the dependences of C_m on various parameters (irradiation intensity, characteristics of the substance of a dangerous object, etc.) that can be obtained in model experiments.

This report presents the results of experimental measurements of the C_m value on a Saturn laser facility generating laser pulses with parameters $E_L \sim 30$ J, $\tau_L = 30$ ns, $\lambda = 1.054$ μm . The dependence of C_m on the radiation intensity in the range of 10^9 – 10^{11} W/cm² for artificial chondrite microtargets (~ 2.2 g/cm³), simulating the substance of the most common asteroids, as well as for iron-nickel microtargets (~ 7 – 8 g/cm³) made of meteoritic substance.

References

1. Shustov B.M., Rykhlova L.V. Asteroid-comet hazard: yesterday, today, tomorrow. Fizmatlit, 384 p., 2013.
2. Phipps, C. Can Lasers Play a Rôle in Planetary Defense., AIP Conference Proceedings 1278, 502–508 (2010).
3. Gibbings et al. On testing Laser ablation processes for asteroid deflection, 2011 IAA Planetary Defence Conference, Bucharest, Romania, 9–12th May (2011).

1-39

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОВЛИЯНИЯ ЗОНЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ И ЛОКАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА В ЗАДАЧЕ ГРАВИТАЦИОННОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

Ю. В. Янилкин

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия
E-mail: sinkova_og@mail.ru, vstatsenko@mail.ru,
n.yanilkina@mail.ru

Доклад посвящен численному моделированию развития отдельного локального возмущения в зоне турбулентного перемешивания при постоянном ускорении контактной границы между двумя разноплотными газами. С помощью прямого 3D численного моделирования по методике ЭГАК (без моделей турбулентности) проведено исследование поведения полусферического возмущения на контактной границе двух сред, одна из которых много тяжелее другой. Зона турбулентного перемешивания в задаче формируется вследствие фоновых возмущений контактной границы, заданных в начальный момент времени. Получены закономерности роста локальных возмущений контактной границы на фоне развития турбулентного перемешивания. Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с результатами соответствующих экспериментов Невмержицкого и др.

NUMERICAL STUDY OF TURBULENT MIXING ZONE INTERACTION WITH LOCAL PERTURBATIONS OF INTERFACE IN A PROBLEM OF GRAVITATION TURBULENT MIXING

Yu. V. Yanilkin

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Research Institute
of Experimental Physics, Sarov, Russia
E-mail: n.yanilkina@mail.ru

The presentation is devoted to numerical modeling of the development of a separate local perturbation in turbulent mixing zone at a constant acceleration of contact boundary between two gases with different density. With the help of direct 3D numerical modeling according to EGAK technique (without turbulence models), we performed investigation into the behavior of hemispheric perturbation on contact boundary of two media, one medium is much heavier than another. Turbulent mixing zone is formulated due to background perturbations of contact boundary that are specified at initial moment of time. We obtained regularities for the growth of local perturbation of contact boundary against the background of turbulent mixing development. The results of calculations are in good agreement with the results of corresponding experiments performed by Nevmerzhihsky et al.

1-40

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАЧАЛЬНОГО СПЕКТРА ВОЗМУЩЕНИЙ НА РАЗВИТИЕ ГРАВИТАЦИОННОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

О. Г. Синькова, В. П. Стаценко, Ю. В. Янилкин

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия
E-mail: sinkova_og@mail.ru, vstatsenko@mail.ru,
n.yanilkina@mail.ru

В докладе описаны постановка и результаты расчетов по методике ЭГАК развития зоны турбулентного перемешивания, вызванного неустойчивостью Рэлея-Тейлора, при различных вариациях начальных возмущений контактной границы. Возмущения задавались как детерминированно в виде суперпозиции фиксированных мод с различной длиной волны, так и случайным возмущением плотности в граничных ячейках. Зона перемешивания развивается на плоской в начальный момент времени контактной границе. Исследование проводилось с вариацией счетной сетки как для прямого 3D численного моделирования, так и для 2D моделирования. Проводится сравнение результатов 2D и 3D расчетов между собой по скорости роста ширины зоны перемешивания и по параметрам течения, характеризующим степень его турбулизации.

**NUMERICAL STUDY
OF PERTURBATION INITIAL SPECTRUM
INFLUENCE ON THE DEVELOPMENT
OF GRAVITATION TURBULENT MIXING**

O. G. Sinkova, V. P. Statsenko, Yu. V. Yanilkin

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

E-mail: sinkova_og@mail.ru, vstatsenko@mail.ru,
n.yanilkina@mail.ru

The work presents the set-up and the results of calculations according to EGAK technique for the development of turbulent mixing zone caused by Rayleigh-Taylor instability at various initial perturbations of contact boundary. Perturbations were specified both as deterministically in the form of superposition of fixed modes with various wave length, and by random perturbation of density in boundary cells. Mixing zone develops at flat contact boundary at initial moment of time. The study was performed with variation of calculation grid both for direct 3D numerical modeling, and for 2D modeling. The results of 2D and 3D calculations are compared in the terms of mixing zone width growth and flow parameters characterizing the degree of turbulization.

1-41

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛИГОННОЙ
УСТАНОВКИ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ЦЕНТРА
РФЯЦ – ВНИИТФ ВНИЦ (г. ИСТРА)
ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ НА СТОЙКОСТЬ
К ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИМПУЛЬСАМ
НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА**

Н. Н. Швец, Ю. А. Кузнецов,
В. С. Сысоев, Н. М. Лепехин

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
ВНИЦ 900, г. Истра, Россия

E-mail: Nikolay.Shvets@vniitf.ru

В связи с все более широким применением микропроцессорной техники в устройствах релейной защиты, устройств автоматики, телемеханики в современной электроэнергетике возросла ее уязвимость

при воздействии электромагнитного импульса наносекундного диапазона техногенного характера [1, 2]. Такие импульсы способны вывести из строя электроэнергетические объекты, что может привести к тяжелым последствиям вследствие нарушения снабжения электроэнергией важных промышленных и военных объектов.

Воздействие таких импульсов аналогично воздействию молниевых разрядов [2, 3]. Аналогичны и методы расчета результатов воздействия, но эти методы являются достаточно сложными и требуют больших вычислительных ресурсов. При этом адекватность таких расчетов требуют экспериментального подтверждения. Отсюда возрастает актуальность полигонных испытаний технических объектов на устойчивость к таким видам воздействующих импульсов. Создание испытательных установок, позволяющих проводить такие испытания, является достаточно сложной технической задачей и требует серьезных материальных затрат.

В модернизируемом в настоящее время Испытательном Центре РФЯЦ – ВНИИТФ ВНИЦ (г. Истра) имеется полигонная установка [1], которая позволяет проводить такого рода испытания. Отличительной особенностью этой установки, способной генерировать высоковольтные импульсы требуемых параметров (наносекундного диапазона) является возможность, благодаря наличию соответствующей инфраструктуры, проведения испытаний как отдельных аппаратных блоков, так и крупногабаритных электроэнергетических объектов в сборе и под нагрузкой.

В работе приводятся параметры испытательной установки Испытательного Центра ВНИЦ и описываются возможные виды и типы испытаний электротехнического оборудования на стойкость к воздействию к такому роду электромагнитных импульсов.

Литература

1. В. Н. Бондалетов, В. Г. Филиппов, А. Э. Леменчук и др. Высоковольтный научно-исследовательский центр Всероссийского электротехнического института им. В. И. Ленина, г. Истра. История науки и техники, № 9, 2011, с. 71–86.
2. В. И. Гуревич. Электромагнитный импульс высотного ядерного взрыва и защита электрооборудования от него. М., 2019, 516 с.
3. K. V. Klein, P. R., Barnes, H. V. Zininger. Electromagnetic impulse and electrical power network. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-104. № 6, June 1985.

Секция 2

**ВЗРЫВНЫЕ И ДЕТОНАЦИОННЫЕ
ЯВЛЕНИЯ**

Section 2

**EXPLOSION AND DETONATION
PHENOMENA**

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНИЦИИРОВАНИЯ ПЛАСТИЧНОГО ВВ НА ОСНОВЕ ТАТБ ПОСЛЕ УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ, СОЗДАННОГО ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ДЕТОНАТОРОМ ПЛАСТИЧНОГО ВВ НА ОСНОВЕ ГЕКСОГЕНА

Дуань Инлянь, Хань Юн, Лю Жуй,
Жань Цзянлун, Цзань Цзичао

Институт химических материалов, Китайская академия инженерной физики, Мянъян, Китай

Инициирование играет важную роль с точки зрения надежности и безопасности оружейных систем. Разработан метод для описания характеристик инициирования на базе оптических испытаний. Для дальнейшего изучения характеристик инициирования пластичного ВВ на основе ТАТБ после ударного воздействия, созданного промежуточным детонатором пластичного ВВ на основе гексогена, были подготовлены и проведены детонационные испытания, которые позволили зарегистрировать распространение детонационной волны с помощью высокоскоростной щелевой камеры. Было установлено, что заряд промежуточного детонатора оказывает важное влияние на распространение детонационной волны. Данный метод позволяет выполнить оценку надёжности передачи детонации.

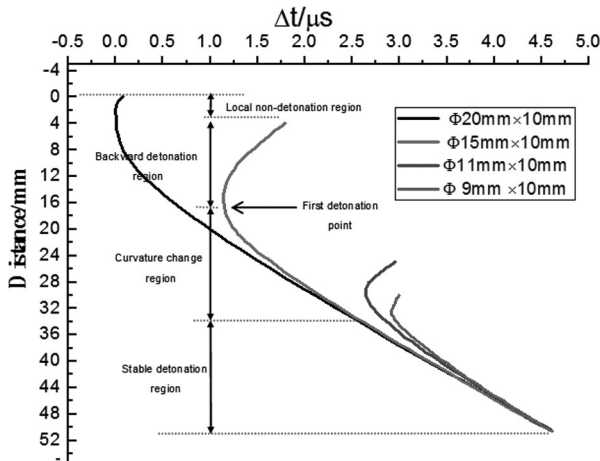


Рисунок 1. Распространение детонационной волны для промежуточных зарядов разного размера

INITIATION CHARACTERISTICS OF TATB-BASED PBX SHOCKED BY RDX-BASED PBX BOOSTER

Duan Yingliang, Han Yong, Liu Rui,
Ran Jianglong, Zan Jichao

Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, China

The initiation is important for the reliability and safety of weapon systems. The method to characterize the initiation based on optical test is developed. In order to further

study the initiation characteristics of TATB-based PBX shocked by RDX-based PBX booster, the detonating test was designed and carried out, obtaining the propagation of detonation wave by high speed scanning camera. It is concluded that the charge of booster plays an important role on the propagation of detonation wave. It is feasible to evaluate the reliability of detonation transmission by this method.

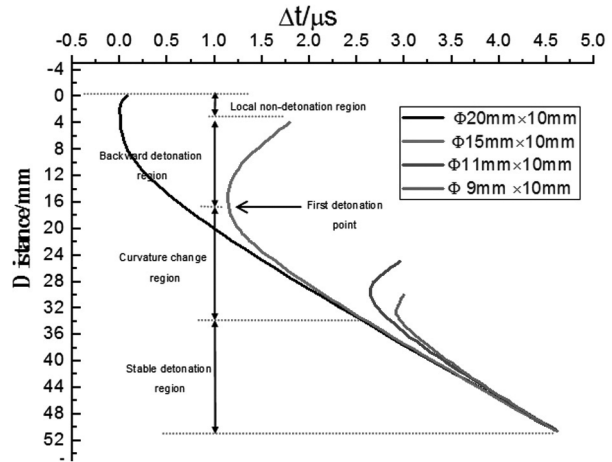


Figure 1 The propagation of detonation wave under different booster sizes

ПРОЦЕСС/ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕФЛАГРАЦИИ ВВ НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА И ВЛИЯНИЕ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛОВЫХ ВЗРЫВОВ

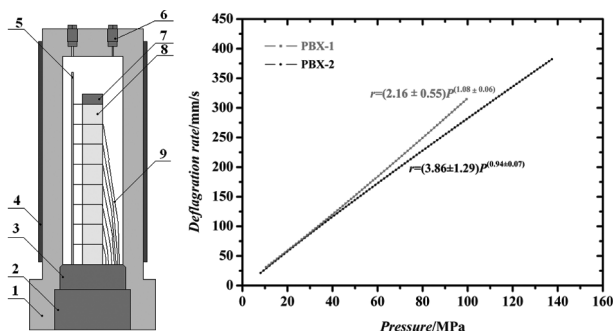
Яо Куйгуан, Дай Сяогань, Вэнь Вэнь, Сян Юн

Институт химических материалов, Китайская Академия Инженерной Физики (КАИФ), Мянъян, Сычуань, Китай

E-mail: yaokg@caep.cn

Выявление и интерпретация факторов, определяющих интенсивность теплового взрыва, представляют большой интерес в исследованиях энергетических материалов. Тенденция к росту интенсивности взрывной реакции в значительной степени зависит от процесса/характеристик дефлаграции. Мы определяем скорость горения в зависимости от давления, используя гибридную прутковую камеру, которая регистрирует данные о времени и давлении, а также о времени прибытия фронта горения. Полученные результаты свидетельствуют о том, что PBX-1 (95% октогена) и PBX-2 (87% октогена) имеют различные характеристики и выражаются с помощью уравнений скорости горения $r_1 = (2,16 \pm 0,55)p^{1,08 \pm 0,06}$ и $r_2 = (3,86 \pm 1,29)p^{0,94 \pm 0,07}$, соответственно. Экспонента давления PBX-1 $n_1 = 1,08 \pm 0,06 > 1$ показывает, что скорость горения чувствительна к давлению и в PBX-1 достаточно легко происходит реакция высокого уровня. Однако, экспонента давления PBX-2 $n_2 = 0,94 \pm 0,07 < 1$ показывает, что для PBX-2 необходимо более строгое условие, чтобы реакция в нем

хотя бы в некоторой степени соотносилась с уровнем реакции в PBX-1.

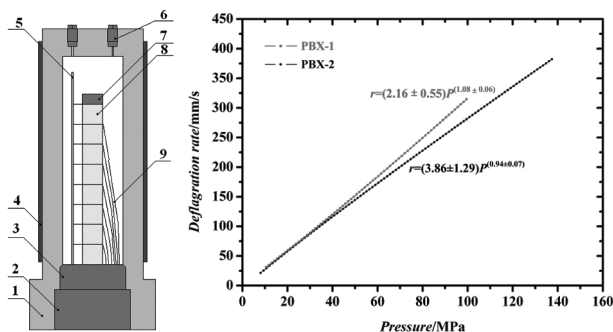


DEFLAGRATION BEHAVIOR OF HMX-BASED EXPLOSIVES AND EFFECTS ON THE VIOLENCE OF THERMAL EXPLOSIONS

Yao Kuiguang, Dai Xiaogan, Wen Wen and Xiang Yong

Institute of Chemical Materials, China Academy
of Engineering Physics (CAEP), Mianyang, Sichuan, China
E-mail: yaokg@caep.cn

Identifying and understanding the factors determining the violence of the thermal explosion is of great interest in energetic materials studies. The growing trend of explosive reaction in violence depends greatly on the deflagration Behavior. We measure the burn rate as a function of pressure with the hybrid strand burner, in which temporal pressure data and burn front time-of-arrival data were recorded. The results show that PBX-1 (95% HMX) and PBX-2 (87% HMX) have different burn characterization and is represented by the burn rate equation $r_1 = (2.16 \pm 0.55)p^{1.08 \pm 0.06}$ and $r_2 = (3.86 \pm 1.29)p^{0.94 \pm 0.07}$, respectively. The pressure exponent of PBX-1 $n_1 = 1.08 \pm 0.06 > 1$, which indicates that burn rate is sensitive to pressure and that PBX-1 can occur high level reaction easily. However, the pressure exponent of PBX-2 $n_2 = 0.94 \pm 0.07 < 1$, which demonstrates that PBX-2 needs more strict condition to happen some level reaction relatively to PBX-1.



2-3

РЕВИЗИЯ МЕХАНИЗМА ДЕТОНАЦИИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПО TARVER

В. Ф. Анисичкин

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

Согласно наиболее известным представлениям [1], углерод в свободном виде образуется на последних стадиях детонационного разложения углеродосодержащих ВВ.

Результаты наших экспериментов с различными по составу и мощности ВВ [2], при ударно волновом разложении инертных органических веществ [3], эксперименты с мечеными атомами углерода в составе ВВ [4], позволяют утверждать, что это не так. Углерод в алмазной и не алмазной фазах в случае мощных ВВ конденсируется на начальных стадиях детонационного разложения. На заключительных стадиях и в волне разрежения происходит частичное окисление углерода и перестройка углеродных структур.

Литература

1. Tarver C. M., Forbes J. W., Urtiew P. A. Nonequilibrium Zeldovich-Von Neumann-Doring Theory and Reactive Flow Modeling of Detonation // Russ. J. Phys. Chem. B. – 2007. – Vol. 1. – pp. 39–45.
2. Титов В. М., Анисичкин В. Ф., Мальков И. Ю. Исследование процесса синтеза ультрадисперсного алмаза в детонационных волнах // Физика горения и взрыва. – 1989. – Т. 25. – № 3. – С. 117–126.
3. Анисичкин В. Ф., Мальков И. Ю., Титов В. М. Синтез алмаза при динамическом нагружении органических веществ // Докл. АН СССР. – 1988. – Т. 303. – № 3. – С. 625–627.
4. Анисичкин В. Ф., Дерендяев Б. Г., Коптюг В. А., Мальков И. Ю., Салахутдинов Н. Ф., Титов В. М. Исследование процесса разложения в детонационной волне изотопным методом // Физика горения и взрыва. – 1988. – Т. 24. – № 3. – С. 121–122.

THE REVISION OF TARVER'S HIGH EXPLOSIVE DETONATION MECHANISM

V. F. Anisichkin

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

According to the most famous supposition [1], free carbon formed in the latter stages of detonation decomposition of carbon-containing HE.

The results of our experiments with different compositions of HE [2], investigation of the shock wave decomposition of inert organic substances [3], experiments with the labeled carbon atoms introduced in HE [4] suggest that this is not the case. Carbon in the diamond and non-diamond phases in case of powerful HE condenses in the

initial stages of detonation decomposition. In the final stages of detonation partial oxidation of carbon and the restructuring of the carbon structures occur.

References

1. Tarver, C. M., Forbes, J. W., and Urtiew, P. A. Nonequilibrium Zeldovich-Von Neumann-Doring Theory and Reactive Flow Modeling of Detonation // *Russ. J. Phys. Chem. B.* – 2007. – Vol. 1. – pp. 39–45.
2. Titov, V. M., Anisichkin, V. F., Mal'kov, I. Yu. The Study of Synthesis Process of Ultradispersed Diamond in Detonation Waves // *Fiz. Goren. Vzryva*, [Combust. Explos., Shock Waves]. – 1989. – Vol. 25. – pp. 117–126.
3. Anisichkin, V. F., Mal'kov, I. Yu., and Titov, V. M. Synthesis of Diamond with Dynamic Loading of Organic Substances // *Dokl. Akad. Nauk SSSR.* – 1988. – Vol. 303. – pp. 625–627.
4. Anisichkin, V. F., Derendyaev, B. G., Koptyug, V. A., Mal'kov, I. Yu., Salakhutdinov, N. F., Titov, V. M. Investigation of the Decomposition Process in a Detonation Wave by the Isotope Method // *Fiz. Goren. Vzryva*, [Combust. Explos., Shock Waves]. – 1988. – Vol. 24. – pp. 121–122.

2-4

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ВНЕДРЕМОЙ ЧАСТИ СТЕРЖНЯ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВВ К МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

И. А. Ахлюстин, К. М. Просвирнин,
К. М. Мирошкин, И. Э. Косолапов, Ю. А. Беленовский,
А. В. Сарафанников, О. В. Костицын

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

В докладе представлены результаты экспериментальных работ по исследованию чувствительности ВВ на основе октогена к механическим воздействиям с использованием методики внедрения стержня. Проведена калибровка нагружающего устройства при низкоскоростных механических воздействиях, определены границы его применимости. С использованием данного нагружающего устройства, в ходе экспериментов определены размеры видимых трещин на образцах ВВ, изменения геометрии ВВ в зоне удара после нагружения в зависимости от формы наконечника (конус 60°, полусфера) и диаметра (\varnothing 5, 10 и 20 мм) внедряемого стержня.

EFFECT OF THE ROD'S INTRUDED PART SHAPE ON THE HIGH EXPLOSIVE SENSITIVITY TO THE MECHANICAL ACTIONS

I. A. Akhlustin, K. M. Prosvirnin, K. M. Miroshkin,
I. E. Kosolapov, Yu. A. Belenovsky,
A. V. Sarafannikov, O. V. Kostitsyn

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

The paper presents results of the experimental work to study the sensitivity of HMX-based explosive to the mechanical actions with the help of the “rod intrusion” method. The loading device was calibrated under low-velocity mechanical actions. The loading device range of applicability was identified. During the experiment, this loading device was used to measure the visible cracks in the HE samples, to fix the changes of the HE geometry in the impact zone after loading as a function of the tip shape (60°-angle cone, hemisphere) and the diameter (\varnothing 5, 10, and 20 mm) of the intruded rod.

2-5

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. Я. Базотов, Н. А. Кирющенко,
Т. Н. Исхаков, Л. Х. Бадретдинова

Казанский национальный исследовательский
технологический университет, Казань, Россия

E-mail: na-makarova89@mail.ru

Традиционные средства инициирования, кроме высокой чувствительности к внешним воздействиям обладают существенным недостатком, заключающимся в содержании тяжелых металлов, которые при выполнении взрывных работ попадают в окружающую среду.

В последние годы ведутся исследования, направленные на замену традиционных индивидуальных взрывчатых веществ на ЭНМ с меньшей чувствительностью к внешним воздействиям. Препятствием на пути решения этой задачи является низкая восприимчивость ЭНМ к инициирующему импульсу. Одним из путей устранения этого препятствия является использование эффекта сенсбилизации ЭНМ до уровня инициирующих ВВ при электромеханическом воздействии, который был обнаружен при выполнении данных исследований. Практическое применение этого эффекта возможно благодаря использованию заряда ЭНМ в единой конструкции с пьезоэлементом, формирующем при механическом нагружении электрическое поле.

Выявлено, что повышение чувствительности ЭНМ к удару при испытаниях с пьезоэлементом не связано с тепловыми или ударно-волновыми процессами электрических разрядов. К увеличению чувствительности и взрывчатому превращению ЭНМ приводит воздействие электрического поля на процессы, результатом которых является взрыв. Применение явления сенсбилизации ЭНМ в электрическом поле пьезоэлемента позволило разработать опытный образец СИ, не содержащего первичное ВВ, действие которого основано на приложении электрического поля пьезоэлемента к ЭНМ по схеме слабозакороченного макродиполя.

ELECTROMECHANICAL INITIATION ENERGY SATURATED MATERIALS

V. Ya. Bazotov, N. A. Kiryushchenkova,
T. N. Iskhakov, L. Kh. Badretdinova

Kazan National Research Technological University, Kazan,
Russia

E-mail: na-makarova89@mail.ru

Traditional means of initiation, in addition to high sensitivity to external influences, have a significant drawback consisting in the content of heavy metals, which, when performing blasting operations, enter the environment.

In recent years, research has been conducted to replace traditional individual explosives with ENM with less sensitivity to external influences. The obstacles to solving this problem are the low susceptibility of the ENM to the initiating impulse. One of the ways to eliminate this obstacle is to use the effect of sensitization of the ENM to the level of initiating explosives under electromechanical action, which was discovered during the performance of these studies. The practical application of this effect is possible due to the use of the ENM charge in a single design with a piezoelectric element, which forms an electric field during mechanical loading.

It is revealed that the increase in the sensitivity of the ENM to impact during testing with a piezoelement is not associated with thermal or shock-wave processes of electrical discharges. An increase in the sensitivity and explosive transformation of an ENM is caused by the action of an electric field on the processes that result in an explosion. The use of the sensitization of ENM in the electric field of the piezoelectric element made it possible to develop a prototype SI that does not contain primary explosives, whose action is based on the application of the electric field of the piezoelectric element to the ENM according to the weakly shorted macro dipole.

ленные промежутки времени часть порошка отбиралась на анализ фазового состава, степени кристалличности и окисления.

Методом рентгеновской дифрактометрии в полученном порошке зарегистрировано присутствие кристаллической фазы магний-алюминий $Al_{12}Mg_{17}$.

Образцы порошка, полученные диспергированием до 60 минут, не подвергались процессу окисления. Дальнейшее диспергирование порошка приводило к его окислению кислородом воздуха с образованием фаз оксида алюминия и оксида магния.

STUDYING DISPERSION OF THE ALUMINIUM-MAGNESIUM-GRAPHENE ALLOY AND ANALYSIS OF PROPERTY CHANGES

A. R. Bakirov, A. V. Stankevich,
N. P. Taibinov, O. V. Kostitsyn

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

The paper presents results of experiments performed to study phase composition of the aluminum-magnesium-graphene alloy and dispersion effect on properties of the derived power.

The powder was dispersed in the ball mill with the milling time range from 1min to 540 min. In the course of the dispersion, a certain amount of the powder was taken at set time intervals to analyze the phase composition, as well as the crystallinity and oxidation degree.

In the derived powder, the X-ray diffraction method revealed the crystalline magnesium-aluminum phase ($Al_{12}Mg_{17}$).

Powders samples prepared through dispersion with the milling time up to 60 minutes turned out to be unoxidized. Further dispersion of the powder resulted in its air oxidation with the formation of the aluminum and magnesium oxide phases.

2-6

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИСПЕРГИРОВАНИЯ СПЛАВА АЛЮМИНИЙ-МАГНИЙ-ГРАФЕН И АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ СВОЙСТВ

А. Р. Бакиров, А. В. Станкевич,
Н. П. Тайбинов, О. В. Костицын

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

В докладе представлены результаты экспериментов по исследованию фазового состава сплава алюминий-магний-графен и влияния диспергирования на свойства полученного порошка.

Диспергирование порошка проводилось на шаровой мельнице, время размолта составляло от 1 мин. до 540 мин. В процессе диспергирования через опреде-

2-7

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СИНТЕЗА НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТАТБ

И. А. Баталова, Т. В. Антипова, А. Ю. Гармашев,
А. Н. Грецова, А. В. Еганова, О. В. Костицын,
Ф. А. Симаков, Н. П. Тайбинов, И. В. Чемагина

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

1,3,5-триамино-2,4,6-тринитробензол (ТАТБ) – мощное взрывчатое вещество, обладающее уникально низкой чувствительностью к механическим и ударно-волновым воздействиям и высокой термической стабильностью. В связи с этим наблюдается довольно большой интерес к данному соединению, как

компоненту малочувствительных смесевых ВВ повышенной стойкости к внешним воздействиям.

В России существует две внедренных в промышленное производство технологий получения ТАТБ: из трихлоранилина (ТХА) и флороглуцина (ФГ). В данном докладе приведены результаты исследования физико-химических характеристик ТАТБ, изготовленного в промышленных условиях двумя указанными способами. На образцах ТАТБ различной дисперсности было подтверждено влияние технологии синтеза на форму и размер кристаллов ТАТБ. При этом исследование физико-химических характеристик показало, что изменение технологических режимов синтеза может повлиять на термостойкость и количество примесей в ТАТБ.

EFFECT OF SYNTHESIS TECHNOLOGY ON PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF TATB

I. A. Batalova, T. A. Antipova, A. Yu. Garmashev,
A. N. Gretsova, A. V. Eganova, O. V. Kostitsyn,
F. A. Simakov, N. P. Taibinov, I. V. Chemagina

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

1,3,5-triamino-2,4,6-trinitrobenzol (TATB) is a powerful explosive characterized by high thermal stability and uniquely low sensitivity to mechanical and shock-wave impacts. Hence, there is a profound interest to this compound as a component of the low-sensitive mixed explosives having increased resistance to external stimuli.

Russia has two commercial technologies of TATB manufacture: from trichloraniline and from phloroglucine. The paper provides results of studying physical and chemical characteristics of TATB commercially produced by the above two methods. Investigation of different-dispersity TATB samples confirmed that the synthesis technology has an impact on the shape and size of TATB crystals. Study of physical and chemical characteristics also demonstrated that changes in the synthesis technology can affect thermal stability and amount of admixtures in TATB.

2-8

ДИНАМИКА УДАРНЫХ ВОЛН. ДЖ. УИЗЕМ – ШАГ ВПЕРЕД

А. Н. Богданов

НИИ механики МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва,
Россия

E-mail: bogdanov@imec.msu.ru

Приведены результаты аналитического подхода к исследованию задач динамики ударных волн в газовых средах – распространение ударной волны в среде с продольной и поперечной стратификацией температуры и плотности. Анализируются известные

и предлагаются оригинальные аналитические методы исследования.

Исследование динамики ударных волн в неоднородных средах проводилось ранее [1], однако только для частного случая сильных ударных волн, а примененный метод нахождения решения оставлял вопросы о справедливости полученных результатов. Имеющиеся автомодельные решения [1] отвечают частным случаям распространения ударной волны по среде с монотонным изменением плотности по степенному или экспоненциальному закону.

Автором доклада предлагается аналитических подход к получению решения задачи без ограничения на интенсивность ударной волны. Предлагаемый метод основан на интегрировании малых отклонений параметров процесса как откликов на малые изменения параметров среды перед фронтом волны.

Такой метод возможно применить к исследованию других задач динамики ударных волн, в частности, задачи о поршне [2], обтеканию контура (принципиально с непрямолинейными стенками) стационарным сверхзвуковым потоком [3] и т. д.

Работа выполнена в соответствии с планом исследований НИИ механики МГУ при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 16-29-01092-офи_м, 18-01-00793-а).

Литература

1. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. – М.: Мир, 1977.
2. Седов Л. И. Механика сплошной среды. Т. 1. – М.: Наука, 1976.
3. Мизес Р. Математическая теория течений сжимаемой жидкости. М.: ИЛ, 1961.

SHOCK-WAVE DYNAMICS. G. B. WHITHAM – A STEP BEYOND PREVIOUS EXPERIENCE

A. N. Bogdanov

Institute of Mechanics (Lomonosov Moscow State University)?
Moscow, Russia

The paper presents the results obtained with the analytical approach to studying the shock-wave dynamics problems in gaseous media - shock wave propagation in the longitudinal and transverse stratification of temperature and density. The author of this paper reviews the familiar analytical research methods and proposes some new ones.

The shock wave dynamics in inhomogeneous media was previously studied in [1], however, only for a particular case of intense shock waves. But the applied approach to attaining the solutions remained unclear with regard to validity of the obtained results. The available self-similar solutions [1] fit for the particular cases of the shock-wave propagation throughout the medium concurrent with monotonic density variation by power/exponential law.

The author proposes an analytical approach to attaining the solution with unconstrained shock-wave intensity. The proposed approach relies upon integration of minor variations in the process variables as response to minor changes in the medium ahead of the shock wave front.

This approach can be applied to studying other shock-wave dynamics problems, particularly, the piston problem [2], the circuit (principally with out-of-straight walls) flow over by a stationary supersonic flow [3], etc.

The work was carried out according to the Institute of Mechanics research plan with the partial financial support of Russian Foundation of Basic Research (projects 16-29-01092-ofi_m, 18-01-00793-a).

References

1. G. B. Whitham. *Linear and Nonlinear Waves*. M.: Mir, 1977. (in Russian).
2. L. I. Sedov. *Mechanics of Continuous Media*. V. 1 – M.: Nauka, 1976.
3. R. von Mises. *Mathematical Theory of Compressible Flow*. M.: Inostrannaya Literatura, 1961. (in Russian).

2-9

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН НЕСТАБИЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ С КАЛИБРОВАННЫМИ ОБЛИЦОВКАМИ

В. М. Фомин, Е. Я. Брагунцов

Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mail: fomin@itam.nsc.ru, braegor@yandex.ru

Пробивная способность кумулятивных зарядов зависит от многих причин, в том числе от геометрических параметров облицовки и точности ее изготовления. Для повышения точности в технологический процесс изготовления облицовок вводят операцию калибровки, которая заключается в обжатии облицовки в прецизионно изготовленном калибровочном штампе со степенью деформации металла облицовки порядка 1–3%. При калибровке устраняются такие «дефекты геометрии» облицовок как эллипсность, рупорообразность, разностенность, а также нелинейность профиля стенки облицовки. Кроме того, геометрические параметры облицовок становятся стабильными, т. е. одинаковыми для всех калиброванных облицовок. При соответствии облицовок требованиям чертежа известны частые и необъяснимые случаи снижения результатов испытаний и, как следствие, бракование партий изделий после испытаний.

Работа посвящена исследованию причин появления неустойчивости пробивного действия кумулятивных зарядов, связанных с калибровкой облицовок и разработке способов их устранения.

Показано, что причинами неустойчивости пробивного действия кумулятивных зарядов являются изменения, происходящие в облицовках при их калибровке.

В процессе калибровки формируется неоднородное несимметричное и нестабильное, т. е. неодинаковое от облицовки к облицовке, распределение свойств, причиной появления которого является неоднородная деформация отожженного металла в процессе калибровки, обусловленная отклонениями в пределах полей допусков размеров облицовок и отклонениями профилей калибруемых облицовок от профиля калибровочного инструмента. Установлено два механизма отрицательного влияния калибровки на пробивное действие кумулятивных зарядов. Один из них связан со снижением ресурса пластичности металлов из-за деформационного упрочнения, другой с формированием несимметричного распределения свойств металла. Отрицательное влияние несимметрии свойств сильнее влияние деформационного упрочнения.

Рассматриваются результаты применения оригинальных технологических подходов для устранения динамической неустойчивости, обеспечивающих формирование стабильной «геометрии» облицовок и симметричное распределение свойств материала.

Ключевые слова: облицовка, калибровка, кумулятивный заряд, пробивное действие, наклеп, деформационное упрочнение.

STUDYING CAUSES OF UNSTABLE ACTION OF CUMULATIVE CHARGES WITH CALIBRATED LINERS

V. M. Fomin, E. Ya. Braguntsov

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics
SB RAS, Novosibirsk, Russia
E-mail: fomin@itam.nsc.ru, braegor@yandex.ru

The penetration capability of cumulative charges depends on many factors, including geometrical parameters of the liner and its production accuracy. To improve the accuracy, a calibration operation is introduced into the liner process; the former consists in the liner compression in a precision-made sizing die with the 1–3% degree of liner metal deformation. Calibration eliminates such “geometry defects” of liners as ellipticity, horn shape, variation in wall thickness as well as nonlinearity of the liner wall profile. In addition, the geometrical parameters of liners become stable, i.e. the same for all calibrated liners. If liners meet the drawing requirements, there are frequent and unexplained cases of a decrease in the test results and, as a result, rejection of items after testing.

The work deals with causes of instability of cumulative charge penetration associated with the calibration of liners and development of ways to eliminate them.

It is shown that the causes of instability of the cumulative charge penetration are changes in liners during their calibration. In calibration, a non-uniform asymmetrical and unstable, i.e. not the same from liner to liner, distribution of properties is formed caused by heterogeneous deformation of annealed metal during the calibration process according to deviations within the liner tolerance limits and deviations of the profiles of calibrated liners from the sizing tool profile. Two mechanisms have been

established for the negative effect of calibration on the cumulative charge penetration. One of them is attributed to metal ductility loss due to mechanical hardening, another to the asymmetrical distribution of metal properties. The negative effect of asymmetry of properties is stronger than the effect of mechanical hardening.

The results of the application of original technological approaches to eliminate dynamic instability, ensuring a stable “geometry” of liners and symmetric distribution of material properties are considered.

Key words: liner, calibration, cumulative charge, penetration, hammering harden, mechanical hardening.

2-10

2,6-ДИАМИНО-3,5-ДИНИТРОПИРАЗИН-1-ОКСИД И НЕКОТОРЫЕ ЕГО СВОЙСТВА

А. А. Васильева, Д. В. Дашко, З. П. Лукичева,
В. С. Санников, О. Ф. Яковлева, С. М. Яковлев

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

E-mail: a_kazak83@bk.ru (А. А. Васильева)

Многочисленные исследования, проведенные в последнее время, выявили целый комплекс недостатков у известного малочувствительного энергоемкого соединения 1,3,5-триамино-2,4,6-тринитробензола (ТАТБ), которые могут ограничивать сферу его применения. Это и большой критический диаметр, и снижение и без того невысокой скорости детонации при низких температурах, и неполнота протекания процесса детонации и неустойчивое периферийное распространение детонации. В этой связи становится актуальным разработка и внедрение энергоемких компонентов, лишенных этих недостатков, но обладающих приемлемым уровнем чувствительности при сохранении высоких энергетических показателей. С учетом сказанного, 2,6-диамино-3,5-динитропирозин-1-оксид (LLM-105) [1] является перспективным энергоемким малочувствительным материалом, обладающим актуальными физическими свойствами и пониженной чувствительностью к внешним воздействиям. По ряду энергетических характеристик и термической стабильности он близок к ТАТБ и 1,1-диамино-2,2-динитроэтилену (апролу).

В условиях ФГУП «СКТБ «Технолог» на опытной установке был адаптирован метод синтеза LLM-105, методом кристаллизации из доступных растворителей были получены кристаллы различной дисперсности. Морфология полученных кристаллов изучалась оптической микроскопией, которая показала, что кристаллы имеют игольчатую форму.

Чувствительность к удару полученного продукта изучалась с использованием прибора BAM (копир Bundesanstalt для Materialprufung (BAM)/Federal Institute для Materials Research и Testing—Germany) с 5-ти килограммовым бойком и составляет 25 Дж (тогда как данный параметр для RDX – 5 Дж). Чувствительность к трению для полученного продукта со-

ставляет 3600 ± 200 кгс/см². Помимо этого показано, что в зависимости от морфологии кристаллов изменяется и термическая устойчивость LLM-105.

Для наработанного в условиях опытной установки ФГУП «СКТБ «Технолог» продукта LLM-105 исследованы энергетические и детонационные характеристики. Скорость детонации прессованных зарядов из LLM-105 определяли экспериментально методом ионизационных датчиков и рассчитывали также при помощи термодинамической программы с уравнением состояния Беккера–Кистяковского–Вильсона (БКВ). При плотности 1,893 г/см³ скорость детонации LLM-105, полученная экспериментально, составляет 8230 м/с, полученная расчетным путем – 8300 м/с.

Метательная способность, определенная по методу М 40 для ВС на основе LLM-105 сопоставима с метательной способностью аналогичного состава на основе апрола

Проведено сравнение модельного взрывчатого состава (ВС) на основе LLM-105 с 7,5% вес фторполимера с модельными ВС на основе других ВВ (октогена, ТАТБ и апрола) с аналогичным содержанием фторполимера. Полученные данные указывают на более низкую ударноволновую чувствительность LLM-105 по сравнению с апролом/ Данный вывод подтверждается и экспериментальными результатами определения УВЧ для других модельных ВС на основе АПРОЛа и LLM-105. Из полученных результатов следует, что ВС на основе LLM-105 оказываются менее чувствительны к ударной волне, чем ВС на основе апрола.

Литература

1. T. D. Tran, P. F. Pagoria, D. M. Hoffman, J. L. Cutting, R. S. Lee and R. L. Simpson Characterization of 2,6-diamino-3,5-dinitropyrazine-1-oxide (LLM-105) as an insensitive high explosive material Energetic Materials Center Lawrence Livermore National Laboratory, 7000 East Avenue, Livermore, CA 94550.

2,6-DIAMINO-3,5-DINITROPYRAZIN-1-OXID AND SOME PROPERTIES

A. A. Vasileva, D. V. Dashko, Z. P. Lukicheva,
V. S. Sannikov, O. F. Yakovleva, S. M. Yakovlev

FSUE «SKTB «Tekhnolog», Saint-Petersburg, Russia

E-mail: a_kazak83@bk.ru (A. Vasileva)

Numerous recent studies have revealed a whole range of deficiencies in the known low-sensitive, energy-intensive compound 1,3,5-triamino-2,4,6-trinitrobenzene (TATB), which may limit its scope. This is a large critical diameter, and a decrease in the already low detonation rate at low temperatures, and an incomplete course of the detonation process and unstable peripheral propagation of detonation. In this regard, the development and implementation of energy-intensive components, devoid of these shortcomings, but with an acceptable level of sensitivity while maintaining high energy indicators, becomes relevant. With that said, 2,6-diamino-3,5-dinitropyrazin-1-oxide (LLM-105) [1] is a promising energy-intensive

low-sensitive material, which has relevant physical properties and reduced sensitivity to external influences. For a number of energy characteristics and thermal stability, it is close to TATB and 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene (aprol).

Under the conditions of FSUE «SKTB «Technology» at the pilot plant, the LLM-105 synthesis method was adapted; crystals of different dispersion were obtained by crystallization from available solvents. The morphology of the obtained crystals was studied by optical microscopy, which showed that the crystals are needle-shaped.

The impact sensitivity of the resulting product was studied using a BAM instrument (Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) / Federal Institute for Materials Research and Testing — Germany) with a 5-kilo bold and is 25J (whereas this parameter for RDX is 5 J). Sensitivity to friction for the resulting product is 3600 ± 200 kgf/cm². In addition, it is shown that, depending on the morphology of the crystals, the thermal stability of the LLM-105 also changes.

For the LLM-105 product developed by the federal state unitary enterprise «SKTB «Technology», the energy and detonation characteristics were investigated. The detonation rate of pressed charges from LLM-105 was determined experimentally by the method of ionization sensors and was also calculated using a thermodynamic program with the equation of state of Becker–Kistyakovskiy–Wilson (BKV). At a density of 1.893 g/cm³, the detonation velocity LLM-105, obtained experimentally, is 8230 m/s, obtained by calculation – 8300 m/s.

The throwing ability determined by the M 40 method for aircraft based on LLM-105 is comparable to the throwing ability of a similar composition based on aprotol.

A comparison of the model explosive composition (BC) based on the LLM-105 with 7.5% by weight of fluoropolymer with model aircraft based on other explosives (HMX, TATB and aprotol) with the same content of fluoropolymer was carried out. The data obtained indicate a lower shock-wave sensitivity of the LLM-105 compared to aprotol / This conclusion is confirmed by the experimental results of the determination of UHF for other model aircraft based on aprotol and LLM-105. From the obtained results it follows that aircraft based on the LLM-105 are less sensitive to the shock wave than aircraft based on aprotol.

References

1. T. D. Tran, P. F. Pagoria, D. M. Hoffman, J. L. Cutting, R. S. Lee and R. L. Simpson Characterization of 2,6-diamino-3,5-dinitropyrazine-1-oxide (LLM-105) as an insensitive high explosive material Energetic Materials Center Lawrence Livermore National Laboratory, 7000 East Avenue, Livermore, CA 94550.

2-11

ИССЛЕДОВАНИЕ МОЩНОСТИ ВЗРЫВА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УЗЛОВ, СНАРЯЖЕННЫХ ПОРОШКАМИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ НЕ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Ю. А. Беленовский, Д. М. Гагаркин, И. Г. Галиуллин,
А. Ю. Гармашев, В. Н. Дунаев, О. В. Костицын,
А. В. Сарафанников, В. Н. Щербakov

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

Проведен поиск и подбор материалов, альтернативных алюминию, как наиболее энергетическому компоненту взрывчатых систем. Представлены результаты исследований мощности взрыва экспериментальных узлов, снаряженных порошками алюминия ASD-4, «нано» алюминия, гидрида алюминия, гидрида магния, гидрида титана, ортокарборана и борид алюминия.

Для повышения интенсивности сгорания порошков высокоэнергетических веществ рассмотрено действие сходящихся ударных волн.

Влияние наполнителя на мощность взрыва оценивалась на двух вариантах экспериментальных узлов по импульсу воздушной ударной волны. Выявлен наиболее реакционноспособный материал – гидрид алюминия.

INVESTIGATION INTO EXPLOSION YIELD OF EXPERIMENTAL ASSEMBLIES CHARGED WITH POW-DERS OF HIGH-ENERGY NON-EXPLOSIVE MATERIALS

Yu. A. Belenovsky, D. M. Gagarkin, I. G. Galiullin,
A. Yu. Garmashev, V. N. Dunayev, O. V. Kostitsyn,
A. V. Sarafannikov, V. N. Shcherbakov

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

The study focuses on search and selection of alternative materials to substitute aluminum as the most high-energy component of explosive systems. The results of investigation into explosion yield of experimental assemblies charged with powders of aluminum ASD-4, “nano” aluminum, aluminum hydride, magnesium hydride, titanium hydride, orthocarborane, and aluminum boride have been presented.

In order to increase the combustion intensity of high-energy powders, the effect of converging shock waves has been considered.

The influence of the filler on the explosion yield has been assessed by the air shock wave pulse in two variants of experimental assemblies. Aluminum hydride has been identified as the most reactive material.

2-12

**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ
РАСТВОРИТЕЛЕЙ НА ПОЛИМОРФНЫЙ
ПЕРЕХОД $\alpha \leftrightarrow \beta$ НТО**

Г. Д. Гарифуллина, В. Я. Базотов

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский
технологический университет», Казань, Россия

E-mail: gulfiya.1992@mail.ru

В настоящее время одним из наиболее перспективных малочувствительных взрывчатых веществ является нитротриазолон (НТО). Данное соединение обладает хорошими взрывчато – энергетическими характеристиками. Однако существует в 2-х кристаллических модификациях. α - и β -форма. α -форма представляет собой трехклинные кристаллы, отнесенные к объемной группе P1 и имеющие в объемной ячейке 8 молекул. β -форма – моноклинные кристаллы с 4 молекулами в ячейке – отнесена к объемной группе P2_{1/c}. Из литературных данных, а также большого количества работ проведенных на кафедре ТТХВ КНИТУ известно, что на полиморфный переход влияет природа растворителя и режим кристаллизации. В связи с чем, в данной работе представлены результаты исследования влияния различных органических растворителей на полиморфный переход НТО из одной модификации в другую. Для исследования был применен изотермический метод кристаллизации с использованием следующих растворителей: ацетон, смесь ДМФА – ацетон, этиловый спирт, смесь этиловый – спирт – метилен хлористый. Полученные перекристаллизованные образцы НТО были исследованы на современном методе ИК – Фурье спектрометре Nicolet iS5. Анализ полученных результатов показал, что перекристаллизованный НТО в ацетоне, этиловом спирте практически идентичны со спектрами исходного НТО, разница наблюдается лишь в интенсивности частот поглощения. В перекристаллизованных образцах НТО в смеси ДМФА – ацетон, в смеси этиловый спирт – метилен хлористый наблюдаются некоторые отличия в области 1657 см⁻¹ относящая карбонильной группе C = O, 1519 см⁻¹, 1440 см⁻¹, 1400 см⁻¹, 1384 см⁻¹, 1305 см⁻¹ соответствующие NO₂ группе; 1260 см⁻¹, 919 см⁻¹, 888 см⁻¹ соответствующие N-H группе. Таким образом, перекристаллизованные образцы НТО в ацетоне, этиловом спирте совпадают с данными, приведенными в статье [1] стабильной α -модификации. Вследствие чего мы можем предположить, что перекристаллизованные образцы в смеси ДМФА – ацетон, этиловый спирт – хлористый метилен относится к β -модификации, либо содержит в себе α - и β -модификацию в различных соотношениях.

Литература

1. Vibrational assignment of energetic material 5-nitro – 2.4 dihydro – 1.2.4 – triazole – 3 one (NTO) with Labeled Isomers / Reiko I, Hiyoshi, Yuji Kohno, and Nakamura / J. Phys. Chem. A 2004, 108, 5915–5920

**STUDY OF THE INFLUENCE OF ORGANIC
SOLVENTS ON THE POLYMORPHIC
TRANSITION $\alpha \leftrightarrow \beta$ NTO**

G. D. Garifullina, V. Y. Bazotov

FSBEI HE “Kazan national research technological university”,
Kazan, Russia

E-mail: gulfiya.1992@mail.ru

Currently, one of the most promising low-sensitive explosives is nitrotriazolone (NTO). This compound has good explosive-energy characteristics. However, there are 2 crystal modifications. α - and β -form. The α -form is a three-cline crystals, referred to the bulk group P1 and having 8 molecules in the bulk cell. β -form – monoclinic crystals with 4 molecules in the cell – is related to the volume group P2_{1/c}. From the literature data, as well as a large amount of work carried out at the department of TSCS KNITU, it is known that the nature of the solvent and the mode of crystallization affect the polymorphic transition. In this connection, this paper presents the results of the study of the effect of various organic solvents on the polymorphic transition from one modification to another. For research was used the method of isothermal crystallization using the following solvents: acetone, a mixture of DMF – acetone, ethyl hydroxide, a mixture of ethyl hydroxide – methylene chloride. The recrystallized samples of NTO were investigated using the modern method of IR – Fourier spectrometer Nicolet iS5. Analysis of the results showed that recrystallized NTO in acetone, ethyl hydroxide are almost identical with the spectra of the original NTO, the difference is observed only in the intensity of the absorption frequencies. In recrystallized samples of NTO in a mixture of DMFA-acetone, in a mixture of ethyl hydroxide – methylene chloride, there are some differences in the region of 1657 cm⁻¹ (C = O), 1519 cm⁻¹, 1440 cm⁻¹, 1400 cm⁻¹, 1384 cm⁻¹, 1305 cm⁻¹ corresponding to NO₂ group; 1260 cm⁻¹, 919 cm⁻¹, 888 cm⁻¹ corresponding to N-H group. Thus, recrystallized samples of NTO in acetone, ethyl hydroxide coincide with the data given in article [1] of stable α -modification. As a result, we can assume that recrystallized samples in a mixture of DMF – acetone, ethyl hydroxide – methylene chloride belongs to the β -modification, or contains the α - and β -modification in various ratios.

References

1. Vibrational assignment of energetic material 5-nitro – 2.4 dihydro – 1.2.4 – triazole – 3 one (NTO) with Labeled Isomers / Reiko I, Hiyoshi, Yuji Kohno, and Nakamura / J. Phys. Chem. A 2004, 108, 5915–5920

2-13

ВЛИЯНИЕ ВТОРИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НА ДЕТОНАЦИОННУЮ СПОСОБНОСТЬ ПРЕССОВАННОГО ВВ НА ОСНОВЕ ТАТБ

Д. К. Гильмутдинов, О. В. Костицын,
А. В. Сарафанников, Ю. А. Беленовский,
К. М. Просвирнин, К. М. Мирошкин,
И. А. Ахлюстин, И. Э. Косолапов

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

В работе исследовалось влияние процесса вторичной переработки прессованных образцов ВВ на основе ТАТБ на газодинамические характеристики, определяющие детонационную способность исследуемого ВВ. В ходе исследований экспериментально определялись следующие характеристики: скорость детонации, ударно-волновая чувствительность и критическая толщина детонации ВВ.

Проведен сравнительный анализ результатов, полученных на прессованных и повторно отпрессованных после вторичной переработки образцах исследуемого ВВ. Исследования показали, что вторичная переработка уменьшает детонационную способность повторно отпрессованных ВВ на основе ТАТБ.

THE INFLUENCE OF REPROCESSING ON DETONABILITY OF PRESSED TATB-BASED EXPLOSIVES

D. K. Gilmutdinov, O. V. Kostitsyn, A. V. Sarafannikov,
Yu. A. Belenovskiy, K. M. Prosvirnin, K. M. Miroshkin,
I. A. Akhlyustin, I. E. Kosolapov

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

The paper studies how the reprocessing of pressed TATB-based explosive samples influences their gas-dynamic characteristics that determine detonability of test explosive. During the experiment, such characteristics as detonation velocity, shock-wave sensitivity, and critical thickness of HE detonation were found.

Experimental data on pressed explosive samples was compared to that obtained for the samples repressed after test HE reprocessing. This comparative study reveals that reprocessing decreases detonability of the repressed TATB-based explosive.

2-14

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОВЫДЕРЖКИ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТАТБ

А. Н. Грецова, О. В. Костицын, Н. П. Тайбинов,
И. В. Чемагина, А. В. Станкевич, Д. В. Петров

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

В докладе представлены результаты исследования влияния термовыдержки при температуре 60°C в течение 27 суток на физико-химические характеристики ТАТБ.

Для исследованных образцов ТАТБ рассмотрено влияние термовыдержки на: кристаллическое состояние, размер и микроструктуру кристаллов, термическую стойкость, наличие примесей, плотность и удельную поверхность кристаллов.

В результате проведенных исследований для ТАТБ была отмечена тенденция уменьшения плотности кристаллов, сорбционной удельной поверхности после термовыдержки, а также выявлены незначительные изменения значений кристаллической плотности и размера кристаллитов.

EFFECT OF TEMPERATURE EXPOSURE ON PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF TATB

A. N. Gretsova, O. V. Kostitsyn, N. P. Taibinov,
I. V. Chemagina, A. V. Stankevich, D. V. Petrov

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

The paper considers the effect of holding at the 60°C temperature during 27 days on the physical and chemical characteristics of TATB.

TATB samples were investigated to determine how holding at heat can influence the crystalline state, the size and microstructure of crystals, thermal stability, presence of admixtures, as well as density and specific surface of crystals.

Study of TATB revealed the tendency of its crystal density and sorption specific surface to decrease after temperature exposure. Insignificant changes in the crystal density and size of crystallites were also revealed.

2-15

МЕТАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ КОМБИНИРОВАННЫХ РАЗРЫВНЫХ ЗАРЯДОВ, СОДЕРЖАЩИХ ДИСПЕРСНЫЕ МЕТАЛЛЫ В ТОНКОМ ПЕРИФЕРИЙНОМ СЛОЕ

В. Ю. Давыдов, А. С. Губин,
М. Н. Терещенко, А. Д. Боднарюк

Акционерное общество «Научно-Исследовательский
Машиностроительный Институт имени В. В. Бахирева»,
Москва, Россия

E-mail: vitadavidov@yandex.ru

В публикации [1] приведены результаты исследований, указывающих на догорание продуктов детонации в воздухе, существенно влияющее на метательную способность алюминизированных взрывчатых веществ (АВВ). В тоже время, в АВВ в приповерхностном слое, контактирующем с воздухом, находится меньшая часть добавки алюминия, а большая ее часть, находящаяся в удаленных от поверхности слоях заряда, может использоваться неэффективно. В этой связи представляют интерес коаксиальные комбинированные разрывные заряды (КРЗ), содержащие повышенное содержание металла в периферийном слое.

В настоящей работе методом рентгеноимпульсной съемки измеряли скорости взрывного метания трубок, изготовленных из стали 45 с внутренним диаметром 20,6 мм, толщиной 2 мм и длиной 80 мм. Трубки наполняли прессованными зарядами диаметром 20 мм из Окфола (плотностью 1,77 г/см³) и его смеси с 10% алюминия марки АСД-1 (плотностью 1,82 г/см³). Для исключения воздушного зазора заряды закрепляли на парафино-церезиновом сплаве.

Кроме того, проводили испытания трубок с покрытиями, содержащими порошки алюминия, титана и циркония, нанесенными на внутреннюю поверхность трубки. В качестве связующего вещества использовали поливинилбутиральный лак ПВБ-12. Масса покрытия (1,56–1,66 г) подбиралась таким образом, чтобы заполнить зазор между оболочкой и зарядом. Массовая доля порошков в покрытии составляла 90%. Таким образом, коаксиальный КРЗ имел толщину периферийного слоя 0,03 радиуса заряда. Испытания проводили с односторонним и двусторонним инициированием детонации, как в воздухе, так и в вакууме с остаточным давлением воздуха 0,05 атм.

Анализ результатов показал:

1. Добавки алюминия в составе разрывных зарядов сгорают как в результате реакции с продуктами детонации, так и с окружающим воздухом, в том числе, в разреженной атмосфере.

2. Эффект от добавки алюминия возрастает в 1,5 раза при двустороннем инициировании.

3. Эффект от нанесения металл-содержащих покрытий возрастает в ряду Al, Ti, Zr.

Литература

1. Давыдов В. Ю. // Труды XVII Международной конференции Харитоновские тематические научные чтения. Сборник докладов. РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2015. – С. 509–515.

ACCELERATION ABILITY OF COMBINED EXPLOSIVE CHARGES, CONTAINING DISPERSED METALS IN THIN PERIPHERAL LAYER

V. Y. Davydov, A. S. Goubin, M. N. Tereshenko

Bakhyrev Research Institute of Mechanical Engineering,
Moscow, Russia

E-mail: vitadavidov@yandex.ru

It was revealed [1] that detonation products could burn in the ambient air so this can significantly affect the acceleration ability of Al-containing explosives (Al-HE). At peripheral layer of Al-HE charges

At the same time, in the Al-HE in the near-surface layer in contact with the air, there is a smaller part of the aluminum additive, and most of it, located in remote from the surface layers of the charge, can be used ineffectively. Therefore, coaxial combined explosive charges containing a high content of metal in the peripheral layer are of interest.

The accelerations ability of tubes, having internal diameter 20,6 mm, length 80 mm and 2 mm thick and plates, having 20 mm diameter and 2 mm thick, made of steel 45 were measured by flash x-ray radiography. For the experiments have been used the cylindrical charges made of phlegmatized HMX (HMX) and mixtures thereof with 10% aluminum ASD-1 powder (HMXA-10).

Also it have been tested steel tubes with coating (contained Al, Ti or Zr powders) applied to the inner surface of the tubes. The polyvinyl butyral was used as a binder. Mass of the coating was about 1,56–1,66 g. The proportion of metal powder in the coating was 90%. Thus it was coaxial combined HE charges with thin peripheral layer (thickness is 0,3 mm). The tests were carried out with one-way and two-way initiation of detonation, both in air and in vacuum.

Analysis of the research results showed the following:

1. Aluminum in the composition of explosive charges burn as a result of reaction with the products of detonation, and with the surrounding air, as well as in vacuum.

2. In the case of two-way initiation of detonation, the effect of aluminum increases by 1.5 times.

3. The effect of the application of metal-containing coatings increases in a number of Al, Ti, Zr.

References

1. Davydov V.Y. Acceleration ability of explosives with secondary energy release in different gas-dynamic conditions // Proceedings of XVII Khariton's Topical Scientific Readings, Sarov, 2015. – P. 509–515.

2-16

МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОРОШКА АСД-4 ПЕНТОКСИДОМ ВАНАДИЯ

В. Г. Шевченко¹, Д. А. Еселевич¹, Н. А. Попов¹,
Д. К. Кузнецов², В. Я. Шур²

¹Институт химии твердого тела УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

²Институт естественных наук и математики УрФУ,
Екатеринбург, Россия

E-mail: shevchenko@ihim.uran.ru

Порошки алюминия относятся к классу функциональных материалов большой промышленной важности. Обладая высоким уровнем энергоемкости, широко используются в энергетических конденсированных системах различного назначения. Пропитка гидрогелем $V_2O_5 \cdot nH_2O$ поверхности частиц порошка Al значительно повысила его реакционные свойства. Методами эллипсометрии и РЭМ показано, что у модифицированных образцов высоко развитый рельеф, с хорошей адгезией, обусловленной химической связью модификатора с поверхностью алюминиевых частиц за счет интеркаляции ионов Al в структуру ксерогеля.

SURFACE MORPHOLOGY OF THE MODIFIED POWDER ASD-4 BY VANADIUM PENTOXIDE

V. G. Shevchenko¹, D. A. Eselevich¹, N. A. Popov¹,
D. K. Kuznetsov², V. Ya. Shur²

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

²Institute of Natural Sciences and Mathematics UFU,
Ekaterinburg, Russia

E-mail: shevchenko@ihim.uran.ru

Aluminum powders belong to the class of functional materials of great industrial importance. Possessing a high level of energy intensity, they are widely used in energy condensed systems for various purposes. The impregnation of $V_2O_5 \cdot nH_2O$ hydrogel with the surface of Al powder particles significantly improved its reaction properties. Using ellipsometry and SEM, it has been shown that the modified samples have a highly developed relief, with good adhesion, due to the chemical bond of the modifier with the surface of aluminum particles due to intercalation of Al ions into the xerogel structure.

2-17

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НАНОСТРУКТУР

Ю. М. Жуков

ООО ТЕСКАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: zym@tescan.ru

Важной задачей исследования свойств современных материалов является исследование поверхности. Поверхность играет важную роль при создании материалов, обладающих уникальными электрическими, термическими, каталитическими, магнитными и многими другими свойствами. Методы электронной спектроскопии являются одними из основных методов исследования физических свойств поверхности, которые позволяют исследовать электронные свойства поверхностей твердых тел и сформированных на них низкоразмерных систем.

SPECTROSCOPIC METHODS FOR STUDYING SURFACES OF NANOSTRUCTURES

Yu. M. Zhukov

TESCAN LLC, St. Petersburg, Russia

E-mail: zym@tescan.ru

An important task of studying the properties of modern materials is the study of the surface. The surface plays an important role in creating materials with unique electrical, thermal, catalytic, magnetic, and many other properties. Electron spectroscopy methods are among the main methods for studying the physical properties of a surface, which make it possible to investigate the electronic properties of solid surfaces and low-dimensional systems formed on them.

2-18

РОЛЬ ФОТОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЛАЗЕРНОМ ИНИЦИИРОВАНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

А. С. Зверев¹, А. Ю. Митрофанов¹,
Р. В. Цышевский², М. М. Куля²

¹Институт фундаментальных наук, Кемеровский
государственный университет, Кемерово, Россия

²Университет штата Мэриленд, Колледж Парк, США

E-mail: anthon.zverev@yandex.ru

Лазерное инициирование энергонасыщенных материалов представляет большой интерес как с фундаментальной точки зрения, так и для прикладных исследований, особенно направленных на повышение безопасности применения энергетических материалов и устройств с их содержанием. Разработка энергетических материалов, устойчивых к удару и нагреву, но чувствительных к лазерному излучению, является основной целью данного направления исследований. Наиболее распространенным способом повышения чувствительности энергетического материала к лазерному излучению является введение непрозрачных частиц, которые нагреваются или взрываются (аблируют) под воздействием лазерного излучения. Однако при таком подходе конечным инициирующим фактором все еще остается ударная волна или нагрев.

Таким образом, эффективность этого метода уменьшается с уменьшением термической и ударной чувствительности энергетического материала.

В настоящей работе предлагаются и обсуждаются подходы сенсibilизации энергетических материалов к лазерному излучению путем введения фотокаталитических добавок. Проведено комплексное экспериментальное и теоретическое исследование, включающее в себя квантовохимическое моделирование, спектроскопическое исследование и лазерное инициирование изучаемых композитов. Показано что, взаимодействие добавки с энергетическим материалом под действием лазерного излучения резко снижает потенциальные барьеры начальных стадий реакции взрывного разложения. В качестве добавки-фотокатализатора рассмотрены оксиды металлов. Основой фотокаталитического процесса является перенос заряда на границе раздела фаз оксид металла – адсорбированный энергетический материал, приводящий к образованию метастабильного иона энергетического материала. Экзотермическая реакция разложения метастабильного промежуточного продукта запускает процесс взрывного инициирования вблизи фотокатализатора. Зарегистрированы спектры оптического поглощения и пороги лазерного инициирования композитов PETN-MgO и PETN-ZnO. Взаимодействие между поверхностью оксида и молекулами энергетического материала приводит к образованию комплекса, отличного по структуре электронных уровней от исходных материалов, о чем свидетельствует наличие новых полос в спектре поглощения композита, которые нельзя объяснить поглощением отдельных компонентов. Оптические переходы композитов хорошо согласуются с энергетическими переходами, рассчитанными квантово-химическими методами. Зарегистрировано заметное снижение порогов лазерного инициирования композитов при воздействии второй и третьей гармоники YAG:Nd-лазера.

THE ROLE OF PHOTOCHEMICAL PROCESSES IN ENERGETIC MATERIALS LASER INITIATION

A. S. Zverev¹, A. Y. Mitrofanov¹,
R. V. Tsyshkevsky², M. M. Kuklja²

¹Institute of Basic Sciences, Kemerovo State University,
Kemerovo, Russia

²Department of Materials Science and Engineering, University
of Maryland, College Park, USA

E-mail: anthon.zverev@yandex.ru

Laser initiation of high energy density materials provides exciting new opportunities in fundamental science and applied technology for various applications, especially those relevant to improving safety of producing and using high explosive materials and devices. The development of energetic materials (EM) resistant to shock and heat but sensitive to laser radiation is a main goal of this research. The most common way to increase the sensitivity of the energetic material to laser radiation is

the introduction of opaque particles, which are heated or exploded (ablated) under the laser radiation. However, with this approach, the final initiating stimulus is still impact or heating. Thereby effectiveness of this technique decreases with decreasing of an energetic material sensitivity.

We propose and discuss approaches of the energetic materials sensitization to laser radiation by introducing photocatalytic additives. The interactions of the additive with the energetic material under the laser radiation dramatically decreases the potential barriers of the explosion reaction initial stages. We investigated the initiation of chemistry theoretically and experimentally by means of DFT calculations, UV-VIS-NIR spectroscopy and laser initiation tests.

Photocatalysts are metal oxides. Basis of photocatalytic process is a charge transfer at the interface between the metal oxide and energetic material leading to the formation of the metastable energetic ion. The exothermic decomposition reaction of a metastable intermediate drives an explosive initiation, similarly to the mechanism described above.

Optical absorption spectra and laser initiation thresholds of PETN-MgO and PETN-ZnO composites were determined. The interactions between the oxide surface and EM molecules lead to a charge transfer on the interface, which is indicated by the presence of new bands in the composite absorption spectrum that cannot be explained by the absorption of individual components. The optical transitions of composites are in good agreement with the energy gaps calculated by quantum chemical methods. Perceptible decreasing of laser initiation thresholds of composites by second and third YAG:Nd-laser harmonics were registered.

2-19

ПРИРОДА РОСТА ЭНТРОПИИ В УДАРНЫХ И ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛНАХ

М. Я. Иванов, В. К. Мамаев, В. Л. Семенов

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

Выполнен углубленный анализ связи природы роста энтропии и потерь полного давления в ударных и детонационных волнах. В первой части работы рассмотрен важный вопрос возрастания энтропии в изолированных аэрофизических процессах. Отметим в этой связи тот факт, что данный вопрос не нашел к настоящему времени своего решения. В 5-м томе известного десятилетнего курса теоретической физики Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица в § 8 (стр. 48) читаем: «Вопрос о физических основаниях монотонного возрастания энтропии остается, таким образом, открытым. Не имеет ли его происхождение космологической природы и не связано ли оно с общей проблемой начальных условий в космологии?» [1]. Российский патриарх теоретической физики В. Л. Гинзбург

проблему возрастания энтропии вообще относит к первой среди «великих» нерешенных проблем физики. В ведущем отечественном журнале «Успехи Физических Наук» (т. 169, стр. 435), говоря о трех «великих» нерешенных проблемах, он пишет: «Во-первых, речь идет о возрастании энтропии, необратимости и “стреле времени”. Во-вторых, эта проблема интерпретации и понимания квантовой механики. И, в-третьих, это вопрос о связи физики с биологией и, конкретно, проблема редукционизма» [2]. В настоящей работе мы постараемся дать достаточно полный ответ на сформулированный принципиальный вопрос. При рассмотрении этого вопроса важным является выбор основных законов, описывающих динамику движения среды. Нами в качестве основы к описанию среды выбран традиционный феноменологический подход термодинамики и газовой динамики с использованием законов сохранения массы, импульса и энергии. Особо рассмотрен вопрос роста энтропии в детонационных волнах.

Во второй части работы представлена регистрация излучения ударных волн в лабораторных условиях. Для теоретического объяснения наблюдаемых явлений свечения скачков уплотнения в опубликованных ранее работах были привлечены гипотезы неравновесной релаксации во фронте ударной волны [3], либо вторичные экзотермические процессы рекомбинации продуктов распада исходных молекул [4]. Нами с помощью специальных экспериментов показано, что видимое глазом свечение ударных волн и свечение самой струи возникает при достижении достаточно высоких значений температуры торможения газового потока – свыше 1000 К и это свечение может соответствовать традиционному равновесному сплошному спектру теплового излучения (спектру излучения абсолютно черного тела).

Эксперимент выполнялся на высокотемпературном стенде ЦИАМ в диапазоне температур 500–2500 К и при давлениях в несколько атмосфер. Высокотемпературная сверхзвуковая нерасчетная струя с числом Маха на срезе сопла $M_0 = 1,3$ распространялась в затопленном внешнем пространстве с обычным атмосферным давлением. При температурах торможения потока ниже 1000 К свечение скачков в струе и самой струи не наблюдается. При температурах торможения порядка 2000 К появляются светящиеся скачки и в видимом диапазоне хорошо регистрируются границы горячей излучающей сверхзвуковой струи (а также присутствующие в ней диски Маха. При этом регистрируется обычный спектр равновесного теплового излучения, отвечающий окрестности видимого диапазона излучения при температурах порядка 2000 К.

Литература

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика // Том V. – Статистическая физика. – Часть 1. – М.: Наука. 1976. – 584 с.
2. Гинзбург В. Л. Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными // УФН. – 1999. – том 169, № 4, с. 419–441.

3. Зельдович Я. Б., Генич А. П., Манелис Г. Б. Особенности поступательной релаксации во фронте ударной волны в газовых смесях // ДАН. – 1979. – Т. 248, № 2, с. 349–351.

4. Дракон А. В., Еремин А. В., Куликов С. В., Фортон В. Е. О природе неравновесных явлений во фронте ударной волны // ДАН. – 2010. – Т. 432, № 3, с. 326–328.

THE NATURE OF ENTROPY INCREASE IN SHOCK WAVES

M. Ja. Ivanov, V. K. Mamaev, V. L. Semenov

Baranov Central Institute of Aviation Motor Development
(CIAM), Moscow, Russia

The work presents a thorough analysis of the relationship between the entropy increase and the total pressure losses in shock and detonation waves. The first part of the work addresses an important question of the entropy increase in isolated aerophysical processes. In this regard, we note that this problem has not been solved yet. Paragraph 8 (p.48) in Volume 5 of the famous 10-volume series “The Course of Theoretical Physics” by L. D. Landau and E. M. Lifshits says: “The question of the principal physics of the entropy monotone increase is still an open question. Does this question arise from the cosmological nature or does it have any relation to a general problem of the initial conditions in cosmology?” [1]. V. L. Ginzburg, Russian dean of the theoretical physics, considers the problem of the entropy increase to be the first among the “great” unsolved problems in physics. In the top Russian magazine *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* (Vol. 169, p. 435), speaking about the three “great” unsolved problems he writes: “First, I am referring to entropy increase, irreversibility, and “time arrow”. Second, this problem is associated with the interpretation and understanding of quantum mechanics. Thirdly, this is the question of connection between physics and biology, specifically, the reductionism problem” [2]. In this work, we will make every effort to give a sufficiently full answer to the formulated fundamental question. Deciding on the fundamental laws that describe the medium motion dynamics is of importance when considering this question. We chose the traditional thermodynamics or gas-dynamics phenomenological approach using the mass, pulse, and energy conservation laws as a basis for the medium characterization. Particular emphasis is placed upon the entropy increase in detonation waves.

The second part of the work is devoted to registration of the shock-wave radiation in the laboratory environment. In the previous publications, hypotheses of nonequilibrium relaxation in the shock-wave front [3] or secondary exothermal processes of the initial molecule decay products [4] were used to explain the theory of the observed shock glow phenomena. Special experiments allowed us to demonstrate that the visible glow of the shock waves as well as of the jet itself are initiated when the gas flow deceleration temperature exceeds 1000 K and this glow might correspond to the equilibrium continuous spectrum of the thermal radiation (black body radiation spectrum).

The experiment was made with the help of a high-temperature test bench of Central Institute of Aviation Motors with the temperature ranging from 500 to 2500 K under the pressure of several atmospheres. The off-nominal high-temperature supersonic jet with the Mach number $M_0 = 1.3$ on the nozzle section was propagating in the drowned outer space at normal pressure. Glow of the shocks in the jet as well as of the jet itself is not observed at the flow deceleration temperatures below 1000 K. At the deceleration temperatures of about 2000 K, there appear luminous shocks and the boundaries of a supersonic hot radiating jet are well registered in the visible range (as well as the Mach discs present in it). In addition, an ordinary spectrum of the equilibrium thermal radiation is recorded. It is adequate for the visible range vicinity at the temperatures of about 2000 K.

References

1. Landau L. D., Lifshits E. M. The Course of Theoretical Physics. V. 5. Statistical Physics. Part 1. M: Nauka. 1976. 584 p.
2. Ginzburg V. L. What problems of physics and astrophysics seem now to be especially important and interesting. Uspekhi Fizicheskikh Nauk, 1999, Vol. 169, No. 4, pp. 419–441.
3. Zel'dovich Ya. B., Genich A. P., Manelis G. B. Peculiarities of the translational relaxation in the shock-wave front in gaseous mixtures // Doklady Akademii Nauk, 1979, Vol. 248, No. 2, pp. 349–351.
4. Drakon A. V., Eremin A. V., Kulikov S. V., Fortov V. E. The nature of nonequilibrium phenomena in the shock-wave front // Doklady Akademii Nauk, 2010, Vol. 432, No. 3, pp. 326–328.

2-20

**РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЫТОВ
ПО ИССЛЕДОВАНИЮ СХОЖДЕНИЯ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА
АЛЮМИНИЗИРОВАННОГО ВВ**

Д. А. Варфоломеев, К. В. Гаан, С. М. Долгих,
А. Л. Жеребцов, Н. С. Еськов, П. Е. Кискин,
А. Е. Кискин, О. В. Костицын, К. В. Левак

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

Предложена модель детонации многокомпонентного алюминизированного взрывчатого состава типа PBXN-115 [1], учитывающая процесс горения алюминиевых частиц в стадии сильного расширения продуктов взрыва. К построению модели привлекались термодинамические расчеты по комплексу ВУРС [2]. Бризантное действие взрывчатого состава изучалось в опытах по измерению радиальной скорости схождения цилиндрических стальных и медных оболочек (трубок), нагружаемых скользящей детонационной волной. Интересной особенностью этих экспериментов являлось сохранение частей оболочек, на сжатие

которых не оказывал влияние измерительный приемник. Сохраненные образцы имели форму сплошного или полого цилиндра. Двумерные расчеты с предложенной моделью детонации воспроизвели всю совокупность полученной экспериментальной информации. «Мягкое» нагружение оболочек продуктами взрыва и возможность получения сохраненных образцов могут быть использованы в аналогичных опытах по изучению физико-химических процессов, происходящих в различных материалах и их смесях (фазовые переходы, динамическое спекание порошков и т. д.).

Литература

1. D. L. Kennedy, D. A. Jones. Modeling shock initiation and detonation in the non-ideal explosive PBXN-115. Proc. of 10th Int. Det. Symp., pp. 665–673, 1993.
2. V. V. Dremov, D. G. Modestov. Calculation of shock compression parameters for chlorinated methanes. Chem. Phys. reports, vol. 17, pp. 781–790, 1998.

**NUMERICAL SIMULATION
OF THE EXPERIMENTS
TO STUDY CONVERGENCE
OF THE CYLINDRICAL SHELLS AFFECTED
BY THE EXPLOSION PRODUCTS
OF THE ALUMINIZED HIGH EXPLOSIVE**

D. A. Varfolomeev, K. V. Gaan, S. M. Dolgikh,
A. L. Zherebtsov, N. S. Es'kov, P. E. Kiskin, A. E. Kiskin,
O. V. Kostitsyn, K. V. Levak

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

We propose the detonation model of the multicomponent aluminumized explosive compound PBXN-115 [1] that takes into account of aluminum-particle combustion under strong expansion of the explosion products. The model was constructed based on thermodynamic calculations using the program complex VURS. The shattering effect of the explosive compound was studied in the experiments conducted to measure the convergence radial velocity of cylindrical steel and copper shells (tubes) loaded by a gliding detonation wave. An interesting point in these experiments was that the shell portions whose compression was unaffected by the measuring receiver were recovered. The recovered samples were shaped into a solid or hollow cylinder. Two-dimensional calculations with the proposed detonation model reproduced the complex of the measured data. Soft loading of the shells by the explosion products and availability of the recovered samples might be used in similar experiments to study physical-chemical processes in various materials and their mixtures (phase transitions, powder dynamic sintering, etc.).

References

1. D. L. Kennedy, D. A. Jones. Modeling shock initiation and detonation in the non-ideal explosive PBXN-115. Proc. of 10th Int. Det. Symp., pp. 665–673, 1993.

2. V. V. Dremov, D. G. Modestov. Calculation of shock compression parameters for chlorinated methanes. Chem.Phys. repots, vol. 17, pp. 781–790, 1998.

2-21

**РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЫТОВ
ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ ДЕТОНАЦИИ
В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦАХ
РАЗЛИЧНОГО ДИАМЕТРА
ИЗ НИЗКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ВВ**

Д. В. Кочутин, А. Л. Жеребцов,
Т. Б. Тимофеева, М. А. Машченко

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

Проведено расчетно-теоретическое моделирование опытов [1–3] по распространению детонации в цилиндрических образцах различного диаметра из низкочувствительного ВВ. В экспериментах регистрировалась форма и скорость детонационного фронта. Особый интерес представляли эксперименты, в которых реализовался вогнутый фронт детонационной волны. Этот эффект достигался путем окружения исследуемого ВВ слоем другого ВВ, имеющего более высокую скорость детонации.

В расчетах использована модель детонации [4], которая учитывает как пороговый характер возникновения детонации, так и медленное энерговыделение, связанное с экзотермическим процессом роста кластеров УДА в продуктах взрыва. Получена хорошая согласованность расчетных и экспериментальных данных.

Литература

1. Б. Г. Лобойко, В. П. Филин, О. В. Костицын, С. В. Баталов, С. Н. Любягинский, Е. Б. Смирнов. «Распространение детонации в цилиндрических образцах из нечувствительного ВВ». VII Забахинские Научные Чтения, РФЯЦ – ВНИИТФ, Снежинск, 2003 г.
2. Е. Б. Смирнов, А. Н. Аверин, Б. Г. Лобойко, О. В. Костицын, Ю. А. Беленовский, К. М. Просвирнин, А. Н. Киселёв «Динамика фронта детонационной волны в твердых ВВ» Научно-технический семинар «Физика горения и взрыва» посвященный 100 летию со дня рождения К. И. Щёлкина, Снежинск, 2011.
3. К. М. Просвирнин, Е. Б. Смирнов, Б. Г. Лобойко, О. В. Костицын, Ю. А. Беленовский, А. Н. Киселёв «Связь скорости детонации с кривизной фронта детонационной волны». XI Забахинские Научные Чтения, РФЯЦ – ВНИИТФ, Снежинск, 2012 г.
3. Физические модели детонации гетерогенных кристаллических взрывчатых веществ. Сборник статей под редакцией К. Ф. Гребёнкина. Издательство РФЯЦ – ВНИИТФ, Снежинск, 2017.

**NUMERICAL SIMULATION OF EXPERIMENTS
ON THE DETONATION PROPAGATION
IN CYLINDRICAL SAMPLES
OF LOW-SENSITIVITY HE
OF DIFFERENT DIAMETERS**

D. V. Kochutin, A. L. Zherebtsov,
T. B. Tomofeeva, M. A. Mashchenko

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

Numerical simulation of experiments [1–3] on the detonation propagation in cylindrical samples of low-sensitivity HE of different diameters is carried out. The detonation-wave front shape and velocity were recorded in the experiments. Of special interest were the experiments in which the detonation front was found to be concave. For this effect to be achieved, the HE under study was surrounded by a different HE layer having higher detonation velocity.

The detonation model [4] which takes account of a threshold nature of the occurring detonation and slow energy release associated with the DND clusters' exothermic growth in the explosion products was used in calculations. Calculated data agree closely with those found by experiment.

References

1. B. G. Loboiko, V. P. Filin, O. V. Kostitsyn, S. V. Batalov, S. N. Lyubyatinsky, E. B. Smirnov. Detonation propagation in cylindrical samples of low-sensitivity HE. VII Zababakhin Scientific Talks, RFNC – VNIITF, Snezhinsk, 2012.
2. E. B. Smirnov, A. N. Aeverin, B. G. Loboiko, O. V. Kostitsyn, Yu. A. Belenovskiy, A. N. Kiselev. Dynamics of the detonation-wave front in solid explosives. Combustion and Explosion Workshop devoted to 100-anniversary of K. I. Shchelkin, Snezhinsk, 2011.
3. K. M. Provirnin, E. B. Smirnov, B. G. Loboiko, O. V. Kostitsyn, Yu. A. Belenovskiy, A. N. Kiselev. Relation of detonation rate to detonation wave front curvature. XI Zababakhin Scientific Talks, RFNC – VNIITF, Snezhinsk, 2012.
4. Physical models of heterogeneous crystalline HEs. Collection of articles edited by K. F. Grebenkin. Published by RFNC – VNIITF, Snezhinsk, 2017.

2-22

**К «ПРЕИМУЩЕСТВАМ»
ДЕТОНАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ
И ОБ УСТОЙЧИВОСТИ
КВАЗИОДНОМЕРНОГО СТАЦИОНАРНОГО
ТЕЧЕНИЯ С ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНОЙ**

А. Н. Крайко, Х. Ф. Валиев, А. Д. Егорян

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

Выполнен термо-газодинамический анализ прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД)

с медленным горением при постоянном давлении и ВРД с горением в детонационных волнах (ДВ) Чепмена–Жуге (ДВ_{CJ}) – пульсирующих (PDE), стационарных (SDE) и вращающихся (RDE). Рассмотрены SDE с торможением потока перед прямой ДВ_{CJ} (SDE_{ψ ≥ 1}) и без торможения перед косою ДВ_{CJ} (SDE_{OSW}) и ВРД с медленным горением при постоянном объеме. Утверждения о преимуществах детонационного горения опираются на сравнения удельных тяг и импульсов, определяемых через термические КПД (η_{th}) процессов формулами, справедливыми лишь для ВРД, течение в тракте которых стационарно в инерциальных координатах. Из рассмотренных ВРД они верны только для ПВРД и SDE. Согласно расчетам по построенным термо-газодинамическим моделям определенные по η_{th} тяги остальных двигателей выше их правильных значений. В построенных моделях всех двигателей пренебрегается массой топлива и потерями при торможении воздуха в воздухозаборниках, его смешении с топливом и при течении в соплах. Клапаны PDE открываются и закрываются мгновенно, мгновенно и без энергозатрат инициируются ДВ_{CJ}, а сопла идеально регулируемые. При этом тяги рассмотренных ВРД зависят от числа Маха полета M_0 и безразмерной теплотворной способности горючей смеси $q^o = q/(c_p T_0)$, c_p и T_0 – теплоемкость и температура воздуха. Несмотря на выигрышные для PDE допущения, при реальных q^o и M_0 PDE превосходят ПВРД по тяге лишь при $M_0 < 2,5$. Большие потери в RDE с вращающимися ДВ в узких кольцевых каналах обусловлены неоднородностями течения по всем координатам. Согласно сказанному утверждения об увеличении тяги на десятки процентов при переходе к детонационному горению неверны. Даже для дозвуковых и малых сверхзвуковых M_0 , на которых по тяге ПВРД уступает PDE, последние хуже ТРД с медленным горением. Преимущества ВРД с детонационным горением возможно не по тяге, а по простоте конструкции (при $M_0 < 2$ в сравнении с ТРД) или по меньшей теплonaпряженности двигателя (SDE_{ψ ≥ 1} при $M_0 > 5$).

ВРД со стационарными ДВ возможны, если ДВ устойчивы. Возможны только в расширяющихся каналах стационарные прямые ДВ_{CJ} неустойчивы. Исследование устойчивости пересжатых ДВ выявило режимы, пригодные для реализации в SDE_{ψ ≥ 1}.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (17-01-00126 и 18-31-20059).

**ON THE “ADVANTAGES”
OF DETONATION COMBUSTION
AND THE STABILITY
OF QUASI-ONE-DIMENSIONAL STATIONARY
FLOW WITH A DETONATION WAVE**

A. N. Kraiko, Kh. F. Valiev, A. D. Egoryan

CIAM named after P. I. Baranov, Moscow, Russia

The thermodynamic and gasdynamic analysis of the ramjet (direct-flow AJE) with slow combustion and the

AJE with combustion in the Chapman-Jouguet detonation waves (DW_{CJ}), namely pulsing (PDE), stationary (SDE) and rotating (RDE), is performed. SDE is considered with slowing down of a flow before a straight DW_{CJ} (SDE_{ψ ≥ 1}) and without such slowing down before an oblique DW_{CJ} (SDE_{OSW}) and AJE with slow combustion at constant volume. Statements about the detonation combustion advantages are based on the comparisons of specific thrust and pulses which are determined through the thermal efficiency (η_{th}) of the corresponding processes by formulas which are valid only for the AJE, the flow in the path of which is stationary in the inertial coordinates. The mentioned formulas are true only for ramjet and SDE of AJEs considered. According to the calculations performed using the constructed thermodynamic and gasdynamic models, the thrust of the other engines determined by η_{th} is noticeably higher than their correct values. In the constructed models for all engines the mass of fuel and losses during air slowing down in the air intakes, mixing air with fuel and during flow in the nozzles are neglected. In PDE valves are opened and closed instantly, DW_{CJ} are initiated instantly and without energy costs, and the nozzle is perfectly adjustable. In this case, the traction characteristics of all considered AJE depend on the Mach number of flight M_0 and dimensionless calorific value of the combustible mixture $q^o = q/(c_p T_0)$, c_p and T_0 are heat capacity and temperature of cold air. Despite on advantageous to PDE assumptions, with real q^o and M_0 , PDE is superior to the ramjet thrust only if $M_0 < 2.5$. Large losses in RDE with rotating (“spin”) detonation waves (DW) in narrow annular combustion chambers are due to flow inhomogeneities at all coordinates. Due to the statement about the increase in the thrust of the AJE by tens of percent at the transition to detonation combustion are incorrect. Even for subsonic and small supersonic M_0 , at which the thrust of the ramjet inferior those of PDE, the latter obviously inferior to the turbojet with slow combustion. The advantages of AJE with detonation combustion, if possible, are not in traction characteristics, but in the simplicity of the design (at $M_0 < 2$ compared to the turbojet) or by the lower thermal stress of the engine path (SDE_{ψ ≥ 1} at $M_0 > 5$).

AJE are possible with a stationary DW, if such DWs are stable. Stationary straight DW_{CJ}, which are possible only in expanding channels, are unstable. Stability analysis of over-pressured straight DWs revealed regimes, which are suitable for implementation, in particular, in SDE_{ψ ≥ 1}.

The investigation is carried at RFBR support (17-01-00126 and 18-31-20059).

2-23

**ЗАВИСИМОСТЬ
ДЕТОНАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
СМЕСЕВЫХ ЛИТЬЕВЫХ
ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ ОТ СОДЕРЖАНИЯ
И СВОЙСТВ КОМПОНЕНТОВ**

Ю. М. Милёхин, В. Н. Куликов, А. А. Матвеев,
А. Н. Осавчук, Н. И. Шишов

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Федеральный центр двойных технологий «Союз»,
Дзержинский, Россия
E-mail:soyuz@fcdt.ru

Многокомпонентные литьевые взрывчатые составы (ВС), разрабатываемые в последние годы для широкого использования в различных отраслях народного хозяйства и в военной технике [1–4], состоят из 2–4 основных компонентов: ВВ, металлического горючего, окислителя и полимерного связующего. Известно, что детонационный процесс в подобных системах является неидеальным – для него характерно наличие увеличенной в сравнении с индивидуальным ВВ зоны реакции и догорание компонентов вне нее [3–6]. В связи с этим исследования детонационных свойств ВС являются актуальным как с научной точки зрения, так и с практической.

В работе приведены результаты исследования влияния на детонационные характеристики (скорость детонации, критический и предельный диаметр) ВС массового содержания компонентов – мелкодисперсного алюминиевого порошка и окислителя и типа связующего – активного или инертного. Скорость детонации ВС в эксперименте (D_{exp}) регистрировали с помощью непрерывной фотографии процесса на заряде диаметром (d) 20–80 мм на участке $2,5-7d$ и сопоставляли с расчетной скоростью для идеального варианта процесса.

Получено, что наиболее заметное снижение D_{exp} ВС наблюдается при содержании металлического горючего более 20%. С увеличением содержания в ВС окислителя от 6 до 30% значения D_{exp} снижаются (~10–15%). Увеличение среднемассового размера частиц окислителя в 10 раз приводит к некоторому возрастанию значений D_{exp} (~5–10%). Замена активной связки в ВС на инертную приводит к существенному снижению скорости детонации (~15%) и, соответственно, к увеличению диаметров детонации. Предельный диаметр детонации для ВС на основе активного связующего с содержанием окислителя 6% без металлического горючего составляет ~40 мм и с 20% металлического горючего – ≥50 мм. А для ВС с высоким содержанием окислителя (~30%) и металлического горючего (> 30%) – ~80 мм и более.

Установленные зависимости скорости детонации от рецептурных параметров ВС позволят в дальнейших исследованиях прогнозировать его свойства, а также быть полезными при создании теоретической модели высокоскоростного взрывного процесса в многокомпонентных системах.

Литература

1. Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970. – 164 с.
2. Энергетические конденсированные системы /Под ред. Академика Б. П. Жукова – Москва, «Янус-К», 1999.
3. Физика взрыва /Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, в 2 т. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.
4. Талавар М. Б., Сивабалан Р., Аннияпан М. и др. Новые тенденции в области создания перспективных высокоэнергетических материалов // Физика горения и взрыва. – 2007. – Т. 43, № 1. – С. 72–85.
5. Давыдов В. Ю., Губин А. С. Зависимость скорости детонации и метательной способности металлизированных взрывчатых веществ от плотности заряда и содержания до-бавки // ФГВ. – 2014. – Т. 50, № 5. – С. 123–133.
6. Матвеев А. А., Куликов В. Н., Осавчук А. Н., Шишов Н. И. Исследование влияния содержания алюминия и окислителя в многокомпонентных литьевых системах на их взрывчатые характеристики и дробящее действие / Горение и взрыв. Выпуск 6 /Под ред. С. М. Фролова. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2013. – С. 297–301.

**DEPENDENCE OF DETONATION
CHARACTERISTICS OF MIXED
CAST EXPLOSIVE COMPOSITIONS
ON THE CONTENT AND PROPERTIES
OF THE COMPONENTS**

Yu. M. Milekhin, V. N. Kulikov, A. A. Matveev,
A. N. Osavchuk, N. I. Shishov

Federal State Unitary Enterprise «FCDT "Soyuz"»,
Dzerzhinsky, Russia
E-mail: soyuz@fcdt.ru

The multicomponent cast explosive compositions (EC) developed in recent years for use in various branches of a national economy (including in military equipment) [1–4], consist of 2–4 main components: BB, metal fuel, oxidizer and polymer binder. It is known that the detonation process in such systems is not ideal – it is characterized by increased in comparison with individual blasting explosives reaction zone and by the after-burning of components outside of it [1–3, 5]. In this regard, the study of the detonation properties of the EC is relevant both from a scientific point of view and from a practical point.

The paper presents the results of the study of the impact on the detonation characteristics (detonation velocity, critical and limiting diameter) of the mass content of components – fine aluminum powder and oxidizer and the type of binder – active or inert. The detonation velocity of EC in the experiment (D_{exp}) was recorded using a continuous photograph of the process on a charge of diameter (d) 20...80 mm on a plot of $2.5...7d$ and compared with the calculated value for the ideal process.

It was found that the most noticeable decrease in D_{exp} EC is observed at a metal fuel content of more than 20%. With an increase of the content in the EC of the

oxidizer from 6 to 30%, the value of D_{exp} are reduced (by 10...15%). An increase in the average mass size of the oxidant particles by 10 times leads to a certain increase in the value of D_{exp} (~5...10%). Replacement in the formulation of EC of the active binder with an inert leads to a significant decrease in its detonation velocity (~15%) and an increase the diameters of detonation. The limiting diameter of detonation for EC, based on active binder, mass content of the oxidizing agent 6% of not the metal is about 40 mm, and 20% of metal fuel is more than 50 mm. And for EC with a high content of oxidizer (30%) and of metal fuel (30...40%) – 80 mm or more.

The established dependence of the detonation velocity on the formulation parameters of the EC will allow further studies to predict its properties, and also to be useful in the development of a theoretical model of high-speed explosive process in multicomponent systems.

References

1. Dremine A. N., Savrov S. D., Trophimov V. S., Shvedov K. K. Detonation waves in condensed media. Moscow: Science, 1970. – 164 pp.
2. Physics of explosion / Edit. by Orlenko. – 3rd ed. Vol. 2. – Moscow: PHYSMATLIT, 2002.
3. Talavar M. B., Sivabalan R., Anniyappan M. et al. New trends in the development of advanced high-energy materials // Combustion, Explosion and Shock Waves. – 2007. – Vol. 43, № 1. – P. 72–85.
4. Condensed energy systems / Edit. by Academician B. P. Zhukov – Moscow, “Yanus-K”, 1999.
5. Vadhe P. P., Pawar R. B., Sinha R. K., Asthana S. N., A. Subhananda Rao. Cast aluminized explosives (review) // Combustion, Explosion and Shock Waves. – 2008. – Vol. 44, № 4. – P. 98–115.
6. Matveev A. A., Kulikov V. N., Osavchuk A. N., Shishov N. I. Investigation of the influence of aluminum and oxidizer content in multicomponent castable systems on their explosive characteristics and crushing action / Burning and explosion. Issue 6 / Ed. by S. M. Frolov. – Moscow: TORUS PRESS, 2013. P. 297–301.

постановке с учетом малых концентраций второй фазы. Горение частиц алюминия описывалась с учетом перехода к кинетическому режиму. Для подавления рассматривались взвеси инертных частиц оксида алюминия диаметром 500 нм, 1 мкм, 5 мкм 50 мкм и объемных концентраций от 10^{-4} до $5 \cdot 10^{-3}$. Было получено, что срыв детонации (отделение фронта горения от фронта ударной волны), для взвесей алюминия 200 и 500 нм происходит при объемной концентрации инертных частиц около $5 \cdot 10^{-4}$, как при размерах частиц оксида алюминия 500 нм, так и при использовании микронных частиц.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00156.

MODELLING OF THE HETEROGENEOUS DETONATION SUPPRESSION PROCESSES IN SUBMICRON ALUMINIUM SUSPENSION WITH CLOUDS OF INERT PARTICLES

S. A. Lavruk

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics
SB RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: lavruks@mail.ru

The problem of the interaction of a heterogeneous detonation wave of a stoichiometric suspension of aluminum particles 500 nm and 200 nm in oxygen with a cloud of inert particles is considered. The modeling is made in a two-speed, two-temperature formulation, taking into account small concentrations of the second phase. Combustion of aluminum particles was described in transitional to the kinetic regime. For suppression, inert alumina particles of 500 nm, 1 μm , 5 μm 50 μm with volume concentration in the range 10^{-4} to $5 \cdot 10^{-3}$ were used. Detonation suppression (separation of the combustion front from the shock wave front), with for aluminum suspensions of 200 and 500 nm, was obtained the volume concentration of inert particles near $5 \cdot 10^{-4}$. Such concentrations were obtained as for aluminum oxide particles of 500 nm as for micron particles.

This work was supported by the RFBR grant No. 18-08-00156.

2-24

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОДАВЛЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕТОНАЦИИ СУБМИКРОННЫХ ГАЗОВЗВЕСЕЙ АЛЮМИНИЯ ОБЛАКАМИ ИНЕРТНЫХ ЧАСТИЦ

С. А. Лаврук

Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: lavruks@mail.ru

Рассмотрена задача о взаимодействии гетерогенной детонационной волны стехиометрической взвеси алюминиевых частиц диаметром 500 и 200 нм в кислороде с облаком инертных частиц. Задача рассматривалась в двухскоростной, двухтемпературной

2-25

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГОРЕНИЯ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ ДИНИТРАТА ЦЕЛЛЮЛОЗЫ И ПЛАСТИФИКАТОРА

А. А. Лачугин, А. С. Петров, В. Я. Базотов,
А. А. Мокеев, А. А. Марсов

Казанский национальный исследовательский
технологический университет, Казань, Россия

E-mail: san-sanich21@yandex.ru, soniq.aykhal@mail.ru

Целью данного исследования является установление закономерности горения композиции на основе динитрата целлюлозы от пластификатора, в роли которого выступает поливинилбутираль. Для придания пластификатору более вязкотекучего состояния и облегчения введения в нитрат целлюлозы его необходимо полимеризовать этиловым спиртом. Тем самым изменяя количество спирта в композиции можно регулировать состояние пластификатора, что скажется на пористости всего заряда. Поэтому исследование позволило выявить зависимость скорости горения от продолжительности сушки заряда.

STUDYING THE REGULARITY OF COMBUSTION COMBUSTION ON THE BASIS OF CELLULOSE DITHITRATE AND PLASTICIZER

A. A. Lachugin, A. S. Petrov, V. Ya. Basotov,
A. A. Mokeev, A. A. Marsov

Federal State Budgetary Educational Institution "Kazan
National Research Technological University", Kazan, Russia

E-mail: san-sanich21@yandexru, soniq.avkhal@mail.ru

The purpose of this study is to establish the pattern of combustion of a composition based on cellulose dinitrate from a plasticizer, in the role of which polyvinyl butyral acts. To make the plasticizer more viscous and to facilitate the introduction of cellulose into nitrate. it must be polymerized with ethyl alcohol. Thus. by changing the amount of alcohol in the composition. you can adjust the state of the plasticizer. which will affect the porosity of the entire charge. Therefore. the study revealed the dependence of the burning rate on the duration of charge drying.

2-26

КОМПЛЕКСНОЕ ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ГОРЮЧИХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

В. А. Левин

НИИ механики МГУ имени М. В. Ломоносова,
Москва, Россия

ЦАГИ имени проф. Н. Е. Жуковского, Жуковский, Россия
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,
Владивосток, Россия

E-mail: levin@imec.msu.ru

В докладе представлены результаты ряда исследований, связанных с проблемами создания эффективных двигательных устройств для высокоскоростных летательных аппаратов. Рассмотрены течения в импульсной аэродинамической установке НИИ механики МГУ с компактным сопловым устройством специальной конструкции; течения в пространстве между коаксиальными цилиндрами и в кольцевом зазоре, в которых формируется непрерывная волна детонации. Представлены результаты расчетов спиновой детонации в каналах круглого сечения, двумерных и трехмерных ячеистых детонационных структур.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (договор 14.G39.31.0001 от 13.02.2017), РФФИ (проекты 16-29-01092, 18-01-00883).

COMPLEX THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF COMBUSTIBLE GAS MIXTURES FLOWS

V. A. Levin

Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia

Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovsky, Russia
Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern
Branch of the RAS, Vladivostok, Russia

E-mail: levin@imec.msu.ru

The results of some investigations related to problems of creation of efficient propulsion devices for high-speed aircraft are represented. The gas flows in a pulsed aerodynamic setup of Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University with a compact nozzle device of special design are considered; flows in area between the coaxial cylinders and in the annular gap where continuous detonation formed are studied. The results of numerical modeling of spin detonation in channels with a circular cross section, two-dimensional and three-dimensional cellular detonation structures are presented too.

This research has been supported by the Ministry of Education and Science of Russian Federation (contract 14.G39.31.0001 on 13.02.2017), RFBR (projects 16-29-01092, 18-01-00883).

2-27

**СПЕКТРЫ СВЕЧЕНИЯ ПРОДУКТОВ
ВЗРЫВЧАТОГО РАЗЛОЖЕНИЯ
ПОЛИКРИСТАЛЛА ДАДНЭ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ
ИМПУЛЬСНОГО ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ**

И. Ю. Лисков¹, А. П. Никитин¹,
Н. Н. Ильякова², Б. П. Адуев¹, А. С. Зверев²

¹Институт углехимии и химического материаловедения
Федерального исследовательского центра угля и углехимии
СО РАН, Кемерово, Россия

²Кемеровский государственный университет, Кемерово,
Россия

E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

Приведены результаты измерений спектрально-кинетических характеристик свечения, возникающего при взрыве поликристалла ДАДНЭ при воздействии электронным пучком ускорителя с взрывоэмиссионным катодом (0,24 МэВ, до 20 нс, до 25 Дж/см²). Регистрация свечения проводилась в реальном масштабе времени с помощью спектрофотохронографа [1] в спектральном диапазоне 350–700 нм и временном интервале 10⁻⁸–10⁻³ с.

При иницировании взрывчатого разложения образцов носящего детонационный характер, можно выделить две фазы в кинетике свечения. Первая возникает при воздействии пучка электронов на поликристалл и по длительности соответствует временному разрешению применяемой развертки фотохронографа (45 нс). Вторая связана непосредственно с взрывчатым разложением образца, происходит во временном интервале 100–300 нс после воздействия пучка электронов с максимумом свечения через 140–150 нс.

Во время импульса иницирования в спектре свечения наблюдается узкая полоса при $\lambda = 370$ нм, предположительно связанная со свечением экситона, локализованного на NO₂-группе кристалла ДАДНЭ. Аналогичная полоса наблюдалась в образцах тэна и гексогена при воздействии пучка электронов [2]. В интервале 450–700 нм интенсивность свечения монотонно нарастает. При взрыве в спектре через 140 нс наблюдаются полоса свечения, предположительно связанная с наложением линий свечения преимущественно возбужденных молекул азота. В спектре можно отчетливо выделить линии N₂ $\lambda = 544$; 575,5; 590; 612,7; 687,5 нм [3].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-33-00349 мол_a.

Литература

1. Aduев, B. P., Belokurov G. M., Grechin S.S. et al. // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2015. – 81. 1. 012038 doi:10.1088/1757-899X/81/1/012038
2. Адуев Б. П., Гречин С. С., Лисков И.Ю. Исследование характеристик взрывного разложения кристаллов тетранит-

ропентаэритрита и гексогена // Вестник Кемеровского государственного университета. – 2013. – № 3–3 (55). – С. 49–54.

3. Отождествление молекулярных спектров /пер. англ., под ред. Мандельштама С. Л., Аленцева М. Н. / Пирс Р., Гейдон А. // М.: «Издательство иностранной литературы», 1949, 240 с.

**LUMINESCENCE SPECTRA OF THE PRODUCTS
OF THE EXPLOSIVE DECOMPOSITION
OF A DADNE POLYCRYSTAL WHEN IMPACT
TO A PULSED ELECTRON BEAM**

I. Y. Liskov¹, A. P. Nikitin¹,
N. N. Ilyakova², A. S. Zverev², B. P. Aduев¹

¹Institute of Coal Chemistry and Material Science, Federal
Research Center for Coal and Coal Chemistry,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Kemerovo, Russia

²Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

The results of measurements of the spectral-kinetic characteristics of luminescence arising from the explosion of a DADNE polycrystal when exposed to an electron beam of an accelerator with an explosive emission cathode (0.24 MeV, up to 20 ns, up to 25 J/cm²) are presented. The luminescence was recorded in real time using a spectrophotochronograph [1] in the spectral range of 350–700 nm and a time interval of 10⁻⁸–10⁻³ s.

When initiating explosive decomposition of samples of a detonating character, two phases can be distinguished in the kinetics of luminescence. The first phase occurs when the electron beam is impact to a polycrystal and, in terms of duration, corresponds to the time resolution of the applied photochromatograph sweep (45 ns). The second phase is directly related to the explosive decomposition of the sample, occurs in the time interval of 100–300 ns after exposure to an electron beam with a maximum glow after 140–150 ns.

During the initiation pulse, a narrow band is observed in the luminescence spectrum at $\lambda=370$ nm, presumably related to the exciton luminescence localized on the NO₂-group of the DADNE crystal. A similar band was observed in the PETN and RDX samples when exposed to an electron beam [2]. In the range of 450–700 nm, the emission intensity monotonically increases. During an explosion in the spectrum after 140 ns, a luminescence band is observed, presumably associated with the superimposition of luminescence lines of predominantly excited nitrogen molecules. Nitrogen lines can be distinguished in the spectrum $\lambda = 544$; 575.5; 590; 612.7; 687.5 nm[3].

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 18-33-00349 мол_a.

References

1. Aduев, B. P., Belokurov G. M., Grechin S.S. et al. // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2015. – 81. 1. 012038 doi:10.1088/1757-899X/81/1/012038

2. Адуев Б. П., Гречин С. С., Лисков И. Ю. Исследование характеристик взрывного разложения кристаллов тетрагидропентаэритрита и гексогена // Вестник Кемеровского государственного университета. – 2013. – № 3-3 (55). – С. 49–54.

3. Отождествление молекулярных спектров /пер. англ., под ред. Мандельштама С. Л., Аленцева М. Н. / Пирс Р., Гейдон А. // М.: «Издательство иностранной литературы», 1949, 240 с.

2-28

РАДИОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ ДАДНЭ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ

И. Ю. Лисков¹, А. П. Никитин¹, А. С. Зверев²,
Б. П. Адуев¹, Н. Н. Ильякова², Н. В. Нелюбина¹

¹Институт углекислоты и химического материаловедения
Федерального исследовательского центра угля и углекислоты
СО РАН, Кемерово, Россия

²Кемеровский государственный университет, Кемерово,
Россия

E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

Проведены измерения спектра свечения поликристалла ДАДНЭ в интервале 350–750 нм при воздействии на пучка электронов (0,24 МэВ, 5 нс, 4 Дж/см²), практически не вызывающего видимых разрушений образца (допороговый режим). Применена традиционная схема измерения спектров радиолюминесценции, включающая источник возбуждения, монохроматор, фотоумножитель и осциллограф.

Длительность свечения образца при воздействии электронного пучка во всем спектральном интервале совпадает с длительностью импульса ускорителя электронов. В спектральном интервале 450–650 нм обнаружена полоса свечения с максимумом на длине волны $\lambda \sim 370$ нм, наблюдавшаяся ранее на кристаллах тэна и гексогена [1], которая, по-видимому, связана со свечением экситона, возбужденного в NO₂-группе кристалла. Относительно широкая полоса с максимумом при $\lambda = 515$ нм. Аналогичная полоса наблюдалась ранее в монокристаллах тэна [2]. Сопоставление с литературными данными [3] позволяет связать эту полосу со свечением NO₂ радикалов, образующихся в результате радиолиза образцов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-33-00349 мол_а

Литература

1. Адуев Б. П., Гречин С. С., Лисков И. Ю. Исследование характеристик взрывного разложения кристаллов тетрагидропентаэритрита и гексогена // Вестник Кемеровского государственного университета. – 2013. – № 3-3 (55). – С. 49–54.

2. Адуев Б. П., Белокуров Г. М., Гречин С. С., Лисков И. Ю. Динамика и спектры свечения взрывчатого разложения тэна, инициированного импульсным электронным пучком //

Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 1–2. – С. 5–9.

3. Myers, G. H. Quenching of NO₂ Fluorescence / G. H. Myers, D. M. Silver, F. Kaufman // The Journal of Chemical Physics. – 1966. – Vol. 44, № 2. – P. 718–723.

RADIOLUMINESCENCE OF DADNE POLYCRYSTALS UNDER THE IMPACT OF AN ELECTRON BEAM

I. Yu. Liskov¹, A. P. Nikitin¹, N. N. Ilyakov²,
A. S. Zverev², B. P. Aduiev¹, G. M. Nel¹

¹Institute of Coal Chemistry and Material Science, Federal
Research Center for Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russia

²Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

The luminescence spectrum of the DADNE polycrystal was measured in the range of 350–750 nm under the action of an electron beam (0.24 MeV, 5 ns, 4 J/cm²), which almost did not cause visible damage to the sample (subthreshold mode). The traditional scheme for measuring the radioluminescence spectra was applied, including an excitation source, the monochromator, the photomultiplier and the oscilloscope.

The duration of the glow of the sample when exposed to an electron beam in all the spectral interval coincides with the pulse duration of the electron accelerator. In the spectral range of 450–650 nm, a luminescence band with a maximum at a wavelength of $\lambda = 375$ nm was detected, which was previously observed on PETN and RDX crystals [1], which is apparently associated with the emission of an exciton excited in the NO₂ group of the crystal. Relatively wide band with a maximum at $\lambda = 515$ nm. A similar band was observed earlier in PETN monocrystals. [2]. Comparison with the literature data [3] allows us to associate this band with the emission of NO₂ radicals resulting from the radiolysis of the samples.

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 18-33-00349 mol_a.

References

1. Адуев Б. П., Гречин С. С., Лисков И. Ю. Исследование характеристик взрывного разложения кристаллов тетрагидропентаэритрита и гексогена // Вестник Кемеровского государственного университета. – 2013. – № 3-3 (55). – С. 49–54.

2. Адуев Б. П., Белокуров Г. М., Гречин С. С., Лисков И. Ю. Динамика и спектры свечения взрывчатого разложения тэна, инициированного импульсным электронным пучком // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 1–2. – С. 5–9.

3. Myers, G. H. Quenching of NO₂ Fluorescence / G. H. Myers, D. M. Silver, F. Kaufman // The Journal of Chemical Physics. – 1966. – Vol. 44, № 2. – P. 718–723.

2-29

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ
ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ
И СТРУКТУРЫ ПЛАМЕНИ
ПРИ ГОРЕНИИ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ ТОПЛИВ**

Е. Л. Лобода¹, М. В. Агафонцев¹,
В. В. Рейно², Ю. А. Лобода¹

¹Томский государственный университет, Томск, Россия

²Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН,
Томск, Россия

E-mail: Loboda@mail.tsu.ru

В данной работе представлены основные принципы применения инфракрасной термографии для исследования процессов гетерогенного горения некоторых видов жидких углеводородных топлив и твердых растительных горючих материалов. Также представлены экспериментальные исследования структуры течения в пламени, показана цикличность процесса горения жидких углеводородных топлив со свободной поверхности и рассмотренных растительных горючих материалов. Показана взаимосвязь между пульсациями температуры в пламени и тепловой структурой. На основе анализа мгновенных термограмм и результатов исследования поля скорости в пламени с применением методов цифровой трассерной визуализации установлена взаимосвязь между крупными вихревыми структурами, поддающимися идентификации, в поле скорости и крупными тепловыми неоднородностями на мгновенном поле температуры.

В результате сравнения различных способов оценки крупных турбулентных структур в пламени получено удовлетворительное согласование результатов.

Основные выводы:

1. Для исследования процессов гетерогенного горения необходимо применять инфракрасные камеры средневолнового ИК-диапазона с узкополосными оптическими фильтрами, позволяющими производить измерения по излучению газообразных продуктов горения.

2. Применение спектральных интервалов в диапазоне 4–5 мкм для исследования горения рассмотренных видов топлив не целесообразно, т. к. интенсивность излучения продуктов горения в этом спектральном интервале превышает интенсивность излучения абсолютно черного тела.

3. При диффузионном горении рассмотренных видов топлив процесс горения носит циклический характер, который возможно зафиксировать только с применением скоростных инфракрасных камер с частотой съемки не менее 20 кадров/сек, работающих в узких спектральных интервалах среднего ИК-диапазона.

4. Пульсации температуры в пламени связаны с режимом течения в нем и размерами крупных турбулентных структур в пламени.

5. Установлена взаимосвязь между крупными вихревыми структурами в поле скорости и крупными тепловыми неоднородностями в мгновенном поле температуры.

**APPLICATION OF INFRARED THERMOGRAPHY
METHODS FOR THE STUDY OF THE
COMBUSTION PROCESSES AND THE FLAME
STRUCTURE DURING SOME FUEL BURNING**

E. L. Loboda¹, M. V. Agafontsev¹,
V. V. Reyno², Yu. A. Loboda¹

¹Tomsk State University, Tomsk, Russia

²V. E. Zuev Institute of atmospheric optics Russian Academy
of sciences, Siberian branch, Tomsk, Russia

E-mail: Loboda@mail.tsu.ru

This paper presents the basic principles of the use of infrared thermography to study the processes of heterogeneous combustion of certain types of liquid hydrocarbon fuels and solid vegetable combustible materials. Experimental studies of the structure of the flow in the flame are also presented. The cyclical nature of the combustion process of liquid hydrocarbon fuels from the free surface and the considered plant combustible materials is shown. The relationship between temperature fluctuations in the flame and the thermal structure is shown. Based on the analysis of instantaneous infrared images and the results of the study of the velocity field in a flame using digital tracer visualization methods, the relationship between large vortex structures identifiable in the velocity field and large thermal inhomogeneities in the instantaneous temperature field is established.

As a result of the comparison of various methods for evaluating large turbulent structures in a flame, satisfactory agreement of the results was obtained.

Main conclusions:

1. It is necessary to use infrared cameras of the medium-wave infrared range with narrow-band optical filters, which allow making measurements on the emission of gaseous products of combustion for studying the processes of heterogeneous combustion.

2. The use of spectral intervals in the range of 4–5 μm for the study of the combustion of the considered types of fuels is not advisable, since the radiation intensity of the combustion products in this spectral range exceeds the radiation intensity of an absolute black body.

3. During diffusion combustion of the considered types of fuels, the combustion process is cyclical in nature, which can only be recorded using high-speed infrared cameras with a shooting frequency of at least 20 frames per second, operating in narrow spectral intervals of the mid-IR range.

4. Pulsations of temperature in a flame are associated with the flow regime in it and the size of large turbulent structures in a flame.

5. The interrelation between large vortex structures in the velocity field and large thermal inhomogeneities in the instantaneous temperature field is established.

2-30

ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Н. Г. Миловзоров, М. В. Лукашова,
А. А. Кудрявцев, П. А. Сомов
ООО «ТЕСКАН», Москва, Россия
E-mail: n.milovzorov@tescan.ru

Методы сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) в течение десятилетий успешно применяются для исследования морфологии, элементного и фазового составов, текстуры объектов исследования. Однако остаются методически сложными исследования диэлектриков, многослойных структур, выявление и достоверный анализ локальных неоднородностей с линейными размерами менее одного микрометра. В этой связи производители СЭМ и вспомогательного оборудования, в частности TESCOAN ORSAY HOLDING, разрабатывают новые модели микроскопов, специализированные для проведения исследований при низких ускоряющих напряжениях, предлагают новые детекторы, позволяющие выявлять и анализировать локальные неоднородности (кластеры, включения).

Примерами такого оборудования являются СЭМ серий S8000 и S9000, а также ультра-высоковакуумный микроскоп NanoSpace. Эти приборы предназначены для исследования полимеров, изделий микроэлектроники, многослойных структур. Они сочетают возможности сканирующей электронной микроскопии, сфокусированных ионных пучков, вторичной ионной масс-спектрометрии.

Отдельной проблемой является подготовка образцов к исследованию методами СЭМ без изменения исходной структуры и свойств. Одной из перспективных техник является травление поверхности образца несфокусированным ионным пучком, например, с использованием оборудования Technoorg Linda Ltd.

В докладе представлены примеры применения комбинации этих техник для исследования многослойных материалов, изделий микроэлектроники, полимеров.

STUDY OF COMPLEX OBJECTS BY SCANNING ELECTRON MICROSCOPY

N. G. Milovzorov, M. V. Lukashova,
A. A. Kudryavtsev, P. A. Somov
TESCAN (CIS), Ltd., Moscow, Russia
E-mail: n.milovzorov@tescan.ru

For decades, scanning electron microscopy (SEM) successfully used for study of morphology, elemental and phase compositions, texture. However, it is difficult to study of dielectrics, multilayers; as well as identification and reliable analysis of submicron impurities. In this regard, SEM producers, in particular TESCOAN ORSAY

HOLDING, develop new microscopes, specialized for research at low accelerating voltages, offer new detectors that allow to detect and analyze local heterogeneities (clusters, inclusions).

TESCAN ORSAY HOLDING presents new S8000 and S9000 series of SEMs and ultra-high vacuum microscope NanoSpace. These devices especially designed for study of polymers, microchips, multilayer structures. They combine the performance of SEM, FIB, SIMS, etc.

An additional problem is the sample preparation without any changing of initial structure and properties. One of the most promising techniques is etching of sample surface by the unfocused ion beam, for example, using equipment of Technoorg Linda Ltd.

This report presents examples of combination of mentioned techniques for the study of multilayers, microchips, polymers.

2-31

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОСТОЙКОСТИ ЧЕРНОГО И ПИРОКСИЛИНОВОГО ПОРОХА

Т. В. Антипова, А. Н. Зеленов,
А. Г. Нескин, Е. В. Чепурин

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

В докладе приводятся результаты экспериментальных исследований термостойкости дымного и пироксилинового пороха, исследование газовой выделенности порохов на установке ИВК «Вулкан 2000» при 100°C, 130°C, 140°C, 150°C. В результате термирования образцов дымного и пироксилинового пороха при температурах 100°C, 130°C, 140°C и 150°C получены выходные экспериментальные кривые зависимости давления, создаваемого расширением воздуха содержащегося в камере и разложением пороха.

Результаты экспериментальных исследований термостойкости и последующей оценки влияния термирования на процесс воспламенения и работоспособности термированного дымного и пироксилинового пороха с измерением давления, создаваемого пороховыми газами в измерительной камере.

Результаты экспериментальных исследований зависимости амплитуды давления пороховых газов, при сгорании термированных порохов во взрывной камере, регистрировались автономным датчиком давления ЭРД 2Т6000 К.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THERMAL STABILITY OF BLACK AND PYROXYLIN POWDERS

T. V. Antipova, A. N. Zelenov,
A. G. Neskin, E. V. Chepurin

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

The paper presents the results of experimental studies of thermal stability of black and pyroxylin powders and the results of gas release by powders at the «Vulkan 2000» facility at 100°C, 130°C, 140°C, 150°C. After thermal treatment of samples of black and pyroxylin powders at 100°C, 130°C, 140°C, and 150°C, the experimental dependence curves of pressure built by expansion of the air contained in the chamber and by powder decomposition were obtained.

The paper presents the results of experimental studies of thermal stability with the subsequent assessment of the influence of thermal treatment on ignition and performance of thermally-treated black and pyroxylin powders by measuring the pressure built by powder gases in the measuring chamber.

The results of experimental studies of the dependence of powder gas pressure amplitude obtained during combustion of thermally-treated powders in the explosion chamber were recorded by the ERD 2T6000 K independent pressure sensor.

2-32

ВЗРЫВЧАТОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ КОМПОЗИТА RDX-AL ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов,
И. Ю. Лисков, Г. М. Белокуров, Н. В. Нелюбина

Институт углекислоты и химического материаловедения
Федерального исследовательского центра угля и углекислоты
СО РАН, Кемерово, Россия

E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

Исследованы оптические, оптико-акустические и взрывчатые свойства композитов на основе гексогена (RDX) и включений частиц алюминия (100 нм).

Оптическими и оптоакустическими методами экспериментально показано, что в композите RDX-Al поглощение лазерного излучения происходит преимущественно включениями частиц алюминия.

Впервые проведено взрывчатое разложение RDX с включением Al при воздействии второй гармоники YAG:Nd³⁺ + лазера на образцы с плотностью 1,78 г/см³. Эксперимент удалось осуществить при блокировании газодинамической нагрузки с помощью приложения внешнего статического давления $P = 10^7$ Па на стеклянную пластину, лежащую на держателе образца.

Проведен сравнительный эксперимент при воздействии лазерного излучения на образцы тэн-Аl плотностью 1,7 г/см³. В этих условиях для композитов RDX-Al минимальный порог инициирования $H_{cr} = 1$ Дж/см² при оптимальной концентрации включений $n = 0,2$ масс. %, для тэн-Аl соответственно $H_{cr} = 0,33$ Дж/см² при $n = 0,1$ масс. %.

EXPLOSIVE DECOMPOSITION OF RDX-AL COMPOSITE DURING A PULSE LASER EXPOSURE

B. P. Aduiev, D. R. Nurmukhametov,
I. Yu. Liskov, G. M. Belokurov, N. V. Nelyubina

Institute of Coal Chemistry and Chemical Materials Science,
Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Kemerovo, Russia

E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

The optical, optoacoustic and explosive properties of hexogen-based composites (RDX) and aluminum particle inclusions (100 nm) were investigated.

Optical and optoacoustic methods have been shown experimentally that in a RDX-Al composite, the absorption of laser radiation occurs predominantly by the inclusion of aluminum particles.

For the first time, an explosive decomposition of RDX was carried out with the inclusion of Al when a second harmonic of a YAG: Nd³⁺ + laser was applied to samples with a density of 1.78 g / cm³. The experiment was carried out when blocking the gas-dynamic load by applying an external static pressure $P = 10^7$ Pa on the glass plate lying on the sample holder.

A comparative experiment was conducted when laser radiation was applied to the Ten-Al samples with a density of 1.7 g / cm³. Under these conditions, for RDX-Al composites, the minimum initiation threshold is $H_{cr} = 1$ J / cm² with an optimal concentration of inclusions $n = 0.2$ mass. %, for ten-Al, respectively, $H_{cr} = 0.33$ J / cm² with $n = 0.1$ mass. %

2-33

КОМПЛЕКСНОЕ ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ ЛЬДА

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

Национальный исследовательский Томский
государственный университет, Томск, Россия

Актуальность исследований по изучению поведения льда при ударных и взрывных нагрузках связана с необходимостью развития северных территорий, а именно, борьбой с ледяными заторами на реках, добычей природных ископаемых на Крайней Севере, улучшением судоходства по Северному морскому

пути. Основная сложность заключается в том, что этот древнейший природный материал плохо изучен в условиях динамического нагружения из-за особенностей кристаллического строения, аномальных пластических свойств и т. п. Основные концепции разрушения льда пока еще разрабатываются, а экспериментальные результаты не всегда согласуются между собой. Феноменологическая модель льда, разработанная в НАСА проф. Керне (Kelley S. Carney) является сейчас наиболее распространенной при моделировании процесса разрушения льда при динамических нагрузках. Однако, по словам самих авторов, модель имеет ряд недостатков.

В настоящей работе детально исследовано разрушение льда при подводном взрыве заряда ВВ. Получены результаты полномасштабных экспериментов по подрыву речного льда средней толщины эмульсионной взрывчаткой. Численно исследован процесс разрушения толстого льда безоболочечным зарядом ВВ в зависимости от глубины его закладки.

Экспериментальная часть работы выполнена совместно с ООО «КузбасСпецВзрыв» средствами мобильной лаборатории «Взрывное разрушение природных материалов». Объектами исследования выбраны бесснежный и заснеженный ледяной покров средней толщины (до 80 см). Масса ВВ – 4 кг (эквивалент 3,25 кг TNT). Подрыв заряда осуществлен в воде подо льдом. Предметом исследования являлась морфология разрушения льда, включая форму и диаметр майны, состояние кромки льда, размеры осколков, наличие радиальных трещин вне майны и т. д.

Численно смоделировано поведение толстого льда (до 200 см) при подрыве заряда ВВ. Расчеты проведены в рамках упругопластической модели в осесимметричной 2D постановке при помощи модифицированного лагранжева метода. В расчетах варьировалась глубина закладки ВВ. Рассмотрены варианты расчетов с расположением ВВ от 10 см от поверхности «воздух – лед», до 10 см от поверхности «вода – лед». Определена наиболее эффективная глубина закладки заряда ВВ.

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

**COMPLEX THEORETICAL
AND EXPERIMENTAL STUDY ICE
DESTRUCTION UNDER EXPLOSIVE LOAD**

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

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

The relevance of studies on the behavior of ice under shock and explosive loads is associated with the need to develop the northern territories, including the fight against ice jams on rivers, the extraction of natural resources in the Far North, and improved navigation along the Northern Sea Route. The main difficulty lies in the fact that this ancient natural material is poorly studied in conditions of dynamic loading due to the characteristics of the crystal structure, anomalous plastic properties, etc.

The basic ice destruction concepts are still being developed, and experimental results are not always consistent with each other. Phenomenological ice model developed by NASA prof. Carney is now the most common in modeling the process of ice destruction under dynamic loads. However, according to the authors themselves, the model has several disadvantages.

In the current research, the destruction of ice during an underwater explosion of an explosive charge is studied in detail. The results of full-scale experiments to undermine river ice of medium thickness with emulsion explosives were obtained. The process of destruction of thick ice by shell-free explosive charge depending on the depth of its laying is studied numerically.

The experimental part of the research was performed in cooperation with KuzbasSpetsVzryv Company by means of the mobile laboratory “Explosive Destruction of Natural Materials”. Research objects are bar ice and snow ice cover of medium thickness (up to 80 cm). Emulsion explosives mass is 4 kg (equivalent to 3.25 kg of TNT). The charge is detonated in water under the ice. There is no gap between ice and explosive. Research subject was the morphology of the destruction of ice, including the shape and diameter of the lane into ice cover, the state of the ice edge, the size of the fragments, the presence of radial cracks outside the lane, etc.

The behavior of thick ice (up to 200 cm) under explosive charge is simulated. The calculations were carried out in an axisymmetric 2D formulation by a modified Lagrangian method. In the numerical calculations, the depth of explosive charge laying was varied. Cases of calculations with the location of explosives from 10 cm from the Air – Ice surface, to 10 cm from the Water – Ice surface are considered. The most effective depth of explosive charge is determined.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 19-08-01152).

2-34

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ
СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ
КИСЛОТОГЕНЕРИРУЮЩИХ КОМПОЗИЦИЙ
НА ОСНОВЕ НИТРАТА АММОНИЯ
ОТ ДАВЛЕНИЯ**

А. С. Петров, А. А. Лачугин, В. Я. Базотов,
А. А. Мокеев, А. А. Марсов, Л. Х. Бадретдинова

Казанский национальный исследовательский
технологический университет, Казань, Россия

Email: soniq.aykhal@mail.ru, san-sanich21@yandex.ru

В работе представлены исследования по изучению зависимости скорости горения кислотообразующих энергонасыщенных материалов на основе нитрата аммония от давления в условиях, имитирующих скважину. В качестве объектов исследования использованы лабораторные образцы термогазокислотных устройств с кислотогенерирующей сгораемой

композицией. Установлено, что составы, содержащие в смеси с нитратом аммония одновременно гексахлорэтан и смолу перхлорвиниловую хлорированную, обладают лучшей воспламеняемостью и большими скоростями горения по сравнению с индивидуальным содержанием каждого из веществ в смеси с нитратом аммония. Обнаружено, что состав из 60% мас. нитрата аммония, 30% мас. гексахлорэтана и 10% мас. перхлорвинилового смолы хлорированной обладает наибольшей скоростью горения из всех исследуемых составов и склонен к резкому повышению скорости горения при давлении более 23 МПа.

**STUDY OF THE DEPENDENCE
OF THE RATE OF COMBUSTION
OF ACID-GENERATING COMPOSITIONS BASED
ON AMMONIUM NITRATE AGAINST PRESSURE**

A. S. Petrov, A. A. Lachugin, V. Ya. Bazotov,
A. A. Mokeev, A. A. Marsov, L. Kh. Badretdinova

Kazan National Research Technological University,
Kazan, Russia

E-mail: soniq.aykhal@mail.ru, san-sanich21@yandex.ru

The paper presents studies on the dependence of the burning rate of acid-forming energy-saturated materials based on ammonium nitrate on pressure under conditions that simulate a well. Laboratory objects of thermogas acid devices with an acid-generating combustible composition were used as objects of study. It has been established that compounds containing both hexachloroethane and perchlorovinyl chlorinated resin mixed with ammonium nitrate have the best flammability and high burning rates as compared with the individual content of each of the substances mixed with ammonium nitrate. Found that the composition of 60% wt. ammonium nitrate, 30% wt. hexachloroethane and 10% wt. chlorinated perchloride resin has the highest burning rate of all the studied compounds and is prone to a sharp increase in the burning rate at a pressure of more than 23 MPa.

2-35

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА
РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ
В АЛЮМИНИЕВОЙ ПРЕГРАДЕ
ОТ ДЕТОНИРУЮЩИХ
НИЗКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ВВ
НА ОСНОВЕ ТАТБ**

К. М. Просвирнин, О. В. Костицын,
А. В. Сарафанников, Ю. А. Беленовский,
К. М. Мирошкин, И. А. Ахлюстин,
И. Э. Косолапов, Д. К. Гильмутдинов

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

В работе приведены результаты исследования процесса распространения ударной волны в алюминиевой преграде от двух детонирующих взрывчатых веществ (ВВ) на основе ТАТБ: термопластичного бризантного и литьевого фугасного. По результатам проведенных экспериментов для каждого исследованного ВВ определены: скорость распространения ударной волны, создаваемая в алюминиевой преграде, а также форма и кривизна фронта ударной волны. С использованием уравнения ударной адиабаты для алюминия проведена сравнительная оценка эффективного давления Жуге для исследованных ВВ. Полученные результаты свидетельствуют о существенных различиях процесса распространения детонационного фронта в объеме образцов из исследованных ВВ.

**INVESTIGATION INTO THE SHOCK WAVE
PROPAGATION IN THE ALUMINUM OBSTACLE
GENERATED BY THE DETONATING
LOW-SENSITIVITY TATB-BASED EXPLOSIVES**

K. M. Prosvirnin, O. V. Kostitsyn, A. V. Sarafannikov,
Yu. A. Belenovskiy, K. M. Miroshkin, I. A. Akhlyustin,
I. E. Kosolapov, D. K. Gil'mutdinov

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

Results of investigation into the shock wave propagation in the aluminum obstacle are presented in the paper. The shock wave was generated by two detonating TATB-based explosives: thermoplastic high explosive (HE) and cast explosive. The results of the experiments carried out for each investigated HE were used to determine the propagation velocity of the shock wave generated in the aluminum obstacle as well as the shock wave shape and curvature. The comparative assessment of the effective Jouget pressure for the HE analyzed was made with the equation of the shock Hugoniot for aluminum. The obtained results indicate considerable difference in the propagation of the detonation front throughout the analyzed HE samples.

2-36

**НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ КОМПОЗИТЫ
ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ СОДЕРЖАЩИЕ
ОДНОСТЕННЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ**

Э. Р. Прууэл, А. О. Кашкаров, А. П. Ершов,
И. А. Рубцов, Н. П. Сатонкина,
К. А. Тен, Г. Р. Дашапилов

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный университет,
Новосибирск, Россия

Параметры на фронте детонации взрывчатых веществ, как впрочем и чувствительность к внешним воздействиям, существенным образом зависят от

исходной структуры заряда. Влияние оказывает как пористость заряда в целом, так и исходный размер отдельных частиц в том числе и после прессовки до близкой к максимальной плотности. Изменения свойств наблюдаются при уменьшении размера зерна вплоть до десятков нанометров. Это дает основания полагать, что характерные масштабы процессов в детонационном фронте имеют как минимум тот же порядок.

Было установлено, что внедрение одностенных углеродных нанотрубок во взрывчатые материалы в количестве 0,5 массовых процента позволило получить наноструктурированные композиты с характерным масштабом неоднородностей несколько десятков нанометров. При этом, размер отдельных частиц составляет от единиц до десятков микрон. Наличие в полученных нанокompозитах пор, размерами от десятков до сотен нанометров, подтверждается данными сканирующей электронной микроскопии. Исследование внутренней структуры зарядов с помощью малоуглового рентгеновского рассеяния луча синхротронного излучения дает средний размер пор для тэна 32 нм, гексогена 43 нм, тротила 40 нм.

Измерение электрической проводимости за фронтом детонации для композитов на основе гексогена не выявило значимых различий по сравнению с зарядами чистого гексогена той же плотности и дисперсности частиц. Однако, средняя скорость детонации композита оказалась экспериментально значимо выше почти на 0,2 км/с.

Регистрация скорости контактной границы между композитом на основе гексогена и оргстеклом показала, что профили скоростей этой границы существенно отличаются от наблюдаемых при использовании чистого гексогена. Для каждого состава скорость контактной границы сначала превышает расчетное значение для точки Чепмена-Жуге, затем происходит постепенный спад скорости, что отражает эволюцию состояния за фронтом детонации. Для композита содержащего нанотрубки этот спад существенно быстрее и расчетное состояние Чепмена-Жуге достигается значительно раньше. Следовательно, реакция в композите происходит быстрее.

Таким образом, внедрение одностенных углеродных нанотрубок в заряды взрывчатого вещества позволяет ожидать, что для таких композитов будут справедливы тенденции изменения свойств взрывчатых составов при уменьшении зерна до десятков нанометров. В то же время, характерный размер частиц остается на уровне нескольких микрон, что упрощает правила обращения с такими составами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 18-03-00441).

NANOSTRUCTURED HE-BASED COMPOSITES WITH EMBEDDED SINGLE-WALL CARBON NANOTUBES

E. R. Prueel, A. O. Kashkarov, A. P. Ershov,
I. A. Rubtsov, N. P. Satonkina,
K. A. Ten, G. R. Dashapilov

Lavrentiev Institute of Hydrodynamics, RAS Siberian Branch,
Novosibirsk, Russia
Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

Parameters at the high-explosive (HE) detonation front just like the sensitivity to the external actions are strongly dependent on the initial structure of the charge. The charge porosity as well as the original size of the individual particles also including the particles compacted to the near-maximum density are of importance. Changes in behavior are observed as the grain size is reduced down to tens of nanometers. This suggests that the typical scales of the processes in the detonation front are at least of the same order.

It was established that embedding of single-walled carbon nanotubes into the HE materials in amounts of 0.5 % wt. made it possible to obtain nanostructured composites having the typical scale of inhomogeneities equal to several tens of nanometers. In this case, the size of individual particles ranges from several microns to tens of microns. The presence of pores in the obtained nanocomposites with the size ranging from tens to hundreds of nanometers is supported by the SEM data. Analysis of the charge internal structure by the low-angle X-ray scattering of the synchrotron radiation beam gives the average pore size equal to 32 nm for PETN, 43 nm for RDX, 40 nm for TNT.

The electrical conductivity measurement behind the detonation front of RDX nanocomposites revealed no considerable differences as compared to pure RDX charges of the same particle density and dispersion. However, it turned out that experimentally the average detonation velocity of the composite was notably higher, approximately by 0.2 km/s.

Velocity of the interface between the RDX composite and the plexiglass was registered to show that the velocity profiles of this interface differ noticeably from the ones observed with pure RDX. For each composition, the interface velocity is at first greater than the estimated Chapman-Jouget point and then it gradually decreases, which adequately depicts the state evolution behind the detonation front. For the composite with the embedded nanotubes, this decrease is considerably faster and the estimated Chapman-Jouget state is attained much earlier. Hence, the reaction in the composite proceeds faster.

Thus, embedding of the single-wall carbon nanotubes into the HE charges causes us to anticipate that for such composites, the tendencies to changes in the HE composition behavior with the grain-size decrease down to tens of microns would be fair. At the same time, the particle typical size does not exceed several microns, thus simplifying the handling rules for such compositions.

This work was supported by RFBR (project code 18-03-00441).

2-37

ПРЕМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ПОРОШКООБРАЗНОГО ОБРАЗЦА ДЛЯ ЕГО ИДЕНТИФИКАЦИИ

А. Х. Рудина, О. В. Костицын,
Н. П. Тайбинов, И. В. Чемагина,
А. В. Станкевич, А. В. Соболевская, А. Н. Грецова

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

В докладе представлены результаты анализа порошкообразного образца рентгеноструктурным, энергодисперсионным, спектрометрическим, термическим методами.

Проведен анализ химического состава порошкообразного образца методом ИК-Фурье спектрометрии, зарегистрировано присутствие октогена и хлорсодержащих веществ. Выполнен анализ фазового состава и степени кристалличности методом рентгеновской дифрактометрии, зарегистрировано присутствие в образце аморфно-кристаллических и кристаллических фаз: β -октоген (P21/n), бор (R-3m), свинец (Fm-3m), сплавы (Fe, Ni, Cr, Ti, Cu, Zn). Степень кристалличности образцов 81,3 %.

Методами энергодисперсионного анализа, рентгеновской дифрактометрии, ИК-Фурье спектрометрии и термоанализа проанализирован химический состав порошкообразного образца, выявлено предположительное соотношение органических и неорганических составляющих: ~70/30 масс.%. Неорганическая часть образца состоит на ~70% из свинца, ~10 масс.% из бора, ~20 масс.% из металлов и различных примесей, а органическая – на ~90 масс.% из октогена, остальное – примеси.

PHYSICOCHEMICAL METHODS OF POWDERED SAMPLE ANALYSIS AND IDENTIFICATION

A. Kh. Rudina, O. V. Kostitsyn,
N. P. Taibinov, I. V. Chemagina,
A. V. Stankevich, A. V. Sobolevskaya, A. N. Gretsova

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

The X-ray diffraction, energy-dispersive, spectrometric, and thermal methods were used to analyze the powdered sample and results of this investigation are presented.

Chemical composition of the powdered sample analyzed via the IR-Fourier spectrometry was recorded to include HMX and chlorine substances. Phase composition and crystallinity degree were analyzed via the X-ray diffractometry and it was recorded that the sample has the following amorphous-crystalline and crystalline phases: β -HMX {HMX (P21/n), boron (R-3m), lead (Fm-3m), alloys (Fe, Ni, Cr, Ti, Cu, and Zn). Crystallinity degree of the sample was 81.3%.

Energy-dispersive method, X-ray diffractometry, IR-Fourier spectrometry, and thermal analysis were used to analyze chemical composition of the powdered sample. The proportion of the organic and inorganic components was revealed to be ~70/30 weight %. Inorganic components are ~70% lead, ~10 weight % boron, ~20 weight % metals and various admixtures. And organic components are ~90 weight % HMX, the rest are admixtures.

2-38

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Д. Н. Садовничий¹, Ю. М. Милёхин¹,
С. А. Лопаткин², Т. С. Скрипина²,
С. А. Малинин¹, И. Н. Гросс¹

¹Федеральный центр двойных технологий «Союз»,
Дзержинский, Россия

²Национальный исследовательский Томский
политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: soyuz@fcdt.ru, tpu@tpu.ru

Инициирование воспламенения энергетических конденсированных систем (ЭКС) обычно осуществляется при подводе тепла к их поверхности. Нагрев материалов с использованием переменного электрического поля позволяет повышать температуру почти равномерно по достаточно большому объему, величина которого зависит от диэлектрических свойств материала и частоты воздействующего электрического поля. Это означает, что с использованием переменного напряжения можно осуществлять нагрев до воспламенения достаточно массивных объектов. До настоящего времени особенности воспламенения и взрыва ЭКС на промышленной частоте 50 Гц остаются мало изученными [1, 2].

Цель настоящей работы заключалась в экспериментальном изучении особенностей взрывного воспламенения в переменном электрическом поле с частотой 50 Гц ЭКС на основе тринитрата глицерина (НГЦ), перхлората аммония (ПХА), октогена и алюминиевого порошка.

Эксперименты по воспламенению выполняли с использованием однофазного трансформатора ИОМ-100/25, который позволял получить переменное напряжение с частотой 50 Гц и амплитудой до $U = 140$ кВ. Зарядное напряжение изменяли с помощью автотрансформаторного регулятора напряжения. Для определения диэлектрических свойств ЭКС в области частот электрического поля от 40 до 10^6 Гц применяли автобалансируемый мост Agilent 4294A, а также измеритель иммитанса E7-20 для диапазона частот от 20 до $5 \cdot 10^5$ Гц.

При воздействии переменного напряжения, создаваемого трансформатором ИОМ-100/25, обнаружено интенсивное газовыделение и далее воспламенение,

которому для образцов ЭКС не содержащих ПХА в ряде случаев предшествовало взрывное разрушение поверхности или объема. Показано, что наличие в составе ЭКС тринитрата глицерина и ПХА вызывает резкое снижение времени до их воспламенения в переменном электрическом поле с частотой 50 Гц. Установлено, что температурные зависимости диэлектрических свойств ЭКС рассматриваемого типа обладают особенностью – в определенном температурном диапазоне на частоте 50 Гц имеется область отрицательного температурного коэффициента изменения тангенса угла диэлектрических потерь, связанного с особенностями диэлектрической релаксации. Для анализа условий воспламенения использовали теорию теплового пробоя. Выполненный анализ показал, что аномалию воспламенения ЭКС, содержащих ПХА и НГЦ, можно объяснить с привлечением представлений о возможности формирования двойного электрического слоя в приэлектродной области, где и образуется очаг воспламенения. В ЭКС, содержащих НГЦ, октоген и алюминиевый порошок, закономерности воспламенения могут быть удовлетворительно описаны моделью теплового пробоя диэлектриков.

Литература

1. Д. Н. Садовничий, Ю. М. Милёхин, С. А. Лопаткин и др. // Физика горения и взрыва. – 2019. – Т. 55. – № 2.
2. Д. Н. Садовничий, Ю. М. Милёхин, С. А. Лопаткин и др. // Сборник трудов Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики (ФППСМ-2018). – 2018. – С. 14–16. http://conf.niipmm.tsu.ru/Content/Doc/FPPSM_2018_NIIPMMTSU.pdf

IGNITION OF ENERGY CONDENSED SYSTEMS IN A ALTERNATING ELECTRIC FIELD

D. N. Sadovnichii¹, Yu. M. Milekhin¹, S. A. Lopatkin²,
T. S. Skripina², S. A. Malinin¹, I. N. Gross¹

¹Federal Center for Dual Technologies “Soyuz”,
Dzerzhinsky, Russia

²National Research Tomsk Polytechnic University,
Tomsk, Russia

E-mail: soyuz@fcdt.ru, tpu@tpu.ru

The initiation of ignition of energetic condensed systems (ECS) is usually carried out when heat is applied to their surface. Heating materials using an alternating electric field makes it possible to increase the temperature almost uniformly over a sufficiently large volume, which depends on the dielectric properties of the material and the frequency of the applied electric field. This means that using an AC voltage, it is possible to heat enough massive objects to ignite. Until now, the features of ignition and explosion of ECS at an industrial frequency of 50 Hz have remained poorly studied [1, 2].

The purpose of this work was to experimentally study the characteristics of explosive ignition of ECS based on glycerol trinitrate (NG), ammonium perchlorate (AP), octogen and aluminum powder in an alternating electric field with a frequency of 50 Hz.

Ignition experiments were carried out using a single-phase IOM-100/25 transformer, which allowed us to obtain an alternating voltage with a frequency of 50 Hz and an amplitude of up to $U = 140$ kV. The charging voltage was changed using an autotransformer voltage regulator. To determine the dielectric properties of the ECS in the frequency range of the electric field from 40 to 10^6 Hz, the Agilent 4294A auto-balanced bridge was used, as well as the E7-20 immittance meter for the frequency range from 20 to $5 \cdot 10^5$ Hz.

When exposed to an alternating voltage generated by the IOM-100/25 transformer, intense gassing and further ignition were detected, which for ECS specimens not containing AP in some cases was preceded by explosive destruction of the surface or volume. It is shown that the presence of glycerin trinitrate and AP in the composition of the ECS causes a sharp decrease in time before their ignition in an alternating electric field with a frequency of 50 Hz. It was found that the temperature dependences of the dielectric properties of the ECS of the type under consideration have a feature: in a certain temperature range at a frequency of 50 Hz, there is a region of negative temperature coefficient of change in the tangent of the dielectric loss angle that associates with the features of dielectric relaxation. To analyze the conditions of ignition, the theory of thermal breakdown was used. The analysis performed showed that the anomaly of ignition of the ECS containing AP and NG can be explained with the assistance of representations of the possibility of forming the electric double layer in the near-electrode region, where the center of ignition is formed. In ECS, containing NG, octogen and aluminum powder, ignition patterns can be satisfactorily described by the model of thermal breakdown of dielectrics.

References

1. D. N. Sadovnichii, Yu. M. Milekhin, S. A. Lopatkin et al. // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2019. – V. 55. – No. 2
2. D. N. Sadovnichii, Yu. M. Milekhin, S. A. Lopatkin et al. // Proceedings of the Fundamental and Applied Problems of Mechanics), September 3–5, 2018, Tomsk, pp. 14–16. http://conf.niipmm.tsu.ru/Content/Doc/FPPSM_2018_NIIPMMTSU.pdf

2-39

РАЗРАБОТКА ЭЛАСТИЧНОГО ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОГО МАТЕРИАЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОРОШКООБРАЗНОГО ЭЛАСТОМЕРА

А. С. Сальников, Н. И. Сальникова,
Р. Ш. Гарифуллин, В. Я. Базотов

Казанский национальный исследовательский
технологический университет, Казань, Россия

E-mail: Lucifer21@yandex.ru, Natalya.torutkina@bk.ru,
rus-garifullin@yandex.ru, bazotov@kstu.ru

В работе представлены результаты исследования по разработке перспективного эластичного энергонасыщенного материала (ЭНМ) на основе RDX, в состав

которого синтетический каучук, как компонент связующего, вводился в виде порошка с дисперсностью менее 1 мм. Поскольку промышленные технологии изготовления эластичных ЭНМ связаны с введением полимерного связующего в виде растворов в легколетучих растворителях, использование порошкообразного связующего, пластифицируемого дибутилфталатом в процессе смешения компонентов, позволяет значительно сократить длительность технологического цикла. Получаемый таким образом состав не уступает штатным аналогам по скорости детонации (7700 м/с при плотности 1580 кг/м³), обладает критическим диаметром, равным 3 мм и может быть рекомендован для зарядов, применяемых для упрочнения металлов взрывом.

DEVELOPMENT OF ELASTIC ENERGY SATURATED MATERIAL USING A POWDERED ELASTOMER

A. S. Salnikov, N. I. Salnikova,
R. Sh. Garifullin, V. Ja. Bazotov

Kazan National Research Technological University, Kazan,
Russia

E-mail: Lucifer21@yandex.ru, Natalya.torutkina@bk.ru,
rus-garifullin@yandex.ru, bazotov@kstu.ru

The paper presents the results of a study on the development of a promising elastic energy-saturated material (ENM) based on RDX, in which synthetic rubber, as a binder component, was introduced in the form of a powder with a dispersion of less than 1 mm. Since industrial technologies for the production of elastic INM are associated with the introduction of a polymeric binder in the form of solutions in volatile solvents, the use of a powdered binder, plasticized by dibutyl phthalate in the process of mixing components, can significantly reduce the duration of the technological cycle. The composition obtained in this way is not inferior to the standard analogues in detonation velocity (7700 m/s at a density of 1580 kg/m³), has a critical diameter equal to 3 mm and can be recommended for charges used to harden metals by explosion.

2-40

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ ОБОЛОЧКИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ПЛОСКИХ ЗАРЯДАХ ИЗ НИЗКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ВВ НА ОСНОВЕ ТАТБ

С. М. Долгих, М. А. Соколов,
В. Н. Смирнов, Е. Б. Смирнов

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

E-mail: sokolovm1982@mail.ru

К характеристикам, определяющим основные детонационные свойства ВВ, относятся критическая толщина детонации, форма детонационного фронта, размер зоны химической реакции. Все эти параметры не постоянны и зависят от различных факторов, связанных как с технологией изготовления ВВ, так и с условиями применения данного ВВ. Существенное влияние на величину этих характеристик оказывает наличие оболочки.

В данной работе исследовалось влияние оболочки и ее динамической жесткости на распространение детонации в плоских зарядах из низкочувствительного ВВ на основе ТАТБ, в том числе и при разной начальной пористости ВВ. Требуемая пористость деталей из ВВ достигалась путем прессования. Для проведения экспериментальных исследований были выбраны следующие материалы: оргстекло, фторопласт, алюминий, бериллий, магний, медь.

В результате экспериментальных исследований получена зависимость критической толщины детонации от пористости исследуемого низкочувствительного ВВ. Показано влияние динамической жесткости оболочки на величину критической толщины детонации и эволюцию детонационного фронта.

EFFECT OF THE SHELL DYNAMIC RIGIDITY ON THE DETONATION PROPAGATION IN PLANE CHARGES OF LOW-SENSITIVITY TATB-BASED HIGH EXPLOSIVE

S. M. Dolgikh, M. A. Sokolov,
V. N. Smirnov, E. B. Smirnov

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

E-mail: sokolovm1982@mail.ru

Characteristics that are responsible for the detonation properties of a high explosive (HE) include detonation critical thickness, detonation front shape, and size of the chemical reaction zone. These are variable parameters and they are controlled by different factors associated with both HE fabrication processing and conditions of this HE application. Presence of the shell plays a key role in the value of these characteristics.

The effect of the shell and its dynamic rigidity on the detonation propagation in plane charges of a low-sensitive TATB-based HE including various initial porosity of the HE are investigated in this work. The required porosity of the HE items was obtained by pressing. The following materials were selected for the experimental study: plexiglass, fluoroplastic, aluminum, beryllium, magnesium, and copper.

Dependence of the critical detonation thickness on the porosity of the studied low-sensitive HE was obtained in the experimental study. The effect of the shell dynamic rigidity on the value of the detonation critical thickness and the detonation front evolution are demonstrated.

2-41

**АНИЗОТРОПНАЯ
ТЕРМИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ
СПЛАВА АЛЮМИНИЙ-МАГНИЙ-ГРАФЕН**

А. В. Станкевич, О. В. Костицын,
Н. П. Тайбинов, А. Ю. Гармашев

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

Сплав алюминий-магний-графен (AlMgC_G) может найти применение в будущем и представляет определенный научный интерес. Однако, некоторые его фундаментальные свойства еще не изучены, например, термическая деформация (ТД). ТД материала учитывают при проектировании и изготовлении изделий и конструкций, разработке технологий и аппаратов. Известно несколько методик оценки ТД композиционных кристаллических материалов: dilatometria, терморентгенография и микротомография. Наиболее полное описание состояния вещества дает учет его анизотропии, т. е. свойств кристаллографической системы в целом, иными словами анизотропная термическая деформация (расширение и/или сжатие). Получить такую информацию можно опираясь на результаты терморентгенографии.

В данной работе произведена оценка анизотропной термической деформации сплава AlMgC_G . Представлены функциональные зависимости изменения параметров структуры сплава при термическом воздействии ($T = 145\div 700^\circ\text{K}$) в квазиизобарических условиях ($P = P_{\text{атм}}$). По данным рентгеноструктурного анализа на дифрактометрической станции методами PXRD определены параметры кристаллической структуры: метрика ячейки, постоянные решетки, элементарный объем, плотность и размерные характеристики субструктуры. Так же получены уточненные параметры тепловых колебаний кристаллической структуры сплава и статических смещений атомов в объеме элементарной ячейки.

**ANISOTROPIC THERMAL DEFORMATION
OF THE ALLOY
THE ALUMINIUM-MAGNESIUM-GRAPHENE**

A. V. Stankevich, O. V. Kostitsyn,
N. P. Taibinov, A. Yu. Garmashev

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

Aluminum-magnesium-graphene alloy (AlMgC_G) may find application in the future and is of some scientific interest. However, some of its fundamental properties have not yet been studied, for example, thermal deformation (TD). TD material taken into account in the design and manufacture of products and structures, the development of technologies and devices. There are several known methods of evaluation of TD crystalline composite

materials: thermo mechanics analysis (dilatometry), diffraction and micro-tomography. The most complete description of the state of the substance gives account of its anisotropy, i.e. properties of the crystallographic system as a whole, in other words anisotropic thermal deformation (expansion and/or compression). To obtain this information based on the results of thermo x-ray diffraction.

In this paper, the anisotropic thermal deformation of AlMgC_G alloy is estimated. Presents functional dependence of the changes of the structural parameters of the alloy during thermal exposure ($T = 145\div 700^\circ\text{K}$) in quasi-isobaric conditions ($P = P_{\text{атм}}$). According to x-ray diffraction analysis at the x-ray diffractometric station, the crystal structure parameters are determined by the PXRD methods: cell metric, lattice constants, elementary volume, density and size characteristics of the substructure. The refined parameters of thermal oscillations of the crystal structure of the alloy and static displacements of atoms in the volume of the unit cell are also obtained.

2-42

**ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ
С ГОРЮЧИМ ГАЗОВЫМ ПУЗЫРЕМ**

О. Г. Сутырин, П. Ю. Георгиевский, В. А. Левин

Научно исследовательский институт механики МГУ
им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: sutyrin@imec.msu.ru

Численно исследуется задача о взаимодействии сильной ударной волны с газовым пузырем, заполненным горючей газовой смесью (пропан, кислород, азот, ксенон) в двумерной плоской и осесимметричной постановке. Используется модель на основе уравнений Эйлера для смеси совершенных газов и одностадийная кинетика горения пропана. Описан процесс преломления падающей ударной волны, формирования поперечных скачков уплотнения и их фокусировки в двух возможных режимах – внешнем и внутреннем. Выявлены три различных режима инициирования детонации: (1) прямое инициирование при проникновении достаточно интенсивной ударной волны внутрь горючего пузыря, (2) инициирование вблизи тройной точки, формирующейся внутри пузыря при преломлении падающей волны меньшей интенсивности и (3) инициирование в точке фокусировки внутри пузыря волны еще меньшей интенсивности. Исследована зависимость режима воспламенения горючего пузыря от основных параметров задачи – числа Маха падающей волны, плотности смеси в пузыре (объемной доли утяжеляющего компонента – ксенона) и формы пузыря. Показано, что помимо интенсивности падающей волны и состава смеси в пузыре, форма пузыря также играет ключевую роль: за счет изменения формы пузыря можно добиться инициирования детонации за счет эффективной фокусировки ударной волны,

интенсивности которой недостаточно для воспламенения пузыря круглой формы или наоборот, избежать воспламенения при прочих равных.

Работа выполнена в НИИ механики МГУ имени М. В. Ломоносова с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М. В. Ломоносова при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 16-29-01092 и 18-01-00793).

DETONATION INITIATION UPON INTERACTION OF A SHOCK WITH COMBUSTIBLE GAS BUBBLE

O. G. Sutyurin, P. Yu. Georgievskiy, V. A. Levin

Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia

E-mail: sutyurin@imec.msu.ru

Interaction of a strong shock wave with gas bubble filled with reactive gas mixture (propane, oxygen, nitrogen, xenon) is studied numerically in two-dimensional plane and axisymmetric formulation. A model based on Euler's equations of a mixture of perfect gases and one-stage propane combustion kinetics is used. The processes of incident shock refraction, transversal shocks formation and their focusing in two possible patterns – external and internal are described. Three different detonation initiation regimes are revealed: (1) direct initiation upon transition of sufficiently intensive shock into the combustible bubble, (2) initiation near the triple point formed inside the bubble upon refraction of weaker incident shock and (3) initiation upon even weaker shock focusing inside the bubble. A dependence of ignition regime on main flow parameters – incident shock Mach number, bubble gas mixture density (volume fraction of heavy component – xenon) and bubble shape is studied. It is shown that besides the incident shock intensity and bubble gas mixture composition, the shape of the bubble also plays the key role, enabling ignition by otherwise insufficiently strong shock or on the contrary, disabling ignition by otherwise successful flow parameter combination.

This study was performed according to the research plan of Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University using the equipment of the shared research facilities of HPC computing resources of MSU with partial financial support of the Russian Foundation for Basic Research (projects nos. 16-29-01092 and 18-01-00793).

2-43

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ТОНКИХ ПРЕГРАД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ РАЗЛОЖЕНИЯ ВВ ВБЛИЗИ ФРОНТА ДЕТОНАЦИИ

В. И. Таржанов, А. В. Воробьев, А. Н. Еськов,
Д. П. Кучко, М. А. Ральников, Р. В. Комаров

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

Известные на сегодня экспериментальные данные по ударной сжимаемости нереагирующих ВВ получены в диапазоне низких давлений $p \leq 15$ ГПа. С другой стороны, в последние годы фотоэлектрическим и лазерно-интерферометрическим методами с высоким временным разрешением зарегистрированы параметры мощных и промышленных ВВ на пике Неймана (химпике), которые трактуются как точки ударной адиабаты ВВ, не реагирующего какое-то малое время за детонационным фронтом. Закономерны вопросы – в течение какого времени остается ВВ нереагирующим за фронтом, остается ли оно нереагирующим при повторном нагружении выше пика Неймана?

Предложен экспериментальный метод, позволяющий установить возможность разложения ВВ за фронтом детонации вблизи него – метод тонких преград с лазерно-интерферометрической диагностикой. Проведены эксперименты, в которых при совмещении лазерно-интерферометрических методик VISAR, Фабри-Перо и лазерно-гетеродинной методики (PDV) диагностировалось ускорение фольг из разных металлов (Al, Cu, Ni) с толщинами 0,03–0,3 мм, устанавливаемых на поверхности зарядов пластифицированного ТАТБ, а также регистрировались детонационные профили через окно из LiF. Получены экспериментальные точки для ударной адиабаты повторного сжатия ВВ из состояния на пике Неймана в диапазоне давлений (1–2,3) pN, а также точки, соответствующие состояниям ВВ после однократной и двукратной разгрузки из состояний повторного нагружения. Оценочно построены кривые разгрузки, лежащие выше равновесной кривой торможения продуктов взрыва.

В целом новые результаты, полученные в диапазоне времен 10–300 нс, демонстрируют перспективность исследования состояний ВВ в зоне химпика методом тонких преград с лазерно-интерферометрической диагностикой.

USING METHOD OF THIN BARRIERS FOR INVESTIGATION OF HE DECOMPOSITION KINETICS NEAR DETONATION FRONT

V. I. Tarzhanov, A. V. Vorobyev, A. N. Eskov,
D. P. Kuchko, M. A. Ralnikov, R. V. Komarov

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

Currently available experimental data on shock compressibility of unreactive explosives were obtained in the range of low pressures $p \leq 15$ GPa. On the other hand, in recent years, photo-electrical and laser-interferometric methods with high time resolution registered parameters of powerful and commercial explosives on Neumann peak (chemical peak) that are treated as the points of the Hugoniot, in which explosives do not react within some short time behind the front. The question is – what is the time, during which explosive remains unreactive behind the front, does it remain unreactive under repeated loading above Neumann peak?

Experimental method was proposed, which permits to establish the possibility of explosive decomposition behind the detonation front – method of thin barriers with laser-interferometric diagnostics. Experiments were conducted, in which the combination of laser-interferometric methods VISAR, Fabri-Pero and laser-heterodyne technique (PDV) registered acceleration of foils out of various metals (Al, Cu, Ni) with thicknesses 0.03–0.3 mm that were installed on the surface of plasticized TATB charges; besides, registration was made of detonation profiles through LiF window. One obtained experimental points for Hugoniot of repeated HE loading from a state on Neumann peak in the range of pressures (1–2,3) pN, and the points corresponding to HE state after a single and double unloading from a state of repeated loading. Estimate unloading curves were built, which are situated above the equilibrium curve of explosion product braking.

On the whole, the new results obtained for the time range 10–300 ns demonstrate the promising character of investigation into HE state in chemical peak zone by method of thin barriers with laser-interferometric diagnostics.

2-44

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕТОНАЦИИ В СУБМИКРОННЫХ И НАНОДИСПЕРСНЫХ ВЗВЕСЯХ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ

Т. А. Хмель, С. А. Лаврук, С. И. Толкачева

Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: khmel@itam.nsc.ru

Представлены результаты численного моделирования детонации в плоских каналах, областях с расшире-

нием в моно- и бидисперсных взвесах частиц алюминия различных концентраций. Показано, что переход от диффузионного режима горения микрочастиц к кинетическому режиму наночастиц обуславливает качественные различия режимов ячеистой детонации и критических условий распространения и срыва. В частности, немонотонная зависимость критической ширины канала от угла расширения сменяется на монотонную зависимость, состоящую из двух линейных участков (типичную для газовой детонации), в нанодисперсных взвесах. Отмечены отличия картин детонации за косым уступом в различных режимах (закритическом, критическом и со срывом детонации). Вырождение ячеистой детонации в бидисперсных микронных взвесах сменяется на режимы с сохранением ячеек и постепенным изменением их размера. Таким образом, изменение состава и дисперсности взвесей алюминия позволяет управлять характеристиками гетерогенной детонации, а в перспективе и гибридной детонации реагирующих газовых смесей с частицами алюминия.

MODELLING OF THE DETONATION PROCESSES IN SUBMICRON AND NANODISPERSE SUSPENSIONS OF ALUMINIUM PARTICLES

T. A. Khmel, S. A. Lavruk, S. I. Tolkacheva

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics
SB RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: khmel@itam.nsc.ru

The results of numerical simulation of detonation in flat channels and volumes with expansion in mono- and bi-dispersed suspensions of aluminum particles of various concentrations are presented. It is shown that the transition from the diffusion mode of combustion of micron-sized particles to the kinetic mode of nanoparticles causes qualitative differences in the modes of cellular detonation and critical conditions of detonation propagation and failure. In particular, the non-monotonic dependence of the critical channel width on the angle of expansion is replaced by a monotonic dependence, consisting of two linear sections (typical for gas detonations), in nanodispersed suspensions. Differences in detonation patterns behind an inclination angle in different modes (supercritical, critical and with detonation failure) are noted. The degeneration of cellular detonation in bi-dispersed micron suspensions is replaced by regimes with the preservation of cells and a gradual change in their size. Thus, a change in the composition and dispersion of aluminum suspensions allows one to control the characteristics of heterogeneous detonation and, in perspective, hybrid detonation of reacting gas mixtures with aluminum particles.

2-45

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НАНОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ АЛЮМИНИЯ, НИКЕЛЯ И МЕДИ НА ТЕРМИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ТАТБ

И. В. Чемагина, А. Ю. Гармашев, О. В. Костицын,
Н. П. Тайбинов, А. Ю. Тарасов,
Т. В. Антипова, Ю. А. Шахторин

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

В докладе представлены результаты экспериментов по исследованию влияния на температуры разложения и теплового взрыва ВВ ТАТБ порошков металлов, размер частиц которых лежит в нанометровом диапазоне.

Исследовались механические смеси ВВ ТАТБ с нанодисперсным порошком металла (алюминия, меди или никеля). Процентное соотношение ТАТБ/металл варьировалось от 99:1 до 90:10 % масс.

Термический анализ образцов смесевых ВВ проводился на термогравиметрическом анализаторе (ТГА) и дифференциально-термическом анализаторе (ДТА). Также были проведены эксперименты по термическому разложению смесевых ВВ в условиях, близких к условиям теплового взрыва с укрупнёнными навесками (масса ~10 г).

Исследования показали, что добавление к ВВ ТАТБ нанопорошков алюминия, никеля и меди приводит к уменьшению температур начала разложения, начала интенсивного разложения и теплового взрыва. По степени влияния на показатели термостойкости ТАТБ нанодисперсные металлы можно расположить в ряд: медь – никель – алюминий в порядке уменьшения.

Установлено, что добавление нанопорошков алюминия, никеля и меди к ТАТБ приводит к увеличению теплового эффекта реакции разложения ТАТБ. Самый высокий тепловой эффект реакции разложения смесей наблюдался при добавлении нанодисперсного порошка никеля, добавление нанодисперсных порошков алюминия и меди дают тепловые эффекты примерно одного уровня.

EFFECT OF ADDED NANODISPERSED POWDERS OF ALUMINUM, NICKEL, AND COPPER ON THERMAL DECOMPOSITION OF TATB

I. V. Chemagina, A. Yu. Garmashev, O. V. Kostitsyn,
N. P. Taibinov, A. Yu. Tarasov,
T. V. Antipova, Yu. A. Shakhtorin

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

The paper presents results of experiments intended to investigate how temperature of the TATB decomposition and cook-off depends on powdered metals when their particles size is within the nanometer range.

Consideration was given to mechanical mixtures of TATB with a nanodispersed powdered metal (aluminum, copper, and nickel). TATB/metal percentage ratio varied from 99:1 to 90:10 weight %.

Both thermal gravimetric analyzer and differential-thermal analyzer were used for thermal analysis of composite explosives. Experiments to study thermal decomposition of mixed explosives were performed in conditions close to those of the cook-off with enlarged weighed portions (~10 g).

Our investigations demonstrated that nanopowders of aluminum, nickel, and copper added to TATB reduce temperatures of decomposition onset, intensive decomposition onset, and cook-off.

As for the effect on the TATB thermal stability, nanodispersed metals can be ranged in order of descending: copper – nickel – aluminum.

Addition of nanopowdered aluminum, nickel, and copper to TATB is stated to increase heat of the TATB decomposition reaction. The highest heat of the decomposition reaction is observed with added nanodispersed powder of nickel. And addition of nanodispersed powders of aluminum and copper is stated to give approximately the same heat effect.

2-46

ОКИСЛЕНИЕ ПОРОШКА АСД-4, МОДИФИЦИРОВАННОГО ФОРМИАТАМИ Mn, Fe, Co, Ni, Cu

В. Г. Шевченко, В. Н. Красильников,
Д. А. Еселевич, А. В. Конюкова

Институт химии твердого тела УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

E-mail: shevchenko@ihim.uran.ru

Для улучшения характеристик твердого ракетного топлива используются высокоэнергетические металлические порошки. Наиболее широкое применения в качестве металлических горючих нашли порошки алюминия. Проблемы высоких защитных свойств оксидной пленки на поверхности частиц металла решены за счет пропитки порошка Al насыщенными растворами формиатов $M(\text{HCOO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ($M = \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Cu}$). Установлено, что термитные реакции с оксидами металлов инициируют начало активного окисления алюминия. Образование жидкой фазы при взаимодействии оксидов алюминия и *d*-металлов приводит к резкому ускорению окисления. Работа выполнена по госбюджетной теме № АААА-А16-116122810219-4

OXIDATION OF ASD-4 POWDER MODIFIED BY FORMATE Mn, Fe, Co, Ni, Cu

V. G. Shevchenko, V. N. Krasilnikov,
D. A. Eselevich, A. V. Konyukova

Institute of Solid State Chemistry UB RAS,
Ekaterinburg, Russia

E-mail: shevchenko@ihim.uran.ru

To improve the performance of solid rocket fuel, high-energy metallic powders are used. Aluminum powders have found the widest application as metal combustible. The problems of high protective properties of the oxide film on the surface of metal particles are solved by impregnating Al powder with saturated solutions of $M(\text{HCOO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ formates ($M = \text{Mn, Fe, Co, Ni, Cu}$). It has been established that thermite reactions with metal oxides initiate the onset of active oxidation of aluminum. The formation of a liquid phase in the interaction of aluminum and d -metals leads to a sharp acceleration of oxide. The research was carried out within the state assignment of FASO of Russia (theme № АААА-А16-116122810219-4)

Соответствующие эксперименты проведены на установке НТСФ. Установка представляет собой трубу с внутренним диаметром $D_0 = 27,3$ см длиной 21,3 м. Ускорение пламени стимулируется препятствиями, помещенными внутри трубы по всей ее длине. В расчетах, как и в экспериментах, варьировался состав смеси исходя из разного процентного содержания водорода. Эволюция этого течения при определенных условиях приводит к переходу горения в детонацию при перемещении фронта пламени вдоль трубы. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными показывает их хорошее согласие в разных режимах горения.

NUMERICAL INVESTIGATION INTO THE DETONATION TRANSITION OF THE HYDROGEN-AIR MIXTURE IN THE EXPERIMENTS USING HTCF

O. G. Sin'kova, V. P. Statsenko, Yu. V. Yanilkin

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

2-47

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДА К ДЕТОНАЦИИ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ОПЫТАХ НА УСТАНОВКЕ НТСФ

О. Г. Синькова, В. П. Стаценко, Ю. В. Янилкин

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

С помощью кода FIRECON выполнено прямое 3D численное моделирование развития турбулентного горения в водородовоздушной смеси. Данный код разработан на основе методики ЭГАК с использованием метода концентраций, в котором горючая и сгоревшая смеси объявляются разными компонентами со своими уравнениями состояния. Кроме того, отдельным абсолютно несжимаемым компонентом объявляется и вещество элементов конструкции. Горючая смесь может состоять из 4 элементов: водорода, воды, кислорода и азота.

The code FIRECON was used to perform 3D numerical simulation of the turbulent combustion evolution in a hydrogen-air mixture. This code is designed with the help of the EGAK technique using the concentration method wherein the combustible and burnt-out mixtures are referred to as different components having their own equations of state. Furthermore, the structural element material is referred to as an isolated perfectly incompressible component. The combustible mixture might consist of 4 components: hydrogen, water, oxygen, and nitrogen.

The HTCF was used to carry out the required experiments. The facility is configured as a tube with the internal diameter $D_0 = 27.3$ cm and 21.3 m in length. The flame acceleration is driven by the obstacles located inside the tube throughout its length. In both computations and experiments, the mixture composition varied depending on various percentages of hydrogen. Evolution of this flow under certain conditions leads to the detonation transition when the flame front displaces along the tube. The numerical simulation results are compared to the experimental data to demonstrate their close agreement in different modes of combustion.

Секция 3

ЯВЛЕНИЯ В ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ

Section 3

DENSE PLASMA PHENOMENA

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ
МОДЕЛЬ ФИЗИЧЕСКОГО ВАКУУМА
И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЕ К ПРОБЛЕМЕ
МАГНИТНЫХ ЗАРЯДОВ**

А. М. Маренный¹, М. В. Астафурова²,
В. И. Астафуров¹

¹ФГУП Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены ФМБА России, Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

E-mail: astafurova.maria@mail.ru

Физический вакуум (и материальный мир в целом) рассматривается в модели как волновой векторный пространственно-электромагнитный континуум [1]. Пространственный вектор, имеющий три составляющих, характеризует пространство. Электромагнитный вектор, имеющий две составляющих, характеризует электромагнитное свойство материи.

Материальный мир рассматривается также как совокупность взаимосвязанных осцилляторов, образующих иерархические структуры. Наименьший, или «абсолютный», осциллятор является элементарной ячейкой физического вакуума и составляет его структурную основу. Радиус абсолютного осциллятора ($R_{абс}$) равен $2,135 \cdot 10^{-17}$ м.

Пространственно-электромагнитная модель позволяет с новых позиций подойти к решению проблемы магнитных зарядов.

Составляющие электромагнитного вектора абсолютного осциллятора можно рассматривать как два противоположных по знаку элементарных магнитных заряда. Эти взаимосвязанные квазичастицы находятся в непрерывном колебательном движении в пределах сферы радиусом $R_{абс}$. Энергия связи магнитных зарядов принимается равной энергии аннигиляции электрона и позитрона. В рамках такого рассмотрения процесс рождения пары «электрон – позитрон» является собой превращение магнитных зарядов в электрические, а процесс аннигиляции электрона и позитрона – превращение электрических зарядов в магнитные.

Магнитный монополю рассматривается в модели как гипотетическая квазичастица в составе взаимосвязанной пары противоположных магнитных зарядов в структуре физического вакуума. Магнитный монополю, как индивидуальная частица вещества, не существует в природе.

Двухполюсность постоянного магнита обусловлена и взаимосвязана с биполярной структурой физического вакуума. Магнитное поле вокруг постоянного магнита представляет собой поле квазиупругой деформации структуры физического вакуума. Характер деформации направлен на сведение к минимуму потенциальной энергии взаимосвязанной системы «магнит – физический вакуум».

Литература

1. Астафуров В. И. Построение функциональной зависимости, связывающей пространственные параметры фундаментальных иерархических структур со свойствами физического вакуума // Ядерная физика и инжиниринг. – 2013. – Т. 4. – № 8–9. – С. 862–866.

**THE SPACE-ELECTROMAGNETIC MODEL
OF THE PHYSICAL VACUUM
AND ITS APPLICATION TO THE PROBLEM
OF MAGNETIC CHARGES**

A. M. Marennyy¹, M. V. Astafurova², V. I. Astafurov¹

¹FSUE Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene, Moscow, Russia

²National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

E-mail: astafurova.maria@mail.ru

The model considers the physical vacuum (and the material world in general) as a wave vector spatial-electromagnetic continuum [1]. The space vector, having three constituencies, characterizes the space. The electromagnetic vector, having two constituencies, characterizes the electromagnetic property of matter.

The material world is considered also as an aggregate of interconnected oscillators, forming hierarchic structures. The least or “absolute” oscillator appears to be elemental cell of the physical vacuum and comprises its structural base. The radius of the absolute oscillator ($R_{абс}$) is $2.135 \cdot 10^{-17}$ m.

The spatial-electromagnetic model allows approaching the problem of magnetic charges from a new basis.

The components of the electromagnetic vector of an absolute oscillator can be considered as two opposite in sign elementary magnetic charges. These interconnected quasi-particles are in continuous oscillating movement within the limits of the sphere with radius $R_{абс}$. The binding energy of magnetic charges is assumed to be equal to the energy of the annihilation of the electron and the positron. Within the framework of such consideration, the process of formation of a pair “electron-positron” is the transformation of magnetic charges into electrical ones, and the process of annihilation of an electron and positron – the transformation of electrical charges into magnetic ones.

The magnetic monopole is considered in the model as a hypothetical quasi-particle in the composition of an interconnected pair of opposite magnetic charges in the structure of a physical vacuum. Magnetic monopole, as an individual particle of a substance, does not exist in nature.

The bipolar nature of the permanent magnet is conditioned and interconnected with the bipolar structure of the physical vacuum. The magnetic field around the permanent magnet is a field of quasi-elastic deformation of the physical vacuum structure. The nature of the deformation is aimed at minimizing the potential energy of an interconnected system “magnet – physical vacuum”.

References

1. Astafurov V. I. Construction of a functional relation between the spatial parameters of fundamental hierarchical structures and the properties of physical vacuum // *Yadernaya fizika i inzhiniring*. – 2013. – Vol. 4. – N 9–10. – P. 862–866. (In Russ.)

3-2

**РАСЧЕТЫ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ
УСТРОЙСТВ ТИПА ALT ДЛЯ БЕЗУДАРНОГО
СЖАТИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МАГНИТНОЙ
ИМПЛОЗИИ ЛАЙНЕРОВ**

А. М. Буйко, Г. Г. Иванова, И. В. Морозова

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

Представлены постановка и результаты уточненных расчетов устройств с дисковым взрывомагнитным генератором $\varnothing 0.4$ м и электровзрывным фольговым размыкателем тока, близких к экспериментам ALT-1,2 [1] и к проекту ALT-3 [2, 3], – с изменениями лайнерной нагрузки. Расчеты хорошо согласуются с экспериментом и показывают возможности устройств по магнитной имплозии лайнеров под действием токов до 60 МА (азимутальных магнитных полей до 10 МГс), – для безударного сжатия металлов до 20 Мбар, что может представить интерес для измерений изэнтроп этих металлов.

Литература

1. Buyko A. M., Gorbachev Y. N., Zmushko V. V. et al. Simulation of ATLAS parameters in explosive magnetic experiments ALT-1,2 // *Proc. of IX Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics*, M. – St.-Pet., July 7–14, 2002. Edited by V. D. Selemir, L. N. Plyashkevich. Sarov, VNIIEF, 2004. – P. 747–751.
2. Буйко А. М., Гаранин С. Ф., Глыбин А. М. и др. Уточнение параметров устройства для разгона лайнера до 20 км/с // *ПМТФ*. – 2015. – Т. 56, № 1. – С. 116–124.
3. Buyko A. M. Some promises of magnetic implosion of high-velocity condensed-matter liners in the alt-3 driver // *IEEE Transactions on PLASMA CIENCE*. – 2018. – Vol. 46, № 10. – P. 3512–3517.

**SIMULATIONS OF ALT-LIKE EXPLOSIVE
MAGNETIC SYSTEMS FOR RAMP
COMPRESSION OF MATERIALS BY
MAGNETICALLY IMPLoded LINERS**

A. M. Buyko, G. G. Ivanova, I. V. Morozova

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

The paper presents the setup and results of revised simulations of ALT-1,2 [1] and projected ALT-3-like [2, 3] systems with a 0.4-meter diameter explosive magnetic generator and an electrically exploded fuse opening switch (FOS) with varied liner load. The simulations closely

match the experiment and demonstrate magnetically-driven liner implosion capabilities of the systems with currents up to 60 MA (azimuthal magnetic fields up to 10 MG) as applied to ramp compression of metals to 20 Mbar, which can be of interest for measuring the isentropes of these metals.

References

1. Buyko A. M., Gorbachev Y. N., Zmushko V. V. et al. Simulation of ATLAS parameters in explosive magnetic experiments ALT-1,2 // *Proc. of IX Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics*, M. – St.-Pet., July 7–14, 2002. Edited by V.D. Selemir, L.N. Plyashkevich. Sarov, VNIIEF, 2004. – P. 747–751.
2. Buyko A. M., Garanin S. F., Glybin A. M. et al. Revision of driver parameters for liner acceleration to 20km/s // *PMTF*. – 2015. – V. 56, No 1 (116). – P. 116–124 [in Russian].
3. Buyko A. M. Some promises of magnetic implosion of high-velocity condensed-matter liners in the ALT-3 driver// *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2018. – Vol. 46, No. 10, – P. 3512–3517.

3-3

**УСКОРЕНИЕ ИОНОВ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ
В ДИОДАХ С МАГНИТНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ
И ИНДУКЦИОННЫХ УСКОРИТЕЛЯХ
С БЫСТРО НАРАСТАЮЩИМ
МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**

Е. Д. Вовченко, К. И. Козловский, А. Е. Шиканов,
А. А. Исаев, А. А. Плеханов

Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», Москва, Россия

В первой части доклада рассмотрены вопросы прямого ускорения дейтерия в сильноточном диоде с лазерно-плазменным источником ионов на аноде и магнитной изоляцией электронов. Диод имеет аксиально-симметричную геометрию электродов с внутренним высоковольтным анодом, на котором размещается лазерная мишень из TiD, и внешним катодом с нейтронообразующей мишенью. Ускорение дейтронов осуществляется преимущественно в радиальном направлении. Геометрия катода и нейтронообразующей мишени определяются вариантом реализации магнитной системы изоляции, предназначенной для подавления вторичной электронной эмиссии с катода.

Обсуждаются особенности применения изоляции электронов полем постоянных NdFeB магнитов и импульсным магнитным полем, генерируемым катушкой в виде конической спирали. Основная проблема подавления электронной проводимости полем постоянного магнита связана с высокой неоднородностью поля у полюсов, снижающей эффективность изоляции. В меньшей степени неоднородность магнитного поля проявляется в диоде с импульсной магнитной изоляцией. Для оценки перспектив генерации нейтронов в подобной системе выполнен расчет, кото-

рый указывает на возможность достижения выхода 6×10^8 нейтрон за импульс для ядерной реакции $D(d, n)^3\text{He}$ при энергии лазера 0,75 Дж и ускоряющем напряжении 300 кВ.

Вторая часть доклада посвящена коллективному ускорению ионов лазерной плазмы в быстронарастающем магнитном поле, генерируемом с помощью индукционной катушки в виде конической спирали. На основе коллекторных измерений исследована эффективность ускорения ионов при варьировании геометрии конической спирали и временной задержке между лазерным импульсом и началом нарастания магнитного поля. Для оптимального режима синхронизации определены средние и максимальные скорости ряда ионов, от легких (дейтерий, литий) до тяжелых (медь, свинец). Полученные экспериментальные данные сравниваются с расчетом, выполненным на основе разработанной теоретической модели.

**THE ACCELERATION OF IONS
OF A LASER PLASMA IN THE DIODE
WITH MAGNETIC INSULATION
AND INDUCTION ACCELERATORS
WITH A HIGH-SPEED MAGNETIC FIELD**

E. D. Vovchenko, K. I. Kozlovskii, A. E. Shikanov,
A. A. Isaev, A. A. Plekhanov

National Research Nuclear University «MEPhI»,
Moscow, Russia

The first part of the report deals with the direct acceleration of deuterium in a high-current diode with a laser-plasma ion source at the anode and magnetic isolation of electrons. The diode has an axially symmetric geometry of electrodes with an internal high-voltage anode, on which a laser target from TiD is placed, and an external cathode with a neutron-forming target. Acceleration of deuterons is carried out mainly in the radial direction. The type of magnetic insulation system designed to suppress secondary electron emission from the cathode determines the geometry of the cathode and the neutron-forming target.

Application features of isolation of electrons by a field of constant NdFeB magnets and the pulse magnetic field generated by a coil in the form of a conical spiral are discussed. The main problem of the suppression of electronic conductivity field of the permanent magnet is associated with a high heterogeneity of the magnetic field at the poles, reducing the effectiveness of insulation. To a lesser extent, the inhomogeneity of the magnetic field is manifested in the diode with pulsed magnetic isolation. To assess the prospects of neutron generation in such a system, a calculation is made that indicates the possibility of achieving a 6×10^8 neutrons output per pulse for the $D(d, n)^3\text{He}$ nuclear reaction at a laser energy of 0.75 J and an accelerating voltage of 300 kV.

The second part of the report is devoted to the collective acceleration of laser plasma ions in a high-speed magnetic field generated by an induction coil in the form of a conical spiral. Based on collector measurements, the efficiency of

ion acceleration is investigated for varying the geometry of the conical helix and the time delay between the laser pulse and the beginning of the magnetic field increase. The average and maximum velocities of a number of ions from light (deuterium, lithium) to heavy (copper, lead) were determined for the optimal synchronization mode. The obtained experimental data are compared with the calculation performed based on the developed theoretical model.

3-4

**ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ПИКОСЕКУНДНЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ
ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ
С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИШЕНЬЮ**

Н. Б. Волков^{1*}, С. В. Бархвостов¹, А. И. Липчак¹,
С. И. Ткаченко², А. П. Яловец³

¹Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Московский физико-технический институт
(государственный университет),

Долгопрудный, Московская область, Россия

³Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

*E-mail: nbv@iep.uran.ru

Пикосекундный релятивистский электронный пучок (РЭП) представляет собой хороший инструмент для изучения нелинейной динамики взаимодействия металлической мишени с пучком. Нами в [1] эта динамика изучалась с помощью лазерной интерферометрии по смещению тыльной поверхности металлической мишени при воздействии на мишень РЭП длительностью 500 пс. При сравнении результатов экспериментов [1] и моделирования, выполненного в рамках локально-равновесной однотемпературной модели взаимодействия РЭП с металлической мишенью [2], получено, что экспериментальные значения смещения существенно превышают расчетные. Последнее свидетельствует о необходимости более тщательного учета особенностей нелинейной динамики взаимодействия пикосекундного РЭП с металлической мишенью во время ее облучения и в течение первой наносекунды после его окончания. Цель нашего сообщения – обсуждение указанных особенностей.

Исследование взаимодействия пикосекундного РЭП с металлической мишенью и релаксация вещества мишени в течение первой наносекунды после окончания облучения ее РЭП проводится в рамках электронно-фононной гидродинамики. Используемая модель аналогична, предложенной в [3], с небольшим упрощением: мы пренебрегли макроскопическим движением вещества мишени. Проведено моделирование взаимодействия пикосекундного РЭП с металлической мишенью и релаксационных процессов, происходящих в веществе мишени с учетом волновых электромагнитных процессов в генераторе. Установлено, что ударная волна (УВ), приводящая к смещению тыльной поверхности мишени, формируется

в результате взаимодействия тока пучка и индуцированного им в мишени электронного тока. Смещение ионной компоненты вещества мишени происходит в результате раскочки пикосекундным РЭП ионно-звуковых колебаний (неравновесных фононов). Численная оценка смещения тыльной поверхности мишени в результате выхода УВ на свободную поверхность хорошо согласуется с экспериментально измеренным значением.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0389-2015-0023, а также при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-08-00466) и УрО РАН в рамках программы фундаментальных исследований (проект № 18-2-2-15).

Литература

1. S. V. Barakhvostov, N. B. Volkov, A. I. Lipchak, and et al. The slow relaxation of non-equilibrium state in metal target excited of non-equilibrium state in metal target excited by picosecond electron beam: interferometric and simulation studies. // arxiv:1806.0023 [physics.plasm-ph], 2018 (10 pp).
2. А. Я. Лейви, А. П. Яловец. Моделирование воздействия интенсивных потоков на вещество. – Челябинск: ИП Мякотин И. В., 2016. – 111 с.
3. N. B. Volkov, E. A. Chingina and A. P. Yalovets. Dynamical equations and transport coefficients for the metals at high pulse electromagnetic fields. // J. Phys.: Conf. Series, 2016. – V. 774. – Art. No 012147 (12 pp).

PECULIARITIES OF INTERACTION OF PICOSECOND RELATIVISTIC ELECTRON BEAMS WITH A METALLIC TARGET

N. B. Volkov^{1*}, S. V. Barakhvostov¹, A. I. Lipchak¹, S. I. Tkachenko², A. P. Yalovets³

¹Institute of Electrophysics, Russian Academy of Sciences, Ural Branch, Yekaterinburg, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Moscow Region, Russia

³South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia

*E-mail: nbv@iep.uran.ru

Relativistic electron beam (REB) of picosecond duration is a good tool for studying the nonlinear interaction dynamics of a metal target and the beam. We studied dynamics by means of laser interferometric measurement technique of the rear side displacement of the metal target irradiated by REB of 500 ps duration [1]. When comparing it was shown that experimental results of the displacement [1] significantly exceed the numerical values obtained in the framework of the local equilibrium one-temperature model of the REB interaction with a metal target [2]. It indicates the necessity for more careful consideration of peculiarities of the metal target interaction with the electron beam during its irradiation and of the first nanoseconds after. The purpose of the presentation is the discussion of these peculiarities.

The interaction of the picosecond REB with a metal target and the relaxation of the target material during the first nanosecond after it irradiation by REB within the framework of electron-phonon hydrodynamics were stud-

ied. It was used the model similar to proposed in [3] but with a slight simplification: we neglected the macroscopic motion of the target. REB interaction with the metallic target and its relaxation was simulated with an accounting of wave electromagnetic processes in the generator. It was established the shock wave (SW) leading to a displacement of rear side of the target results from electron current which was induced by the electron beam in the target. The displacement of ion component takes place as the result of the ion-acoustic oscillations (non-equilibrium phonons) caused by picosecond REB. The numerical displacement of the rear side of the target caused by the arrival of the SW to the free surface agrees well with the experimentally measured values.

The work carried out within the state order No 0389-2015-0023 and under the partial financial support from RFBR (project No 16-08-00466) and the Ural Branch of RAS within the UB RAS fundamental research program (project No 18-2-2-15).

References

1. S. V. Barakhvostov, N. B. Volkov, A. I. Lipchak, and et al. The slow relaxation of non-equilibrium state in metal target excited of non-equilibrium state in metal target excited by picosecond electron beam: interferometric and simulation studies. // arxiv:1806.0023 [physics.plasm-ph], 2018 (10 pp).
2. I. Y. Leyvi and A. P. Yalovets. Simulation of Power Plasma Flows Impact on Matter. – Chelyabinsk: IP Myakotin I. V., 2016. – 111 pp.
3. N. B. Volkov, E. A. Chingina and A. P. Yalovets. Dynamical equations and transport coefficients for the metals at high pulse electromagnetic fields. // J. Phys.: Conf. Series, 2016. – V. 774. – Art. No 012147 (12 pp).

3-5

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ И ВРЕМЕННЫХ МАСШТАБОВ В КОРОНЕ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРА С ПЛАЗМОЙ

С. И. Глазырин¹, А. В. Брантов^{1,2}, В. Ю. Быченков^{1,2}

¹Всероссийский научно-исследовательский институт автоматизации им. Н. Л. Духова, Москва, Россия

²Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Email: glazyrin@itep.ru

Лазеры являются мощными источниками энергии, позволяющими высаживать ее в компактных областях. При больших потоках излучения образуется плазменная корона, внутри которой около критической плотности и происходит энерговыделение. Существует набор лазер-плазменных неустойчивостей, которые модифицируют эту картину: эффективность поглощения меняется (в том числе область поглощения пространственно размывается), часть энергии отражается и рассеивается, часть уходит в виде горячих электронов. Развитие этих неустойчивостей зависит от свойств короны: ее температуры, а также характер-

ных масштабов. В докладе, на примере простых постановок и моделей, обсуждается масштабирование роли лазер-плазменных неустойчивостей с энергией лазера (от кДж до МДж) для условий близких к условиям в схемах лазерного термоядерного синтеза. Основное внимание будет уделено процессам аномального поглощения на ионно-звуковой турбулентности, возникающей за счет лазерной раскачки ионно-звуковой неустойчивости.

INFLUENCE OF SPATIAL AND TEMPORAL SCALES OF LASER CORONA ON LASER-PLASMA INTERACTION

S. I. Glazyrin¹, A. V. Brantov^{1,2}, V. Yu. Bychenkov^{1,2}

¹Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA), Moscow, Russia

²Lebedev Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Email: glazyrin@itep.ru

Lasers are powerful sources of energy that deposit it in spatially compact regions. For high intensities the plasma corona is formed and laser is absorbed at critical density. Laser-plasma instabilities alter this picture: the efficiency of absorption changes (also the absorption region could be spatially smoothed), part of energy is reflected or scattered, part is carried out by hot electrons. The development of the instabilities depends on corona properties: its temperature and scales. In the paper we discuss with simple models the scaling of laser-plasma instabilities with laser energy (from kJ to MJ) for inertial confinement fusion conditions. The major focus will be on anomalous absorption on ion-acoustic turbulence, generated by laser-induced ion-acoustic instability.

3-6

ОБ ИМПЕДАНСНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ РАЗЛЕТА ГОРЯЧЕЙ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

В. М. Губченко

Институт прикладной физики РАН,
Нижний Новгород, Россия

E-mail: ua3thw@appl.sci-nnov.ru

Разлет космической и лазерной плазмы, как правило, происходит относительно внешних окружающих ее электродинамических элементов различной геометрии и природы, что влияет на разлет. Это сфера поверхности для звездных корон, кольцевой ток внутренней намагниченности для магнитосфер, плоскости и соленоиды в составе лазерных мишеней. Плазма разлета при этом возникает как горячая и бесстолкновительная и должна рассматриваться кинетически с учетом эффектов затухания на «резонансных»

электронах и эффектах электронной гидродинамики – «нерезонансного» взаимодействия. При таких разлетах в плазме формируются крупномасштабные токовые системы и соответствующие им амбиполярные и электромагнитные поля, создающие магнитные 3D структуры высокого давления слабо замагниченной плазмы, – это удерживаемые «диамагнитные облака» и «области магнитного пересоединения» с диффузией, которые внешне подобны асимметричным магнитным структурам магнитосфер, стримерам корон и джетам звезд. Проводилось дифференциальное описание картины 3D структуры полей в координатном пространстве, либо создание фурье-образов этих полей в пространстве волновых чисел в виде волнового пакета на основе кинетических моделей. Далее проводится соотнесение этих описаний с наблюдениями методами оптической интерферометрии, протонной томографии или синхронизации магнитных датчиков пространственно разделенных спутников. Однако, особенно в лазерном эксперименте, важно интегральное по координатному пространству, но остающееся динамическим во времени описание квадратичных форм полей, которое проявляется иным образом. Это импедансное описание, которое характеризует интегральную мощность процессов в магнитной структуре в целом. Оно представляет магнитную структуру электротехнической схемотехникой, в которой представлены импедансные «горячие» RCL-элементы, вычисленные с учетом плазмы безотносительно влияния на них интегральной силы токов, зарядов и напряжений при их динамике во времени. «Горячие» импедансы $Z(R,C,L)$ универсально характеризуют энергетику ускорения частиц в структуре, а также накопление реактивной магнитной энергии и ее импульсные выбросы и колебания в динамике разлета как на макро – (космических), так и микро – (лазерных) масштабах. «Горячие» импедансы RCL с учетом разлета плазмы отличаются от исходных электродинамических «холодных» RCL элементов. «Горячие» импедансы Z вычисляются нами для «закритической» области частот плазмы, что соответствует индукционным электродинамическим процессам в горячем режиме разлета. Этот процесс локализован в линии поглощения (ускорение «резонансных» частиц) и непрозрачности (диамагнетизм «нерезонансных» частиц) на полосе частот вблизи «нулевой» частоты горячей бесстолкновительной плазмы. Импеданс содержит информацию о соотношении (добротности Q) внутренних релаксационных и осцилляторных времен процессов у мишеней, сопряженных с потоками. При использовании «горячих» мишеней ставится задача создания при разлете нелинейного импульсного генераторного процесса, позволяющего повысить энергию ускоренных частиц, получаемую обычно только от амбиполярного поля разлета, дополнительным воздействием на частицы плазмы индукционным электрическим полем. Также ставится задача создать экстремальное магнитное поле самоиндукции в «горячем» индуктивном элементе $L(t)$ для решения задач магнитного удержания диффузии и разлета.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0035-2014-0029, частично поддержана грантами РФФИ (№ 19_02_00704, № 17_02_00091), Министерством образования и науки РФ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» субсидия #14.607.21.0196, УИН проекта RFMEFI60717X0196, программой № 28 Президиума РАН (проект I.14 «Ускорение заряженных частиц и волновые процессы в солнечной, гелиосферной и магнитосферной плазме»).

Литература

К. Д. Андриянычева, рук. В. М. Губченко Магнитные плазменные структуры в потоках астрофизической и лазерной плазмы. Школа юного исследователя, Сборник исследовательских работ учащихся, Вып. 11, Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 2018, С. 144-149. ISBN 978-5-93530-477-5 (Вып. 11) http://www.talalushkino.sci-nnov.ru/sborniki_SHUI/11.pdf

ON IMPEDANCE PRESENTATION OF HOT COLLISIONLESS PLASMA EXPANSION RELATIVE ELECTRODYNAMICAL ELEMENTS

V. M. Gubchenko

Institute of Applied Physics, RAS, Nizhny Novgorod, Russia
E-mail: ua3thw@appl.sci-nnov.ru

The expansion of the space and laser plasma generally occurs relative to the external electrodynamic elements of various geometry and nature. This fact affects the expansion. These elements are the surface sphere for stellar coronas, the ring current of internal magnetization for the magnetospheres, planes and solenoids in the laser targets. In this case, the expansion plasma arises as a hot and collisionless one and should be considered kinetically taking into account the effects of damping by «resonant» electrons and the effects of electron hydrodynamics – the «non-resonant» interaction. With such expansions in plasma, large-scale current systems and their corresponding ambipolar and electromagnetic fields are formed. These fields create magnetic high-pressure 3D structures of a weakly magnetized plasma: the confined «diamagnetic clouds» and «magnetic reconnection region» with diffusion that are outwardly similar to asymmetric magnetic structures of magnetospheres, streamer coronae and stellar jets. A differential description of the picture of the 3D structure of fields in the coordinate space or the creation of Fourier transforms of these fields in the space of wave numbers in the form of a wave packet based on kinetic models were carried out. Next, these descriptions are correlated with observations using optical interferometry, proton tomography, or synchronized magnetic sensors of spatially separated satellites. However, when developing such descriptions, especially in a laser experiment, it is important to propose such a description of the quadratic forms that is integrated over the coordinate space but still changes in time. This kind of description manifests itself in a different way: this is an impedance description

that characterizes the integral power of the processes in the magnetic structure as a whole. It represents the magnetic structure using the electrical circuit design approach, which presents the impedance «hot» RCL elements, calculated when plasma is taken into account and regardless of the influence of the integral currents, charges and voltages in them and their dynamics in time. The «hot» impedances $Z(R,C,L)$ universally characterize the energy of particle acceleration in the structure, as well as the accumulation of reactive magnetic energy and its impulse emissions and oscillations in the «micromegas» dynamics of expansion on both micro (laser) and macro (space) scales. The «hot» RCL impedances are differ from the impedance of the «cold» RCL elements due to plasma around. We calculate the «hot» impedances for the «supercritical» frequency range of the plasma, which corresponds to the induction electrodynamic processes in the hot expansion mode. This process is localized in the absorption line (acceleration of «resonant» particles) and opacity (diamagnetism of «non-resonant» particles) in the band near the «zero» frequency of a hot collisionless plasma. The impedance contains information about the ratio (Q factor) of the internal relaxation and oscillatory times of the processes at the targets associated with the flows. When using «hot» targets, the task is to create a nonlinear pulsed generating process during expansion, which makes it possible to increase the energy of accelerated particles, usually obtained only from the ambipolar field of expansion, by an additional effect on the plasma particles by an induction electric field. The task is also to create an extremal magnetic field of self-induction in the «hot» inductive element $L(t)$ to solve the problems of magnetic confinement of diffusion and expansion.

The work is under Russian Federation Assignment (No 0035-2014-0029), supported in part by the Russian Foundation for Basic Research (projects Nos. 19-02-00704, and 17-02-00091), Program of the Presidium of the RAS No 28 (project I.14 «Acceleration of charged particles and wave process in solar, heliosphere and magnetosphere plasma») and the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project #14.607.21.0196, RFMEFI60717X0196).

References

K. D. Andrianycheva, supervisor V. M. Gubchenko. Magnetic plasma structures in astrophysical and laser plasma flows. Young Researcher School, Collection of the student research papers, Vol. 11, Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, 2018, P. 144-149. ISBN 978-5-93530-477-5 (Issue 11). http://www.talalushkino.sci-nnov.ru/sborniki_SHUI/11.pdf

3-7

СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ВКЛАДЫВАЕМОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЗАГОРАНИЯ МИШЕНЕЙ ТЯЖЕЛОИОННОГО СИНТЕЗА

Г. В. Долголева

Московский государственный университет имени
М. В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: dolgg@list.ru

Рассматриваемые цилиндрические мишени базируются на платформе безударного сжатия, что позволяет получить очень большие сжатия мишеней, так необходимые для их горения. Мишень – это слоистая система, в которой один слой, называемый «рабочим», состоит из дейтериево-тритиевой смеси, в нем происходят термоядерные реакции. В мишень вводится энергия, под действием которой «рабочая» область сжимается и начинается «горение», т. е. происходят термоядерные реакции и выделяется энергия. При этом энергосход в результате термоядерных реакций должен быть больше, чем вложенная энергия (коэффициент усиления больше единицы). И очень важный вопрос – величина вкладываемой энергии.

Цель работы – выбор геометрии мишени и способа энергосложения, закона энергосложения для минимизации вкладываемой энергии и получения коэффициента термоядерного усиления больше единицы.

В докладе рассматриваются следующие виды мишеней:

- однокаскадная мишень – в ней четыре слоя и энергия вкладывается в один из внутренних слоев [1];
- двухкаскадная мишень – в ней увеличивается число слоев по сравнению с однокаскадной и энергия вкладывается в два слоя;
- однокаскадная система, но в ней область соседняя с рабочей урановая [2].

В качестве изменения формы энергосложения рассматривается – «быстрый» поджиг: вначале мишень сжимается, а затем второй «поджигающий» импульс вводится непосредственно в рабочую область.

Анализируются все перечисленные подходы: их положительные и отрицательные стороны.

Литература

1. Долголева Г. В., Забродин А. В. Кумуляция энергии в слоистых системах и реализация безударного сжатия. М: Физматлит, 2004.
2. Субботин В. И., Долголева Г. В., Забродина Е. А. и др. Разработка энергетической установки синтеза и деления на основе микромишеней прямого действия и мощного тяжелоионного драйвера содержащими делящиеся материалы // Атомная энергия. – 2004. – Т. 97, Вып. 3. – С. 190–198.

WAYS TO REDUCE THE ENERGY INVESTED TO IGNITE TARGETS FOR HEAVY ION SYNTHESIS

G. V. Dolgoleva

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: dolgg@list.ru

The considered cylindrical targets are based on a shock-free compression platform, which makes it possible to obtain very large compressions of targets, so necessary for their burning. A target is a layered system in which one layer, called the «worker», consists of a deuterium-tritium mixture, in which thermonuclear reactions take place. Energy is introduced into the target, under the action of which the «working» region is compressed and «burning» begins, i.e. thermonuclear reactions occur and energy is released. In this case, the energy output as a result of thermonuclear reactions must be greater than the energy input (the gain is greater than one). And a very important question is the amount of energy invested.

The goal of the work is to select the target geometry and energy input method, the law of energy input to minimize the energy input and obtain a thermonuclear gain factor greater than one.

The report discusses the following types of targets:

- a single-stage target; there are four layers in it and the energy is deposited in one of the inner layers [1];
- a two-stage target – the number of layers in it increases in comparison with a single-stage one and energy is invested in two layers;
- single-stage system, but in it the region is adjacent to the uranium worker [2].

As a change in the form of energy input, the «fast» ignition is considered: at first, the target is compressed, and then the second «igniting» impulse is introduced directly into the work area.

All the listed approaches are analyzed: their positive and negative sides.

References

1. Dolgoleva G.V., Zabrodin A.V. Energy cumulation in layered systems and the realization of non-impact compression. M: Fizmatlit, 2004.
2. Subbotin V. I., Dolgoleva G. V., Zabrodina E. A. et al. Development of a power plant for synthesis and division based on direct-acting microtargets and a powerful heavy-duty driver containing fissile materials // Atomic Energy. – 2004. – Т. 97, Issue 3. – P. 190–198.

3-8

**ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ В СХЕМЕ
СО СЖАТИЕМ ЗАМАГНИЧЕННОЙ
ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ТОКОМ
ВЗРЫВОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА**

С. Г. Гаранин, А. В. Ивановский, С. М. Куликов,
В. И. Мамышев, С. Н. Певный, В. Г. Рогачев

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

E-mail: ivanovsky@elph.vniief.ru

Одно из направлений реализации термоядерного синтеза – дожатие предварительно разогретой замагниченной плазмы лайнерной системой. Предварительный нагрев снижает требования по сжатию, а замагниченность уменьшает потери на теплопроводность и обеспечивает дополнительный разогрев α -частицами даже при низкой плотности плазмы.

В работе обсуждаются возможности ВМГ и взрывных фотодиссоционных лазеров для достижения зажигания в схеме с разогревом замагниченной плазмы ЛИ и сжатием в геометрии Z- Θ пинча.

**NUCLEAR FUSION IN THE SCHEME
WITH MAGNETIZED LASER PLASMA
COMPRESSION BY MAGNETIC EXPLOSION
GENERATOR CURRENT**

S. G. Garanin, A. V. Ivanovsky, S. M. Kulikov,
V. I. Mamyshev, S. N. Pevny, V. G. Rogachev

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

E-mail: ivanovsky@elph.vniief.ru

One of the nuclear fusion implementations is post-contact thrust of the magnetized plasma pre-heated by the liner system. Preheating bates demands on compression, and magnetization reduces thermal conduction losses and provides an additional heating by α -particles even at low plasma density.

In this paper we discuss capabilities of the magnetic explosion generator and explosive photo dissociation lasers for ignition in the scheme with LR heating of magnetized plasma and compression in Z- Θ pinch geometry.

3-9

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ
ИОНИЗАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА СТАДИИ
ЗАПАЗДЫВАНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО
СУБНАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЯДА В АЗОТЕ
ПРИ ДАВЛЕНИИ 40 АТМ**

С. Н. Иванов^{1*}, В. А. Шкляев²,
А. А. Гришков², В. В. Лисенков¹

¹Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Институт сильноточной электроники СО РАН,
Томск, Россия

*E-mail: stivan@iep.uran.ru

Было проведено численное моделирование процесса развития волн ионизации (ВИ) на стадии запаздывания самостоятельного субнаносекундного разряда в диоде высокого (азот, 40 атм) давления в условиях изначально однородного электрического поля. Длина зазора катод-анод равнялась 0,75 мм. К разрядному промежутку прикладывалось линейно нарастающее со скоростью 7×10^7 В/с напряжение. Инициирование разряда происходило за счет автоэлектронной эмиссии с микро выступа на катоде. В работе [1] было экспериментально показано, что в этих условиях в разрядном промежутке регистрируется пучок убегающих электронов (УЭ). Причем приведенная напряженность среднего электрического поля в промежутке не превышала 40 В/(см Torr). Это примерно на порядок меньше, чем требуется по критерию убегания электронов [2]. В работе [3] нами был аналитически определен момент инжекции пучка УЭ t_c для этих условий. В численном счете мы в момент времени t_c запускали пучок УЭ различной интенсивности. Количество УЭ в пучке было 100 или 6×10^7 штук. Это соответствовало току пучка $I_1 = 5 \times 10^{-6}$ А или $I_2 = 3$ А, соответственно.

Далее для исследования ионизационных процессов проводились самосогласованные расчеты, учитывающие кинетику электронов, в том числе убегающих, и динамику электромагнитного поля в промежутке в 2D приближении. Динамика как быстрых, так и медленных электронов рассчитывалась методом частиц с помощью open-source кода ХООРПС оптимизированного для решения проблем газового разряда [4], позволяющего моделировать развития пробоя в полной электромагнитной постановке. Учет столкновений при моделировании проводился с использованием метода Монте-Карло. Учитывались все основные каналы потери энергии электронами, такие как, возбуждение атома или молекулы газа, однократная ионизация и упругое рассеяние. Динамика электромагнитного поля в газовом диоде рассчитывалась с использованием системы уравнений Максвелла.

Показано, что ВИ перекрывает промежуток со скоростью до 10^{10} см/с. При этом коммутация начинается в момент, когда ВИ прошла лишь 26% от ширины разрядного промежутка. Это обусловлено протеканием большого тока зарядки динамической емкости: фронт

ВИ – анод. Величина тока УЭ незначительно влияет на момент начала коммутации.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0389-2015-0023, при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты № 19-08-00265 и № 19-08-00176) и УрО РАН в рамках программы фундаментальных исследований (проект № 18-2-2-15).

Литература

1. S. N. Ivanov. The Transition of Electrons to Continuous Acceleration Mode at Subnanosecond Pulsed Electric Breakdown in High-Pressure Gases // *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, V. 46, No. 28, 285201.
2. Yu. D. Korolev and G. A. Mesyats, *Physics of Pulsed Breakdown in Gases* (URO Press, Ekaterinburg, 1998).
3. N. M. Zubarev and S. N. Ivanov. Mechanism of Runaway Electron Generation at Gas Pressures from a Few Atmospheres to Several Tens of Atmospheres // *Plasma Physics Reports*, 2018, V. 44, No. 4, pp. 445–452.
4. J. P. Verboncoeur, A. B. Langdon, N. T. Gladd. An object-oriented electromagnetic PIC code // *Computer Physics Communications*, 1995, V. 87, pp. 199–211.

STUDY OF THE WAVE IONIZATION PROCESSES AT THE DELAY STAGE OF THE SELF-SUSTAINED SUBNANOSECOND DISCHARGE IN 40 ATM NITROGEN

S. N. Ivanov^{1*}, V. A. Shklyayev²,
A. A. Grishkov², V. V. Lisenkov¹

¹Institute of Electrophysics, Russian Academy of Sciences, Ural Branch, Ekaterinburg, Russia

²Institute of High Current Electronics, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Tomsk, Russia

*E-mail: stivan@iep.uran.ru

This paper reports on a numerical simulation of the evolution of ionization waves (IW) at the delay stage of self-sustained subnanosecond breakdown in a high-pressure (40 atm) nitrogen-filled diode at an initially homogeneous electric field. The length of the cathode-anode gap was 0.75 mm. A linearly increasing with a speed of 7×10^7 V/s voltage was applied to the discharge gap. The initiation of the discharge was due to field emission from a micro protrusion on the cathode surface. In [1], it was experimentally shown that under these conditions a beam of runaway electrons (RAEs) is registered in the discharge gap. Moreover, the reduced intensity of the average electric field in the gap did not exceed 40 V/(cm Torr). This is about an order of magnitude less than that required by the electron runaway criterion [2]. In [3], we analytically determined the moment of injection of the RAEs beam t_c for these conditions. In a numerical calculation, at the moment of time t_c we injected in the gap a RAEs beam of different intensity. The amount of RAEs in the beam was 100 or 6×10^7 pieces, which corresponded to the beam current $I_1 = 5 \times 10^{-6}$ A or $I_2 = 3$ A, respectively.

Further for the study of ionization processes, self-consistent calculations were carried out, taking into ac-

count the kinetics of electrons, including RAEs, and the dynamics of the electromagnetic field in the gap in the 2D approximation. The dynamics of both RAE and slow electrons was calculated by the particle-in-cell method using the open-source code XOOPIC optimized for gas discharge problems [4], which makes it possible to simulate the development of a breakdown in a complete electromagnetic formulation. The simulation of collisions was carried out using the Monte Carlo method. In this case, all the main channels of energy loss by electrons were taken into account, such as excitation of an atom or a gas molecule, single ionization, and elastic scattering. The dynamics of the electromagnetic field in a gas diode was calculated using the Maxwell equations system.

It is shown that the IW covers the gap at a speed of up to 10^{10} cm/s. In this case, the gap switching starts at the moment when the IW passed only 26% of the discharge gap length. This is due to the flow of a large charging current of the dynamic capacity: front IW – anode. The magnitude of the RAEs current has a little effect on the moment of the switching starts.

The work carried out within the state task No 0389-2015-0023 and under the partial financial support from RFBR (projects No 19-08-00265 and No 19-08-00176) and the Ural Branch of RAS within fundamental research program (project No 18-2-2-15).

References

1. S. N. Ivanov. The Transition of Electrons to Continuous Acceleration Mode at Subnanosecond Pulsed Electric Breakdown in High-Pressure Gases // *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, V. 46, No. 28, 285201.
2. Yu. D. Korolev and G. A. Mesyats, *Physics of Pulsed Breakdown in Gases* (URO Press, Ekaterinburg, 1998).
3. N. M. Zubarev and S.N. Ivanov. Mechanism of Runaway Electron Generation at Gas Pressures from a Few Atmospheres to Several Tens of Atmospheres // *Plasma Physics Reports*, 2018, V. 44, No. 4, pp. 445–452.
4. J. P. Verboncoeur, A.B. Langdon, N.T. Gladd. An object-oriented electromagnetic PIC code // *Computer Physics Communications*, 1995, V. 87, pp. 199–211.

3-10

ФЛУКТУАЦИОННО-ДИССИПАТИВНАЯ ТЕОРЕМА И ДИНАМИЧЕСКИЙ СТРУКТУРНЫЙ ФАКТОР ДЛЯ АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ

С. В. Ивлиев

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

E-mail: ivliev@theor.mephi.ru

Одним из способов описания взаимодействия ультракоротких лазерных импульсов, а также быстрых тяжелых ионов с металлами является формализм динамического структурного фактора. При вычислении поглощения энергии короткого лазерного импульса

металлом требуется знание мнимой части диэлектрической проницаемости, которая простым образом связана с проводимостью. Ключевым фактором количественного описания кинетики возбуждения электронной подсистемы налетающей заряженной частицей, а также первичных высоковозбужденных электронов среды, является выбор адекватных сечений взаимодействия этих частиц с электронным ансамблем материала. В частности, методика выбора этих сечений должна автоматически учитывать коллективную реакцию электронного ансамбля на вносимое возмущение.

В рамках первого борновского приближения (первый порядок теории возмущений) сечение рассеяния частицы на системе связанных частиц факторизуется и его можно представить в виде произведения сечения взаимодействия со свободным рассеивателем и динамического структурного фактора (ДСФ). Будучи фурье-образом парной корреляционной функции, ДСФ автоматически учитывает пространственно-временные корреляции в системе рассеивателей. Вычисление ДСФ среды непосредственно из первых принципов является весьма непростой задачей. Поэтому для определения ДСФ сложной системы часто используется флуктуационно-диссипационная теорема (ФДТ) – теорема статистической физики, связывающая флуктуации системы (их спектральную плотность) с ее диссипативными свойствами.

В данной работе рассматривается обобщение стандартной ФДТ, связывающей ДСФ с мнимой частью диэлектрической проницаемости, на случай анизотропной среды. Основное отличие реакции неизотропной среды – это некая специфическая зависимость сечения одиночного акта рассеяния от внешнего выделенного направления или, что точнее, от направления переданного среде импульса по отношению к главным осям кристаллической решетки. Типичным примером является графит, имеющий резкую асимметрию вдоль выделенной кристаллической оси. [3] При описании и экспериментальном исследовании электромагнитных или оптических свойств таких сред макроскопической характеристикой является диэлектрическая проницаемость, которая описывается тензором второго ранга. Показано, что в этом случае ДСФ выражается не просто через свертку тензора диэлектрической проницаемости (см., например, [1, 2]), а некоторым более сложным образом через свертку матрицы, включающей в себя помимо тензора диэлектрической проницаемости дополнительные зависимости от волновых векторов и частот. Рассмотрены предельные случаи малых и больших передаваемых среде импульсов и энергий. Полученные выражения позволяют получить ДСФ и сечения взаимодействия для анизотропной среды в широком диапазоне волновых векторов и частот, используя экспериментальные результаты оптических измерений диэлектрической проницаемости или результаты модельных расчетов тензора диэлектрической проницаемости [4].

Литература

1. N. D. Browning, J. Yuan, L. M. Brown, *Ultramicroscopy* 38 (1991) 291-298
2. H. Nikjoo, D. Emfietzoglou, T. Liamsuwan, R. Taleei, D. Liljequist, S. Uehara, *Rep. Prog. Phys.* 79 (2016) 116601.
3. B. T. Draine, *The Astrophysical Journal*, 831:109, N1, (2016)
4. M. Azzolini, T. Morresi at al. *J. Phys. Chem*, 122, 10159 (2018).

FLUCTUATION-DISSIPATION THEOREM AND DYNAMIC STRUCTURE FACTOR FOR ANISOTROPIC MEDIUM

S. V. Ivliev

National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

E-mail: ivliev@theor.mephi.ru

One of the ways to describe the interaction of ultra-short laser pulses, as well as fast heavy ions with metals, is the dynamic structure factor formalism. When calculating the energy absorption of a short laser pulse by a metal, knowledge of the imaginary part of the dielectric constant, which is simply related to conductivity, is required. A key factor in the quantitative description of the kinetics of excitation of the electronic subsystem by an incident charged particle, as well as of the primary highly excited electrons of the medium, is the selection of adequate cross sections for the interaction of these particles with the electronic ensemble of the material. In particular, the method of selecting these sections should automatically take into account the collective response of the electronic system to the introduced perturbation.

In the framework of the first Born approximation (first order of perturbation theory), the cross section for scattering of a particle on a system of coupled particles is factorized and can be represented as a product of cross section for interaction with a free scatterer and a dynamic structure factor (DSF). Being a Fourier transform of the pair correlation function, the DSF automatically takes into account the space-time correlations in the system of scatterers. The calculation of the DSF of the environment directly from the first principles is a very difficult task. Therefore, to determine the DPF of a complex system, the fluctuation-dissipation theorem (PDT) is often used – a theorem of statistical physics that relates the system's fluctuations (their spectral density) with its dissipative properties.

In this paper, we consider a generalization of the standard PDT connecting the DPF with the imaginary part of the dielectric constant to the case of an anisotropic medium. The main difference between the reaction of a non-isotropic medium is a certain specific dependence of the cross section of a single scattering event on the external selected direction or, more precisely, on the direction of the impulse transferred to the medium relative to the main axes of the crystal lattice. A typical example is graphite, which has sharp asymmetry along an selected crystal axis. [3] In describing and experimentally investigating the electromagnetic or optical properties of such media, the dielectric constant, described by a second-rank tensor, is a macroscopic characteristic. It is shown that

in this case the DSF is expressed not simply through the convolution of the dielectric constant tensor (see, for example, [1, 2]), but in some more complicated way through the matrix convolution, which includes, in addition to the dielectric tensor, vectors and frequencies. The limiting cases of small and large pulses and energies transferred to the medium are considered. The obtained expressions allow one to obtain the DSF and interaction cross sections for an anisotropic medium in a wide range of wave vectors and frequencies, using experimental results of optical measurements of the dielectric constant or the results of model calculations of the dielectric tensor [4].

References

1. N. D. Browning, J. Yuan, L. M. Brown, *Ultramicroscopy* 38 (1991) 291-298
2. H. Nikjoo, D. Emfietzoglou, T. Liamsuwan, R. Taleei, D. Liljequist, S. Uehara, *Rep. Prog. Phys.* 79 (2016) 116601.
3. B. T. Draine, *The Astrophysical Journal*, 831:109, N1, (2016)
4. M. Azzolini, T. Morresi et al. *J. Phys. Chem.* 122, 10159 (2018).

3-11

ПРОБЛЕМА КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ УРАНА

И. Л. Иосилевский^{1,2}, В. К. Грязнов³

¹Объединенный Институт Высоких Температур РАН, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

³Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

В докладе обсуждается давняя, но не имеющая по сей день удовлетворительного разрешения проблема крайней неопределенности в существующем знании параметров критической точки (КТ) перехода газ-жидкость в уране (как и в урано-содержащих соединениях UO_2 , UN, UC...). Предполагаемые параметры КТ урана труднодоступны экспериментально. То же справедливо и для вычислительно сложных и бурно развивающихся в последнее время т. наз. первопринципных теоретических подходов (QMD, QMC etc). Традиционные же способы теоретических оценок параметров критической точки, основанные на далекой экстраполяции эмпирически известных термических и калорических свойств низкотемпературной фазы, крайне противоречивы и дают скандально широкий разброс в оценке критической температуры и давления. В докладе анализируются возможные физические причины указанного противоречия, включая возможность аномальной формы фазовой диаграммы урана вследствие резкого изменения эффективной «степени ионизации» жидкого урана при его расширении от тройной до критической точки, и даже возможности существования у урана на этом пути дополнительного «энтропийного» фазового перехода, аналогичного обсуждавшемуся еще много лет назад Ландау и Зельдовичем.

URANIUM CRITICAL POINT LOCATION PROBLEM

I. Iosilevskiy^{1,2}, V. Gryaznov³

¹Joint Institute for High Temperature of RAS, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology, State University Dolgoprudny, Russia

³Institute of Problem of Chemical Physics RAS, Chernogolovka, Russia

Very old and not resolved yet problem of extreme uncertainty in our knowledge in location and critical point parameters for uranium and its compounds (UO_2 , UN, UC...) is under discussion. The expected critical region for uranium is not presently achievable experimentally. The same is true for powerful, but laborious contemporary so-called first-principle approaches (QMD, QMC etc). At the same time traditional way of theoretical estimations for critical parameters on the base of far extrapolation of well-known low-temperature thermal and caloric properties for condense phase, lead to extreme dispersion in predicted values for uranium critical temperature and pressure. We discuss possible physical reasons, which could explain and justify mentioned above critical parameters discrepancy for uranium. In particular we discuss possible anomalies in falling of effective “ionization degree” on the expansion way from triple to critical point, as well as possibility for existing of hypothetical additional “entropic” phase transition, similar to that predicted by Landau and Zeldovich long ago.

3-12

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛОКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ОДНОМЕРНЫХ РАСЧЕТАХ МИШЕНЕЙ ПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Н. Г. Карлыханов, В. А. Лыков

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

E-mail: n.g.karlykhanov@vniitf.ru

Проблема описания переноса энергии тепловыми электронами в мишенях ИТС возникает в связи с тем, что лазерное излучение поглощается в малоплотной, высокотемпературной плазменной короне, размер которой сопоставим с пробегом тепловых электронов. Следовательно, нарушается условие применимости приближения электронной теплопроводности. Поэтому при проведении расчетов мишеней ИТС вплоть до настоящего времени, часто используется ограничение электронной теплопроводности предельным потоком $q_e^* = f \cdot n_e T_e (T_e / m_e)^{1/2}$, где T_e и n_e – температура и концентрация электронов, $f \approx 0,06-0,15$ – эмпирический коэффициент. Для учета кинетических эффектов в одномерной программе радиационной газовой динамики ЭРА [1] реализована модель нелокального

электронного теплопереноса [2]. Проведена верификация модели и программы на тестовых задачах [3, 4]. Представлены результаты расчетов, проведенных по программе ЭРА для условий экспериментов по облучению оболочек на установке OMEGA [5]. Расчеты приводились с учетом нелокального электронного теплопереноса [2] и моделью поглощения лазерного излучения [6], которая учитывала вынужденное Бриллюэновское рассеяние (ВРМБ), генерацию быстрых электронов в процессах двухплазмонного распада (ДПР) и вынужденного Рамановского рассеяния (ВРР). Показано, что учет нелокального электронного теплопереноса позволяет отказаться от модели ограничения электронной теплопроводности предельным потоком q_e^* с эмпирическим коэффициентом f .

Литература

1. Н. М. Барышева и др., Жур. Выч. Мат. и Мат. Физ., **22**, 401 (1982).
2. O. V. Batishchev, et al, Phys. Plasmas **9**, 2302 (2002).
3. A. Marocchino, et al, Phys. Plasmas **20**, 022702 (2013).
4. M. Sherlock, et al, Phys. Plasmas **24**, 082706 (2017).
5. J. L. Laffite, et al., Phys. Plasmas **23**, 012706 (2016).
6. В. А. Лыков и др., сборник материалов XIII Международной конференции «Забабакхинские научные чтения» 20–24 марта 2017 г., Снежинск, Издательство РФЯЦ – ВНИИТФ, стр. 133.

SIMULATION OF NON-LOCAL ELECTRON HEAT TRANSFER IN ONE-DIMENSIONAL CALCULATIONS OF DIRECT-DRIVE TARGETS

N. G. Karlykhanov, V. A. Lykov

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

E-mail: n.g.karlykhanov@vniitf.ru

The problem of description of energy transfer by thermal electrons in ITS targets stems from the fact that laser radiation is absorbed in the low-density, high-temperature plasma corona, whose size is comparable to path lengths of thermal electrons. Consequently, the applicability condition of the electron heat conductivity approximation is violated. That is why up to this point calculation of ITS targets often involves limiting of the electron heat conductivity by threshold flow $q_e^* = f \cdot n_e T_e (T_e/m_e)^{1/2}$, where T_e and n_e are electron temperature and electron concentration, respectively, and $f \approx 0.06-0.15$ is an empirical factor. In order to account for kinetic effects, a model of non-local electron heat transfer [2] was realized in the 1D radiation gas-dynamics code ERA [1]. The model and the code were verified on test problems [3, 4]. The paper presents the results of the ERA code calculations for experiments on shells irradiation at the OMEGA facility [5]. The calculations were performed taking into account non-local electron heat transfer [2] and using a model of laser radiation absorption [6] that accounted for stimulated Brillouin scattering (SBS), fast electrons generation in the processes of two-plasmon decay (TPD), and stimulated

Raman scattering (SRS). It is shown that accounting for non-local electron heat transfer makes it possible to abandon the model of electron heat conductivity limiting by threshold flow q_e^* with empirical factor f .

References

1. N. M. Barysheva et al., Journ. of Comp. Math. and Math. Phys. **22**, 401 (1982) (in Russian).
2. O. V. Batishchev, et al., Phys. Plasmas **9**, 2302 (2002).
3. A. Marocchino, et al., Phys. Plasmas **20**, 022702 (2013).
4. M. Sherlock, et al., Phys. Plasmas **24**, 082706 (2017).
5. J. L. Laffite, et al., Phys. Plasmas **23**, 012706 (2016).
6. V. A. Lykov et al., Proceedings of the 13th International Conference “Zababakhin Scientific Talks” March 20–24, 2017, Snezhinsk, published by RFNC – VNIITF, p. 133 (in Russian).

3-13

ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ ЛИНЗЫ С ИНИЦИАЦИЕЙ РАЗРЯДА ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

А. А. Дроздовский¹, П. В. Сасоров², А. В. Богданов¹, Р. О. Гаврилин¹, С. А. Дроздовский¹, М. А. Карпов³, А. В. Канцырев^{1,3}, Н. А. Клеопова³, В. А. Панюшкин¹, И. В. Рудской¹, С. М. Савин¹

¹НИЦ «Курчатовский Институт» – ИТЭФ, Москва, Россия

²Институт прикладной математики РАН, Москва, Россия

³ФГУП ВНИИА, Москва, Россия

E-mail: drozdovsky@itep.ru, Pavel.Sasorov@gmail.com, maksim.karpov@gmail.com

В настоящее время ведутся активные работы по созданию компактных лазерных ускорителей. При этом актуальным является решение задач транспортировки и фокусировки пучков плазменными линзами, в которых фокусирующее магнитное поле создается разрядным током типа Z-пинча [1]. Для осуществления эффективной фокусировки необходимо исследовать, при каких условиях инициирования пробоя формируется разряд с равномерным распределением плотности тока. В ИТЭФ проводится изучение разряда, инициированного пучком электронов. Используется экспериментальная установка, включающая источник электронного пучка с энергией 250 кэВ при токе до 100 А [2]. Основным методом наблюдения динамики плазменного разряда является регистрация собственного плазменного излучения в видимом, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах. Для получения покадровых изображений динамики формирования плазменной линзы в спектральном диапазоне вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена применялся регистратор радиографических изображений РРИ-01 разработки ВНИИА [3]. Исследования показали, что процесс развития разряда, инициируемого электронным пучком, существенно отличается от традиционного метода формирования Z-пинча. В конкретном случае разряда в трубке радиусом 2 см с амплитудой тока 50 кА распределение плазмы получается рав-

номерным в большом интервале времени, порядка 0,5 мкс, и захватывает область максимального значения разрядного тока. Это является необходимым условием создания плазменной линзы с линейными фокусирующими силами. Полученные экспериментальные результаты сравниваются с расчетным МГД-приближением.

Литература

1. J. van Tilborg, E. Esarey, S. S. Bulanov, P. V. Sasorov, W. P. Leemans, et al, Nonuniform discharge currents in active plasma lenses, *Physical review accelerators and beams* 20, 032803 (2017).
2. A. A. Drozdovsky, A. V. Bogdanov, R. O. Gavrilin, S. A. Drozdovsky, A. V. Kantsyrev, I. V. Roudskoy, S. M. Savin, P. V. Sasorov, V. V. Yanenko. The Research of the Plasma of Z-Pinch Initiated by the Electron Beam. *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2018, Vol. 15, No. 7.
3. М. А. Карпов, Н. А. Клеопова, С. А. Затолокин. Регистратор кадровых рентгенографических изображений прямого преобразования с экспозицией от 5 нс для диапазона от 0,01 до 300 кэВ // Отраслевая научно-техническая конференция «Методы и средства физических измерений», 10–14 декабря 2018. – Москва, ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова».

THE OBSERVATION OF PLASMA LENS WITH DISCHARGE INITIATION BY THE ELECTRON BEAM

A. A. Drozdovsky¹, P. V. Sasorov², A. V. Bogdanov¹, R. O. Gavrilin¹, S. A. Drozdovsky¹, M. A. Karpov³, A. V. Kantsyrev^{1,3}, N. A. Kleopova³, V. A. Panyushkin¹, I. V. Roudskoy¹, S. M. Savin¹

¹NRC «Kurchatov Institute» – ITEP, Moscow, Russia

²Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russia

³FSUE VNIIA, Moscow, Russia

E-mail: drozdovsky@itep.ru, Pavel.Sasorov@gmail.com, maksim.karpov@gmail.com

At the present time, active work is underway to create compact laser accelerators. In this case, it is important to solve the problems of the beams transportation by plasma lenses, in which the focusing magnetic field is created by a discharge current of the Z-pinch type [1]. For effective focusing it is necessary to investigate under what the breakdown initiation conditions uniform discharge current distribution is formed. In ITEP, the discharge initiated by an electron beam is studied. An experimental setup including an electron beam source with an energy of 250 Kev and a current of up to 100 A is used [2]. The main method of observation of discharge plasma dynamics is registration of own plasma radiation in the visible, ultraviolet and X-ray range. Pulsed imaging in vacuum ultraviolet and X-ray ranges was made by radiographic imaging camera RRI-01 by VNIIA [3]. Studies have shown that the process of development of the discharge initiated by the electron beam is significantly different from the usual method of formation of Z-pinch. In the specific case of a discharge in a tube with a radius of 2 cm with a current amplitude of 50 kA, the plasma distribution is uniform in

a large time interval, about 0.5 μ s, and captures the region of the maximum value of the discharge current. This is a necessary condition for creating a plasma lens with linear focusing forces. Experimental results are compared with the theoretical MHD models.

References

1. J. van Tilborg, E. Esarey, S. S. Bulanov, P. V. Sasorov, W. P. Leemans, et al, Nonuniform discharge currents in active plasma lenses, *Physical review accelerators and beams* 20, 032803 (2017).
2. A. A. Drozdovsky, A. V. Bogdanov, R. O. Gavrilin, S. A. Drozdovsky, A. V. Kantsyrev, I. V. Roudskoy, S. M. Savin, P. V. Sasorov, V. V. Yanenko. The Research of the Plasma of Z-Pinch Initiated by the Electron Beam. *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2018, Vol. 15, No. 7.
3. М. А. Карпов, Н. А. Клеопова, С. А. Затолокин // «Регистратор кадровых рентгенографических изображений прямого преобразования с экспозицией от 5 нс для диапазона от 0,01 до 300 кэВ», Отраслевая научно-техническая конференция «Методы и средства физических измерений», 10–14 декабря 2018, Москва, ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова».

3-14

ИСТОЧНИК МЕГААМПЕРНОГО ТОКА С ВРЕМЕНЕМ НАРАСТАНИЯ ~100 нс НА БАЗЕ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

А. А. Базанов, Е. И. Бочков, П. В. Дудай, А. А. Зименков, А. В. Ивановский, А. И. Краев, В. Б. Куделькин, В. И. Мамышев, С. М. Полюшко, Е. В. Шаповалов

Российский федеральный ядерный центр – ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

E-mail: ivanovsky@elph.vniief.ru

Для достижения порога термоядерного зажигания в схеме непрямого облучения рентгеновским излучением Z-пинча необходимо осуществить имплозию лайнера током амплитудой ~65 МА с временем нарастания ~100 нс [1].

В работе [2] предложена схема реализации взрывного источника импульсной мощности на базе сверхмощного дискового ВМГ, способного осуществить имплозию Z-пинча током до 75 МА за время ~100 нс. В качестве формирователя импульса тока предполагается использовать двухкаскадную систему на базе низкоиндуктивных электровзрывных гофрированных обострителей тока [3] и разрядника для развязки контура источника и нагрузки [4].

Отработку описанного источника предполагается проводить поэтапно, наращивая величину формируемого тока. В работе приводятся результаты первых экспериментов по формированию токов с временем нарастания ~100 нс: амплитудой ~1 МА на установке с емкостными накопителями энергии (КАСКАД); амплитудой ~5 МА с применением спирального ВМГ

и взрывного размыкателя тока в качестве первого каскада. Для развязки контура источника и нагрузки используются твердотельные разрядники.

Литература

1. **Vesey, R. A.** et al. Target design for high fusion yield with the double Z-pinch-driven hohlraum // *Physics of Plasmas* 14, 056302 (2007).
2. **Garanin, S. G.** An ICF system based on Z-pinch radiation produced by an explosive magnetic generator / S. G. Garanin, A. V. Ivanovsky and L.S. Mkhitarian // *Nuclear fusion* Vol. 51, N 10, 2011.
3. **Chernyshev, V. K.**, A. I. Kucherov, A. I. Mezhevov, V. V. Vakhrushev, 11th IEEE Int. Pulsed Power Conf., Baltimore, Maryland, USA, P.1208–1212 (1997).
4. **Ivanovsky, A. V.** Explosive PW power current source – myth or reality?

THE SOURCE OF MEGAMPERE CURRENT WITH RISE TIME OF ~100 ns ON THE BASIS OF MAGNETIC EXPLOSION GENERATORS

A. A. Bazanov, E. I. Bochkov, P. V. Duday,
A. A. Zimenkov, A. V. Ivanovsky, A. I. Kraev,
V. B. Kudelkin, V. I. Mamyshev,
S. M. Polyushko, E. V. Shapovalov

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

E-mail: ivanovsky@elph.vniief.ru

For achievement of thermonuclear ignition threshold in the scheme of indirect irradiation by Z-pinch X-radiation we need liner implosion by current of amplitude ~65 MA with rise time ~100 ns [1].

In this paper [2] we submit the scheme for implementation of an explosive pulsed power source on the basis of super-power disk magnetic explosion generator, which can perform Z-pinch implosion by current up to 75 MA during ~100 ns. We suppose to use double shell system on the basis of low-inductive electro-explosive corrugated current opening switches [3] and the discharger for contour and load decoupling [4].

We are going to develop the described source in steps by increasing magnitude of formed current. In this paper we set out the results of the first experiments on currents formation with rise time of ~100 ns; amplitude of ~1 MA on the facility with capacitive energy storage(CASCADE); amplitude of ~5 MA with application of spiral magnetic explosion generator and explosive current breaker as the first cascade. Solid-state dischargers are used for decoupling the source contour and loading.

References

1. **Vesey, R. A.** et al. Target design for high fusion yield with the double Z-pinch-driven hohlraum // *Physics of Plasmas* 14, 056302 (2007).
2. **Garanin, S. G.** An ICF system based on Z-pinch radiation produced by an explosive magnetic generator / S. G. Garanin, A. V. Ivanovsky and L.S. Mkhitarian // *Nuclear fusion* Vol. 51, N 10, 2011.

3. **Chernyshev, V. K.**, A. I. Kucherov, A. I. Mezhevov, V. V. Vakhrushev, 11th IEEE Int. Pulsed Power Conf., Baltimore, Maryland, USA, P. 1208–1212 (1997).

4. **Ivanovsky, A. V.** Explosive PW power current source – myth or reality?

3-15

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗЭНТРОПИЧЕСКОГО СЖАТИЯ АЛЮМИНИЯ ПРИ МАГНИТНОЙ ИМПЛОЗИИ ЛАЙНЕРОВ В УСТРОЙСТВАХ ALT-1-3

А. М. Буйко, С. Ф. Гаранин, М. А. Десятникова,
Г. Г. Иванова, В. А. Карепов,
С. Д. Кузнецов, В. Б. Якубов

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

Прецизионное измерение скорости ускоряемых лайнеров (оптическая велосиметрия методами VISAR, PDV, ...), позволяет получать высокоточные изэнтропы исследуемых материалов – зависимости давления от плотности во всем диапазоне давлений, достигаемых в одном эксперименте [1]. В настоящей работе применяется метод решения обратной задачи с использованием оптимизации – небольшое число параметров уравнения состояния варьируются до достижения наилучшего согласия экспериментальной скорости внутренней границы лайнера с расчетной, полученной в одномерном магнитно-гидродинамическом расчете. Для примера рассматривается имплозия алюминиевых лайнеров радиусом 4 см и толщиной 2–3 мм в устройствах ALT-1-3 [2–3] – под действием токов до 30–75 МА (азимутальное магнитное поле до 2–10 МГс) – при которой скорости лайнеров и изэнтропические давления в алюминии достигают 12–40 км/с и 0,2–8 Мбар. В экспериментах ALT-1,2 проводились VISAR-измерения скорости внутренней поверхности лайнеров, до 12 км/с. Полученная изэнтропа алюминия близка к имеющимся экспериментальным данным. Получены также требования к точности измерений скорости лайнера до 40 км/с в разработанном устройстве ALT-3.

Литература

1. Lemke R. W., Dolan D. H., Dalton D. G., et al. Probing off-Hugoniot states in Ta, Cu, and Al to 1000 GPa compression with magnetically driven liner implosions // *Journal of Applied Physics* 119, 015904 (2016).
2. Buyko A. M., Gorbachev Y. N., Zmushko V. V., et al. Simulation of ATLAS parameters in explosive magnetic experiments ALT-1,2 // *Proc. of IX Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics*, M. – St.-Pet., July 7–14, 2002. Edited by V. D. Selemir, L. N. Plyashkevich. Sarov, VNIIEF, 2004. PP. 747–751.
3. Буйко А. М., Иванова Г. Г., Морозова И. В., Расчеты взрывомангнитных устройств типа ALT для безударного сжатия

материалов при магнитной имплозии лайнеров // Представлено на этой конференции.

SIMULATION OF ISENTROPIC COMPRESSION OF ALUMINUM BY MAGNETICALLY IMPLoded LINERS IN EXPERIMENTS ALT-1-3

A. M. Buyko, S. F. Garanin, M. A. Desyatnikova,
G. G. Ivanova, V. A. Karepov,
S. D. Kuznetsov, V. B. Yakubov

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

High precision measurements of accelerated liner velocities (by optical velocimetry VISAR, PDV) produce high-resolution isentropes of test materials – pressure-density curves in the whole range of pressures reached in a single shot [1]. We use a method of inverse solution with optimization in this paper: a small number of parameters are varied to reach the best match between the experimental velocity of the inner liner boundary and the velocity obtained by 1D magnetohydrodynamic calculations. As an example we consider the implosion of aluminum liners having a radius of 4 cm and thickness of 2–3 mm driven by currents up to 30–75 MA (azimuthal magnetic field up to 2–10 MG) delivered by ALT-1-3 devices [2–3], when liner velocities and isentropic pressures in aluminum reach 12–40 km/s and 0.2–8 Mbar. Inner liner surface velocities measured by VISAR in the ALT-1,2 experiments reached 12 km/s. The resulting isentrope of aluminum is close to the experimental data available. Accuracy specifications for liner velocity measurements up to 40 km/s in the developed ALT-3 driver were identified

References

1. Lemke R. W., Dolan D. H., Dalton D. G., et al. Probing off-Hugoniot states in Ta, Cu, and Al to 1000 GPa compression with magnetically driven liner implosions // *Journal of Applied Physics* 119, 015904 (2016).
2. Buyko A. M., Gorbachev Y. N., Zmushko V. V., et al. Simulation of ATLAS parameters in explosive magnetic experiments ALT-1,2 // *Proc. of IX Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics*, M. – St.-Pet., July 7–14, 2002. Edited by V. D. Selemir, L. N. Plyashkevich. Sarov, VNIIEF, 2004. pp. 747–751.
3. Buyko A. M., Ivanova G. G., Morozova I. V., Simulations of ALT-like explosive magnetic systems for ramp compression of materials by magnetically imploded liners // To be presented at this conference.

3-16

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ БЫСТРЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ В СФЕРИЧЕСКОЙ МИШЕНИ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА ПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ

С. Ю. Гуськов¹, Н. В. Змитренко²,
П. А. Кучугов^{1,2,*}, 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

В работе исследуется проблема нагрева сферической термоядерной мишени быстрыми электронами, которые образуются при взаимодействии лазерного излучения с протяженной плазмой испаренной части мишени (короной). Показано, что за счет удаленности области генерации лазерно-ускоренных быстрых электронов от поверхности сжимаемой части мишени значительная доля этих частиц, двигающихся в короне и многократно пересекающих ее за счет отражения в самосогласованном электрическом поле, не будет попадать в сжимаемую часть мишени. С использованием современных моделей генерации быстрых электронов показано, что в типичной мишени, рассчитанной на искровое зажигание, доля быстрых электронов, которые могут передать свою энергию сжимаемой части мишени, оказывается незначительной – 12% от общего числа этих частиц. Такой эффект «блуждания» быстрых электронов в короне приводит к значительному снижению негативного влияния генерации быстрых электронов на сжатие мишени. С учетом эффекта «блуждания» установлены распределение энергии, передаваемой быстрыми электронами различным частям мишени, и степень снижения сжатия дейтерий-третиевского горючего, в зависимости от параметров генерации быстрых электронов, соответствующих результатам современных экспериментов. Определены диапазоны изменения коэффициента термоядерного усиления при различных параметрах быстрых электронов. Предложена мишень, позволяющая снизить негативный эффект прогрева термоядерного топлива быстрыми электронами.

Работы выполнены при финансовой поддержке РФФИ, проекты №№ 17-02-00059-а и 16-31-60101-мол_а_дк.

**PECULIARITIES OF ENERGY TRANSFER
BY FAST ELECTRONS
IN THE DIRECT-DRIVEN SPHERICAL TARGET
OF LASER THERMONUCLEAR FUSION**

S. Yu. Gus'kov¹, N. V. Zmitrenko²,
P. A. Kuchugov^{1,2,*}, R. A. Yakhin¹

¹P.N. Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia
²Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow,
Russia

*E-mail: pkuchugov@gmail.com

In this work the problem of heating a spherical thermonuclear target by fast electrons, which are generated under the interaction of laser radiation with an extended plasma of the evaporated part of the target (the corona), is investigated. It is shown that due to the remoteness of the generation region of laser-accelerated fast electrons from the surface of the compressed part of the target, a significant proportion of these particles, moving in the corona and repeatedly crossing it due to reflection in the self-consistent electric field, will not pass into the compressed part of the target. Using modern models of fast electrons generation, it is shown that in a typical target designed for spark ignition, the fraction of fast electrons that can transfer their energy to the compressed part of the target is insignificant – 12% of the total number of these particles. Such an effect of «wandering» of fast electrons in the corona leads to a significant decrease in the negative effect of the generation of fast electrons on target compression. Taking into account the “wandering” effect, the distribution of energy transmitted by fast electrons to different parts of the target and the degree of reduction of deuterium-tritium fuel compression are established depending on the generation parameters of fast electrons corresponding to the results of modern experiments. The ranges of change in the gain are determined for various parameters of fast electrons. A target has been proposed that makes it possible to reduce the negative effect of the heating of thermonuclear fuel by fast electrons.

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, projects Nos. 17-02-00059-a and 16-31-60101-mol_a_dk.

3-17

**НАРУШЕНИЕ
РАДИОАКТИВНОГО РАВНОВЕСИЯ
МЕЖДУ ИЗОМЕРАМИ ЯДРА ¹⁸⁶Re
В УСЛОВИЯХ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ
УСТАНОВКИ «ИСКРА-5»**

A. A. Есьман, М. А. Куликов,
Д. Е. Ларин, Г. В. Тачаев

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

Для определения возраста Вселенной, и земной коры в частности, широко применяется радиометри-

ческий метод датировки, основанный на измерении соотношения между материнским радиоактивным изотопом и продуктами его распада. Однако введение в уравнения кинетики радиоизотопных часов поправок, связанных с возбужденными состояниями ядер, уменьшает общепринятые величины оценок возраста космических тел. Для исследования нуклеосинтеза и роли в этом процессе изомерных состояний американскими исследователями предлагается [1, 2] использовать установку NIF, при помощи которой возможно моделирование условий недр звезд (температура, давление, потоки нейтронов).

В этой связи с целью выяснения поведения изомеров в условиях горячей плотной плазмы на установке «Искра-5» [3] была проведена серия из четырех экспериментов по прямому воздействию

пучка лазерного излучения на препарат изомера ^{186m}Re. 4 мишени, изготовленные из препарата рения, после облучения подвергались спектроскопическим измерениям. В результате в 3 случаях из 4 было зафиксировано нарушение радиоактивного равновесия между основным и возбужденным состояниями ядра ¹⁸⁶Re.

Расчетно-теоретическое изучение поведения зависимости интенсивности гамма-линии распада основного состояния от времени позволило выдвинуть предположение о существовании неизвестного ранее уровня энергии в ядре. Были оценены время жизни ядра на этом уровне, момент и четность, энергия изомерного перехода.

Тем не менее, конкретный механизм (рентгеновский, неупругостолкновительный, электронноконверсионный и пр.) внутриядерных переходов остается невыясненным.

Литература

1. L. A. Bernstein. Reactions on Excited States using the National Ignition Facility. Nuclear Astrophysics using NIF, 28 Aug 2007, LLNL. UCRL PRES-233342.
2. L. A. Bernstein. Low-energy neutrons and the prospects for neutron capture nucleosynthesis measurements using NIF. NIF Users Group Meetings, 15 Feb 2012, LLNL. LLNL-PRES-530513.
3. Анненков В. И., Багрецов В. А., Безуглов В. Г. и др. Импульсный лазер мощностью 120 ТВт «Искра-5». // Квантовая электроника. 1991. Том 18, № 5. С. 536–537.

**RADIOACTIVE IMBALANCE
BETWEEN ISOMERS OF NUCLEUS ¹⁸⁶Re
IN LASER PLASMA CONDITIONS
AT THE LASER FACILITY “ISKRA-5”**

A. A. Yes'man, M. A. Kulikov,
D. E. Larin, G. V. Tachaev

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

For estimations of age of the Universe and in particular Earth's crust the radiometer method of dating is widely used which is based on measurement of ratio between ma-

ternal isotope and its decay products. But introduction of excited nuclei amendments into equations of radioisotope timepieces kinetics reduces common estimates of age of cosmic bodies. American investigators suggest [1, 2] using NIF to research the nucleosynthesis and value of isomeric states at the process by simulation of star bowels conditions (temperature, pressure, neutron fluxes).

In this case the series of the four experiments on direct laser beam affect the isomer ^{186m}Re specimen was conducted at the “Iskra-5” facility to determinate isomers actions in hot dense plasma condition. Four targets made of rhenium specimens were subjected to spectroscopic measurements after irradiation. As a result, in 3 cases out of 4 radioactive imbalance between ground state of nucleus ^{186}Re and excited one was fixed.

Theoretical investigation of ground state gamma-decay intensity temporal function permitted to hypothesize the existence of previously unknown energy level in the nucleus. Its lifetime, spin-parity and energy of isomeric transitions were estimated.

However, the mechanism (roentgen, inelastic-collision, electronic-conversion or others) of intranuclear transitions remains unclear for the time being.

References

1. L. A. Bernstein. Reactions on Excited States using the National Ignition Facility. Nuclear Astrophysics using NIF, 28 Aug 2007, LLNL. UCRL PRES-233342.
2. L. A. Bernstein. Low-energy neutrons and the prospects for neutron capture nucleosynthesis measurements using NIF. NIF Users Group Meetings, 15 Feb 2012, LLNL. LLNL-PRES-530513.
3. Annenkov V. I., Bagretsov V. A., Bezuglov V. G., et al. 120-TW pulsed laser “Iskra-5” // *Kvantovaya elektronika*. 1991. 18, no. 5. P. 536–537.

3-18

О СУЩЕСТВОВАНИИ ЛАЗЕРНОГО ЭФФЕКТА В НЕБУЛЯРНОЙ ПЛАЗМЕ

П. А. Лобода

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

E-mail: p.a.loboda@vniitf.ru

На основе ранее полученного аналитического решения для модельной четырехуровневой схемы в поле излучения внешнего источника с планковским спектром [1] обсуждаются возможности существования лазерного эффекта в небулярной плазме, характерной для околозвездных газовых туманностей и звездных атмосфер. В частности, рассмотрены условия возникновения инверсии населенностей уровней для первого иона железа и атома кислорода в газовых конденсациях (глобулах) Вейгеля вблизи двойной звезды Эта Киля (η Carinae) [2–4], а также неоноподобного иона железа вблизи рентгеновских пульсаров [5, 6].

Литература

1. П. А. Лобода. О возможности получения инверсии населенностей уровней при накачке внешним излучением источника с планковским спектром. Тезисы международной конференции «VII Забабахинские научные чтения», 8–12 сентября 2003 г., Снежинск, с 101.
2. S. Johansson, V. S. Letokhov. *Phys. Rev. Lett.* **90**, 011101 (2003).
3. S. J. Messenger, V. Strelitski. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **404**, 1545–1550 (2010).
4. S. Johansson, V. S. Letokhov. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **364**, 731–737 (2005).
5. P. F. Winkler et al. *Astrophys. Journal*. **246**, L27-L31 (1981).
6. M.A. Bari et al. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **40**, 3785–3793 (2007).

ON THE OCCURRENCE OF LASER ACTION IN NEBULAR PLASMAS

P. A. Loboda

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

E-mail: p.a.loboda@vniitf.ru

Using the results of analytical study previously done for a model scheme of four atomic levels coupled with radiative transitions in the field of an external blackbody radiation source [1], we discuss the feasibility of laser action in nebular plasmas typical for circumstellar gaseous nebulae and stellar atmospheres. Specifically, we consider the conditions for level-population inversion in singly-ionized iron and atomic oxygen in the Weigelt blobs of the η Carinae binary star [2–4] as well as in neonlike iron in the vicinity of x-ray pulsars [5, 6].

References

1. P. A. Loboda. On the possibility to create population inversion of atomic levels photopumped by an external blackbody radiation source. *Abstr. 7th Intl. Conf. “Zababakhin Scientific Talks”*, Sept. 8–12, 2003, Snezhinsk, p. 101.
 2. S. Johansson, V. S. Letokhov. *Phys. Rev. Lett.* **90**, 011101 (2003).
 3. S. J. Messenger, V. Strelitski. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **404**, 1545–1550 (2010).
 4. S. Johansson, V. S. Letokhov. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **364**, 731–737 (2005).
 5. P. F. Winkler et al. *Astrophys. Journal*. **246**, L27-L31 (1981).
 6. M.A. Bari et al. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **40**, 3785–3793 (2007).
-

3-19

**ОДНОМЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ ЗАПАСОВ
ПО ЗАЖИГАНИЮ МИШЕНЕЙ
ПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ
ДЛЯ МЕГАДЖОУЛЬНЫХ УСТАНОВОК
С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 0,35 мкм И 0,53 мкм**

В. А. Лыков, Е. С. Бакуркина, Н. Г. Карлыханов,
Г. Н. Рыкованов, И. А. Химич, В. Е. Черняков

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

E-mail: v.a.lykov@vniitf.ru

Представлены результаты расчетов криогенных мишеней прямого облучения [1, 2] для мегаджоульных установок с излучением во 2-ой и 3-ей гармониках Nd-лазера. Расчеты приводились по одномерной программе радиационной газовой динамики ЭРА [3] с учетом нелокального электронного теплопереноса [4] и моделью поглощения лазерного излучения [5], которая учитывала вынужденное Бриллюэновское рассеяние (ВРМБ), генерацию быстрых электронов в процессах двухплазмонного распада (ДПР) и вынужденного Рамановского рассеяния (ВРР). В качестве целевой функции при оптимизации мишеней взят запас по зажиганию (W_Q) с учетом теплопроводности для неоднородных термоядерных мишеней, который аналогичен опубликованному в [6, 7]. Показано, что разогрев мишени быстрыми электронами, возникающими в процессах ДПР и ВРР, катастрофически снижает W_Q мишеней с СН-аблятором в случае использования лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 0,53$ мкм [1]. Запасы по зажиганию возрастают в ~ 2 раза при увеличении аспектного отношения СН-оболочки в $\sim 1,6$ раза или при переходе на аблятор из стекла [2]. Однако они остаются существенно меньше 1 для лазерного излучения с $\lambda = 0,53$ мкм. Запасы по зажиганию возрастают в 2–3 раза при переходе со 2-ой на 3-ю гармонику излучения Nd-лазера. Отмечается, что введение сдвига центра линий лазерного излучения в соседних каналах на $\Delta\lambda \approx 10 \div 20$ Å может заметно снизить эффекты ВРМБ. В этом случае получен $W_Q \approx 1,7$ и выход термоядерной энергии ~ 50 МДж в одномерном расчете мишени с аблятором из стекла [2] для энергии установки ~ 2 МДж в излучении 3-ей гармоники Nd-лазера.

Литература

1. С. А. Бельков и др., ЖЭТФ, **148**, вып. 4, 784 (2015).
2. V. N. Goncharov et al., Phys. Rev. Lett. **104**, 165001 (2010).
3. Н. М. Барышева и др., Жур. Выч. Мат. и Мат. Физ., **22**, 401 (1982).
4. O. V. Batishchev, et al, Phys. Plasmas **9**, 2302 (2002).
5. В. А. Лыков и др., сборник материалов XIII Международной конференции «Забахинские научные чтения» 20–24 марта 2017 г., Снежинск, Издательство РФЯЦ – ВНИИТФ, стр. 133.

6. Ю. С. Вахрамеев и др., **49** (2), 121–122 (1980).
7. Е. Н. Аврорин и др., Физика плазмы **6**, 965 (1980).

**1D-CALCULATIONS OF IGNITION MARGINS
OF DIRECT-DRIVE TARGETS FOR MEGAJOULE
FACILITIES WITH LASER WAVELENGTH
OF 0.35 μm AND 0.53 μm**

V. A. Lykov, E. S. Bakurkina, V. E. Chernyakov,
N. G. Karlykhanov, I. A. Khimich and G. N. Rykovanov

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

E-mail: v.a.lykov@vniitf.ru

The paper presents the calculation results of cryogenic direct-drive targets [1, 2] for MJ laser facilities with irradiation by the second and third harmonics of the neodymium laser. The calculations were made in the 1D code of radiation gas dynamics ERA [3] with the account for the non-local electron heat transfer [4] and the laser radiation absorption model [5] that takes into account stimulated Brillouin scattering (SBS), fast electrons generation in the processes of two-plasmon decay (TPD) and stimulated Raman scattering (SRS). The ignition margin (W_Q) was taken as an objective function for target optimization taking into account heat conductivity for heterogeneous fusion targets. The ignition margin is similar to that described in [6, 7]. It is shown that target heating by fast electrons generated in the TPD and SRS processes dramatically decreases W_Q of targets with the CH-ablator in case of laser radiation wavelength of $\lambda = 0.53$ μm [1]. The ignition margin increases about twice with the ~ 1.6 -fold increase of the CH-shell aspect ratio, or at transition from the glass to the ablator [2]. However, they remain considerably smaller than 1 for laser radiation wavelength of $\lambda = 0.53$ μm . The ignition margin increases by 2–3 times at transition from the 2nd to the 3rd harmonic of Nd laser. It is noted that introduction of the shift of the center of laser emission lines in the neighboring channels by $\Delta\lambda \approx 10 \div 20$ Å can significantly decrease the SBS effects. In this case the authors obtained $W_Q \approx 1.7$ and fusion energy yield ~ 50 MJ in 1D calculation of a target with a glass ablator [2] for the ~ 2 MJ facility in the 3rd harmonic of Nd laser.

References

1. S. A. Belkov et al., Journal of Experimental and Theoretical Physics, **148**, issue 4, 784 (2015) (in Russian).
2. V. N. Goncharov et al., Phys. Rev. Lett. **104**, 165001 (2010).
3. N. M. Barysheva et al., Journ. of Comp. Math. and Math. Phys. **22**, 401 (1982) (in Russian).
4. O. V. Batishchev et al., Phys. Plasma **9**, 2302 (2002).
5. V. A. Lykov et al., Proceedings of the 13th International Conference “Zababakhin Scientific Talks” March 20–24, 2017, Snezhinsk, published by RFNC – VNIITF, p. 133 (in Russian).
6. Yu. S. Vakhrameyev et al., **49** (2), 121–122 (1980) (in Russian).
7. E. N. Avrorin et al., Phys. Plasma **6**, 965 (1980) (in Russian).

3-20

КИЛЬВАТЕРНОЕ УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ СТЕКЛЯННОГО КАПИЛЛЯРА

К. С. Назаров, И. В. Глазырин, О. Г. Котова

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

E-mail: nazarovks@vniitf.ru

Высокоинтенсивные лазерные импульсы с $I \geq 10^{18}$ Вт/см² являются перспективным способом ускорения электронов до релятивистских скоростей, вплоть до сотен МэВ [1]. Однако распространение по плазме низкой плотности и наличие «шланговой» неустойчивости сокращают величину генерируемого заряда. Одним из способов решения этой проблемы может являться использование капилляра, ограничивающего импульс и позволяющего увеличить длину ускорения частиц [2].

Проведено исследование влияния пикосекундного предимпульса мощности 0.3, 1, 2 Дж на разлет вещества со стенок капилляра при помощи программы Focus [3]. Для полученного профиля преплазмы, а также для случаев полого и газонаполненного капилляра с различными плотностями проведены расчеты в трехмерной программе ELF [4].

Представлены результаты расчетов ускорения электронов в плазменной кильватерной волне [5–6], для случаев полых и газонаполненных капилляров для параметров фемтосекундной лазерной установки с интенсивностью порядка 10^{20} Вт/см². Проведено сравнение величин заряда, спектров энергии электронов для однородной плотности газа 10^{18} и 10^{19} см⁻³ и для параболического распределения плотности от 10^{16} до 10^{22} см⁻³ в капилляре.

Литература

1. Leemans W. P., Gonsalves A. J., Mao H.-S., et al. Multi-GeV electron beams from capillary-discharge-guided subpetawatt laser pulses in the self-trapping regime. *Phys. Rev. Lett.*, vol 113, p. 245002, 2014.
2. Sprangle P., Esarey E. Interaction of ultrahigh laser fields with beams and plasmas. *Physics of Fluids B, Plasma Physics*, vol. 4, p. 2241, 1992.
3. Михайлов Н. А., Глазырин И. В., Ершова А. В. и др. Особенности многокомпонентного Эйлера подхода в расчетах сжатия лазерных мишеней. Забабахинские научные чтения: сборник материалов XII Международной конференции 2–6 июня 2014. – Снежинск: Издательство РФЯЦ – ВНИИТФ, 2014. – С. 310.
4. Nazarov K. S., Glazyrin I. V., Kotova O. G. Three-dimensional electrodynamic code ELF. *Journal of Physics: Conference Series*, 1103, 2018.
5. Tadjima T., Dawson J. M. Laser Electron Acceleration. *Phys. Review Letters*, vol. 43, number 4, 1979.
6. McGuffey C., Thomas A. G. R., Glazyrin I. V. et al. Ionization induced trapping in a laser wakefield accelerator. *Phys. Review Letters* vol. 104, 025004, 2010.

WAKEFIELD ACCELERATION OF ELECTRONS FROM GLASS CAPILLARY

K. S. Nazarov, I. V. Glazyrin, O. G. Kotova

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

E-mail: nazarovks@vniitf.ru

High-intensity laser pulses with $I \geq 10^{18}$ W/cm² are a promising way to accelerate electrons to relativistic velocities with energies up to hundreds of MeV [1]. However, the pulse propagation through low density plasma and the presence of hose instability reduce the magnitude of the generated charge. One way of solving this problem may be the use of the capillary, which limits the pulse and allows to increase the acceleration length of the particles [2].

The effect of a picosecond prepulse with the power of 0.3, 1 and 2 J on the expansion of a substance from the capillary walls using the Focus code [3] was studied. For the obtained preplasma profile, as well as for the cases of a hollow and gas-filled capillary with different densities, calculations were performed in the three-dimensional ELF code [4].

The results of calculations of the electron acceleration in the plasma wake wave [5–6] are presented for the cases of hollow and gas-filled capillaries for the parameters of a femtosecond laser system with an intensity of about 10^{20} W/cm². The values of the charge, the electron energy spectra for a homogeneous gas density of 10^{18} and 10^{19} cm⁻³ and for a parabolic density distribution from 10^{16} to 10^{22} cm⁻³ in the capillary were compared.

References

1. Leemans W. P., Gonsalves A. J., Mao H.-S., et al. Multi-GeV electron beams from capillary-discharge-guided subpetawatt laser pulses in the self-trapping regime. *Phys. Rev. Lett.*, vol 113, p. 245002, 2014.
2. Sprangle P., Esarey E. Interaction of ultrahigh laser fields with beams and plasmas. *Physics of Fluids B, Plasma Physics*, vol. 4, p. 2241, 1992.
3. Mikhaylov N. A., Glazyrin I. V. Method of contact bound steepening for the simulation of 3D multiphase compressible flows in Euler variables. XIII Zababakhin Scientific Talks, RFNC – VNIITF, Snezhinsk, march 20–24, 2017. – P. 326.
4. Nazarov K. S., Glazyrin I. V., Kotova O. G. Three-dimensional electrodynamic code ELF. *Journal of Physics: Conference Series*, 1103, 2018.
5. Tadjima T., Dawson J. M. Laser Electron Acceleration. *Phys. Review Letters*, vol. 43, number 4, 1979.
6. McGuffey C., Thomas A. G. R., Glazyrin I. V. et al. Ionization induced trapping in a laser wakefield accelerator. *Phys. Review Letters* vol. 104, 025004, 2010.

3-21

РАСЧЕТЫ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОГЛОЩЕНИЯ ФОТОНОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ИОНИЗАЦИОННОГО РАВНОВЕСИЯ ПЛАЗМЫ

А. А. Овечкин, П. А. Лобода, Е. Ю. Акулинина,
М. Е. Березовская, В. В. Попова,
А. С. Королёв, С. В. Кольчугин

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

E-mail: ovehkin.an@mail.ru

На основе модели ионизационного равновесия плотной плазмы CP-SC [1] построена методика расчета спектральных и средних коэффициентов поглощения фотонов. Коэффициенты линейчатого и связанно-свободного фотопоглощения вычисляются по суперконфигурационной модели STA [2–4]. Для коэффициентов свободно-свободного фотопоглощения используется формула Борна–Эльверта. Приведены результаты расчетов средней степени ионизации и росселандовых коэффициентов поглощения для алюминия и железа. Результаты, полученные по обобщенной модели CP-SC, хорошо согласуются с результатами расчетов по модели ионизационного равновесия ATOMIC [5] и, в пределах применимости этих моделей, с результатами по модели RESEOS [6], основанной на модели Либермана [7] для среднего атома.

Литература

1. P. A. Loboda, V. V. Popova, A. A. Shadrin. *Contrib. Plasma Phys.* 49, 738–747 (2009).
2. A. Bar-Shalom, J. Oreg, W. H. Goldstein, D. Shvarts, A. Ziegler. *Phys. Rev. A* 40, 3183–3193 (1989).
3. A. Bar-Shalom, J. Oreg, W. H. Goldstein. *Phys. Rev. E* 51, 4882–4890 (1995).
4. A. Bar-Shalom, J. Oreg. *Phys. Rev. E* 54, 1850–1856 (1996).
5. J. Colgan, D. P. Kilcrease, N. H. Magee et al. *Astrophys. J.* 817, 116 (2016).
6. A. A. Ovehkin, P. A. Loboda, V. G. Novikov, A. S. Grushin, A. D. Solomyannaya. *HEDP* 13, 20–33 (2014).
7. D. A. Liberman. *Phys. Rev. B* 20, 4981–4989 (1979).

OPACITY CALCULATIONS USING CHEMICAL- PICTURE-BASED PLASMA MODEL

A. A. Ovehkin, P. A. Loboda, E. Yu. Akulinina,
M. E. Berezovskaya, V. V. Popova,
A. S. Korolev, S. V. Kolchugin

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

E-mail: ovehkin.an@mail.ru

The chemical-picture-based CP-SC model [1] has been extended to calculate opacities of hot dense plasmas. Bound-bound and bound-free spectral opacities are calculated using the superconfiguration STA model [2–4].

Free-free opacities are calculated with the Born-Elwert formula. The CP-SC ionization balance and Rosseland mean opacities of aluminum and iron plasmas agree well with those ones calculated by using the ATOMIC chemical-picture-based model [5] and the RESEOS model [6] implementing Liberman's average-atom approach [7].

References

1. P. A. Loboda, V. V. Popova, A. A. Shadrin. *Contrib. Plasma Phys.* 49, 738–747 (2009).
2. A. Bar-Shalom, J. Oreg, W. H. Goldstein, D. Shvarts, A. Ziegler. *Phys. Rev. A* 40, 3183–3193 (1989).
3. A. Bar-Shalom, J. Oreg, W. H. Goldstein. *Phys. Rev. E* 51, 4882–4890 (1995).
4. A. Bar-Shalom, J. Oreg. *Phys. Rev. E* 54, 1850–1856 (1996).
5. J. Colgan, D. P. Kilcrease, N. H. Magee et al. *Astrophys. J.* 817, 116 (2016).
6. A. A. Ovehkin, P. A. Loboda, V. G. Novikov, A. S. Grushin, A. D. Solomyannaya. *HEDP* 13, 20–33 (2014).
7. D. A. Liberman. *Phys. Rev. B* 20, 4981–4989 (1979).

3-22

СВЕРХИНТЕНСИВНОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПЕТАВАТТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ – ГЕНЕРАЦИЯ, РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ РАДИАЦИОННО-ВОЗБУЖДАЕМОГО И ПЛОТНОГО НАГРЕТОГО ВЕЩЕСТВА

С. А. Пикуз

Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

E-mail: spikuz@gmail.com

В экспериментах по взаимодействию пико- и фемто-секундных лазерных импульсов релятивистской интенсивности, превышающей 10^{21} Вт/см², лазерная энергия эффективно конвертируется в рентгеновское излучение, которое образуется при рассеянии горячих электронов в созданной плазме. В свою очередь, интенсивное рентгеновское излучение воздействует на окружающее вещество, приводя к ионизации внутренних оболочек и обеспечивая высокую концентрацию экзотических зарядовых состояний (полых ионов). В перспективе, использование рентгеновского излучения ультра-релятивистской лазерной плазмы открывает путь к исследованию состояний вещества с доминирующей ролью радиационных процессов. Кроме того, совместное воздействие рентгеновского излучения и потока быстрых электронов прогревает окрестности фокального лазерного пятна и внутренние слои мишени до состояния теплого плотного вещества (WDM). В докладе приводится обзор недавних экспериментальных работ и результатов по генерации интенсивного рентгеновского излучения и изучению порождаемых им явлений в лазерной плазме твердых мишеней, в том числе по

- нелинейному росту выхода рентгеновского излучения при увеличении интенсивности оптического поля с 10^{19} до 10^{22} Вт/см²;
- спектроскопии многозарядных ионов тяжелых элементов;
- наблюдению КК-полых ионов и гиперсателлитов к переходам с атомных уровней с $n > 2$;
- изучению плазмы ПВт лазерных импульсов с доминированием радиационных процессов в атомной кинетике;
- распространению рентгеновского излучения через глуболежащие слои твердотельных мишеней и измерению параметров изохорически нагреваемой плотной плазмы методами эмиссионной и абсорбционной рентгеновской спектроскопии.

**ULTRA-INTENSE X-RAYS IN PW LASER
PLASMA – GENERATION, TRANSPORT
AND APPLICATION TO STUDY RADIATION
DOMINATED AND WARM DENSE MATTER**

S. A. Pikuz

Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia
E-mail: spikuz@gmail.com

In experiments with pico- and femtosecond optical laser pulses of relativistic intensities exceeding 10^{21} W/cm² the laser energy is efficiently converted to X-ray radiation, which is emitted by hot electron component in collisionless processes. In turn, the intense X-ray radiation effectively ionizes the matter inside out, providing a large population of exotic states called hollow ions, and opens the way to study the matter in Radiation Dominated Regime. As well, together with fast electron flow, the radiation heats up the vicinity of the focal spot and deep-lying layers of the target to Warm Dense Matter states.

In this context, the following recent experimental studies on intense X-ray generation and consecutive phenomena in relativistic laser plasma of solid targets are overviewed:

- Non-linear growth of X-ray yield while optical field intensity ranges from $1e19$ to $1e22$ W/cm², and spectroscopy studies on X-ray emission from deeply-charged high-Z ions;
- Observation of КК-hollow and high-n-hollow atoms, and the matter in Radiation Dominated Kinetics Regime in picoseconds PW laser plasma;
- Transport of laser-generated X-rays through inner-lying target layers, and WDM temperature measurements by means of K-shell emission and absorption spectroscopy.

3-23

**ФРАКТАЛЫ И ТЕКСТУРЫ В РАДИОФИЗИКЕ
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ:
40 ЛЕТ НАУЧНЫХ РАЗРАБОТОК**

А. А. Потапов

Институт радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия
E-mail: potapov@cplire.ru

В докладе представлены избранные фундаментальные теоретические и экспериментальные результаты, полученные за 40 лет работы (1979–2019) автора и его учеников в ИРЭ РАН по планомерному внедрению фракталов, детерминированного хаоса, операторов дробного интегро-дифференцирования и эффектов скейлинга в радиофизику и широкий спектр радиотехнических наук [1–6]. Исследование проводится в рамках научного направления «Фрактальная радиофизика и фрактальная радиоэлектроника: проектирование фрактальных радиосистем», предложенного и разрабатываемого автором. Введение в научный обиход радиолокации вышеупомянутых понятий позволило автору впервые в мире предложить, а затем и применить новые размерностные и топологические (а не энергетические!) признаки или инварианты, которые объединены под обобщенным понятием «топология выборки» ~ «фрактальная сигнатура».

Фрактальная радиолокация [1–6] базируется на трех постулатах: 1 – интеллектуальная обработка сигнала / изображения, основанная на теории дробной меры и скейлинговых эффектов, для расчета поля фрактальных размерностей D ; 2 – выборка принимаемого сигнала в шумах относится к классу устойчивых негауссовых распределений вероятностей D сигнала; 3 – максимум топологии при минимуме энергии входного случайного сигнала. Данные постулаты открывают новые возможности для обеспечения устойчивой работы при малых отношениях сигнал/фон или увеличения дальности действия радаров. Таким образом, открыт, предложен и обоснован новый вид и новый метод современной радиолокации – фрактальная радиолокация. Это влечет за собой коренные изменения в самой структуре теоретической радиолокации, а также в ее математическом аппарате.

Применение фрактальных систем и узлов является принципиально новым решением, существенно меняющим принципы построения радиотехнических систем, устройств и датчиков. Фрактальные методы обработки дают повышение качества и детализации объектов и целей примерно в несколько раз. Наш приоритет в этой области закреплен более чем 1000 научных работ и 35 отечественными и зарубежными монографиями и отдельными главами в них на русском и английском языках.

Литература

1. Потапов, А. А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Университетская книга, 2005. – 848 с.
2. Потапов, А. А. О стратегических направлениях в синтезе новых видов радиолокационных текстурно-фрактальных обнаружителей малоконтрастных объектов с выделением их контуров и локализацией координат на фоне интенсивных помех от поверхности земли, моря и осадков // Труды IV Всероссийской НТК «РТИ Системы ВКО – 2016», посв. 100-летию НИИДАР и 70-летию РТИ им. академика А. Л. Минца (Москва, ОАО «РТИ им. академика А.Л. Минца»). – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. – С. 438–448.
3. Potapov, A. A. Chaos Theory, Fractals and Scaling in the Radar: A Look from 2015. Глава 12 в книге: The Foundations of Chaos Revisited: From Poincaré to Recent Advancements / Ed. Skiadas, C.- Switzerland, Basel: Springer Int. Publ., 2016. – P. 195–218.
4. Потапов, А. А. Фрактально-скейлинговая или масштабно-инвариантная радиолокация: открытие, обоснование и пути развития // Сб. науч. ст. по материалам II Всероссийской НПК «Авионика». Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», 2017. С. 143–152.
5. Потапов, А. А. Фрактальная радиоэлектроника: состояние и тенденции развития // Сб. науч. ст. по материалам III Всероссийской науч.-практ. конф. «Авионика». Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», 2018. С. 267–272.
6. Потапов, А. А. Текстурные и фрактально-скейлинговые методы обнаружения, обработки и распознавания слабых радиолокационных сигналов и малоконтрастных изображений на фоне интенсивных помех // Вестник воздушно-космической обороны (НПО «Алмаз»). – 2018. – № 2(18). – С. 15–26.

FRACTALS AND TEXTURES IN RADIO PHYSICS AND RADIO ELECTRONICS: 40 YEARS OF RESEARCH AND DEVELOPMENT

A. A. Potapov

V. A. Kotelnikov institute of radio engineering and electronics
RAS, Moscow, Russia

E-mail: potapov@cplire.ru

Selected fundamental theoretical and experimental results which were obtained by the authors and his pupils for 40 years (1979–2019) in IREE RAS during their work on systematical implementation of fractals, deterministic chaos, operators of fractional integro-differentiation and scaling effects into radio physics and a wide spectrum of radio engineering sciences are presented in this paper [1–6]. The research is conducted in the framework of scientific direction “Fractal radio physics and fractal radio electronics: designing of fractal radio systems”, which was proposed and being developed by the author. Introduction of the conceptions above into the scientific usage of radio location allowed the author to propose for the first time in the world and then to apply new dimensional

and topological (not power!) signs or invariants, which are united under a generalized conception “sampling topology” ~ “fractal signature”.

Fractal radio location [1–6] is based on three postulates: 1 – intellectual signal/image processing on the basis of the theory of fractional measure and scaling effects for calculating field of fractal dimensions D ; 2 – sampling of an incoming signal in noises is related to the class of stable non-Gaussian distributions of probabilities of signal's D . 3 – the topology maximum at the power minimum of an incoming random signal. These postulates open new opportunities in providing stable work at low ratios signal/background or increasing radar's range. Thus, the new type and new method of modern radio location – fractal radio location has been discovered, proposed and substantiated. It results in drastic changes in the theoretical radiolocation structure itself and in its mathematical apparatus as well.

Application of fractal systems and nodes is a principally new solution which sufficiently changes principles of designing of radio engineering systems, devices and sensors. Processing fractal methods give us quality and refinement of objects and targets which is approximately several times higher. Our advantage in this field is proved in more than 1000 scientific works and 35 native and foreign monographs and separate chapters there in Russian and English.

References

1. Potapov, A. A. Fractals in radio physics and radio location: the sampling topology. – Moscow, Universitetskaya kniga Publ., 2-nd updated and revised edition, 2005, 848 p. (in Russian).
2. Potapov, A. A. On strategic directions in synthesis of new types of radar textural-and-fractal detectors of low-contrast objects with its outlines selection and coordinates localization in the presence of the high intensity noises from the ground's surface, sea and precipitation // Radio Information Systems of Aerospace Defense–2016 (Proc. IV All-Russia Sci.-Tech. Conf. Devoted to the 100th Anniversary of NIIDAR and 70th Anniversary of Academician A.L. Mints Radio Technical Institute, Moscow, June 2–3, 2016).- MGTU, Moscow, 2017, p. 438–448. (in Russian).
3. Potapov, A. A. Chaos Theory, Fractals and Scaling in the Radar: A Look from 2015. Chapter 12 in the book: The Foundations of Chaos Revisited: From Poincaré to Recent Advancements / Ed. C. Skiadas. – Switzerland, Basel: Springer Int. Publ., 2016. – P. 195–218.
4. Potapov, A. A. Fractal-and-scaling or scale-invariant radiolocation: discovery, substantiation and development options // Proc. Sci. Articles II of All-Russia Sci.-Pract. Conf., Voronezh: Russian Air Force Military Educational and Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin”, March 16–17, 2017, p. 143–152. (in Russian).
5. Potapov, A. A. Fractal radio electronics: condition and development trends // Proc. Sci. Articles III of All-Russia Sci.-Pract. Conf., Voronezh: Russian Air Force Military Educational and Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin”, March 15–16, 2018, p. 267–272. (in Russian).

6. Potapov, A. A. Textural and fractal-scaling methods of detection, processing and identification of weak radar signals and soft images in the background of high-intensity noises // Aerospace Defense Herald (PJSC "ALMAZ R&P Corp."), 2018, № 2(18), p. 15–26. (in Russian).

3-24

ЭФФЕКТЫ КУЛОНОВСКОЙ НЕИДЕАЛЬНОСТИ В ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ

А. Д. Рахель

Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

E-mail: rakhel@oivtran.ru

Изучение плотной плазмы, в которой сильно кулоновское взаимодействие между частицами, а электроны могут быть умеренно вырождены (неидеальная плазма), представляет собой достаточно сложную проблему [1]. В экспериментальном плане проблема связана с трудностями создания такой плазмы как объекта исследований. Последнее предполагает получение однородного образца плазмы и его полную диагностику. В теоретическом отношении трудности связаны с отсутствием эффективных методов описания плазмы, состав которой меняется (электроны, ионы различной кратности, атомы) при изменении температуры и давления, а частицы сильно взаимодействуют между собой.

В последнее время создана эффективная экспериментальная импульсная методика, которая позволяет создавать плотную плазму одноэлементных металлов, а также развита достаточно полная диагностика такой плазмы [2, 3]. При этом погрешности измерений доведены до уровня, сопоставимого со статическими измерениями (<5%).

Основываясь на результатах измерений [3, 4] и феноменологической теории [5], в настоящей работе показано как проявляются эффекты кулоновской неидеальности в термодинамических функциях и электропроводности плотной плазмы. Целью работы является оценка степени неидеальности плазмы, создаваемой в экспериментах [2–4].

Литература

1. Фортов В. Е., Храпак А. Г., Якубов И. Т. Физика неидеальной плазмы // М.: Изд-во Физматлит, (2004).
2. Korobenko V. N., Rakhel A. D. / Phys. Rev. B 75, 064208 (2007).
3. Kondratyev A. M., Korobenko V. N., Rakhel A. D. / J. Phys.: Condens. Matter 28, 265501 (2016).
4. Кондратьев А. М., Коробенко В. Н., Рахель А. Д. / ЖЭТФ 154, 1168–1182 (2018).
5. Rakhel A. D. / J. Phys.: Condens. Matter 30, 295602 (2018).

EFFECTS OF COULOMB COUPLING IN DENSE PLASMAS

A. D. Rakhel

Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

E-mail: rakhel@oivtran.ru

The study of dense plasmas, in which the constituting particles strongly interact via the Coulomb potential and electrons can be moderately degenerate (non-ideal plasmas), is a rather complicated problem [1]. Experimentally, the difficulties are associated with the problem of generation of such plasma as an object for the research. The latter suggests producing a homogeneous plasma sample and its complete diagnostics. In the theory, the difficulties are associated with the lack of effective theoretical methods describing the plasma, whose composition is varied (electrons, ions of various multiplicities, atoms) with temperature and pressure, and the particles strongly interact with each other.

Recently, an effective pulsed experimental technique has been developed that allows one to create the dense plasmas of elemental metals, and a fairly complete diagnostics of such plasmas has been made [2, 3]. The measurement errors in this technique have been reduced to a level comparable with static measurements (<5%).

Based on the results of the measurements [3, 4] and the phenomenological theory [5], this paper shows how the effects of Coulomb coupling manifest themselves in the thermodynamic functions and the electrical conductivity of dense plasmas. The aim of this work is to estimate the Coulomb coupling parameter for the plasmas generated in the experiments [2–4].

References

1. Fortov V. E., Yakubov I. T., Khrapak A. G. // Physics of Strongly Coupled Plasma, Oxford Univ. Press, Oxford (2006).
2. Korobenko V. N., Rakhel A. D. / Phys. Rev. B 75, 064208 (2007).
3. Kondratyev A. M., Korobenko V. N., Rakhel A. D. / J. Phys.: Condens. Matter 28, 265501 (2016).
4. Kondratyev A. M., Korobenko V. N., Rakhel A. D. / ZhETF 154, 1168 – 1182 (2018).
5. Rakhel A. D. / J. Phys.: Condens. Matter 30, 295602 (2018).

3-25

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ СТИРОЛА В ОБЛАСТИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ И ТЕМПЕРАТУР

А. А. Рыкунов, М. А. Воробьева

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

E-mail: arykounov@gmail.com

Полимеризованный стирол, помимо широкого применения в промышленности и быту, используется

в области экспериментальной физики, выступая, например, в качестве аблятора при исследовании воздействия лазерного излучения на вещество. Для оптимизации характеристик мишеней, в том числе для нужд инерциального термоядерного синтеза, важно понимание свойств полистирола при ударно-волновом нагружении до относительно высоких давлений (от нескольких гигапаскалей до нескольких мегабар). Для получения информации о термодинамических характеристиках этого вещества и его микроструктуре в экстремальных условиях нами была выбрана комбинация методов квантовой (QMD) и классической (CMD) молекулярной динамики. Сочетание этих двух подходов позволяет, с одной стороны, уверенно описывать всю совокупность межатомных взаимодействий, в том числе, имеющих квантовую природу, а с другой – проследить эволюцию достаточно больших (10^5 – 10^6 атомов) систем на временах порядка 1 нс, недоступных для метода QMD. Полученное в работе уравнение состояния хорошо согласуется с имеющимся массивом экспериментальных данных по ударно-волновому нагружению как стирола, так и полистирола, а исследование микроструктуры ставит под сомнение гипотезу Ри [1] о кластеризации углерода и образовании наноалмазов в ударно-сжатых углеводородах, по крайней мере, на временах, характерных для метода CMD.

Литература

1. **Ree, F. H.** Systematics of high-pressure and high-temperature behavior of hydrocarbons // *J. Chem. Phys.* – 1979. – V. 70. – P. 974–983.

AN EQUATION OF STATE FOR STYRENE UNDER HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES

A. A. Rykounov, M. A. Vorobyova

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

E-mail: arykounov@gmail.com

Polystyrene is widely used not only in industry and in everyday life, but also in experimental physics where it is utilized, for example, as the ablator material in inertial confinement targets. The optimization of target parameters requires knowledge of polystyrene properties under shock loading at relatively high pressures (from a few gigapascals to a few megabars). For collecting information on its thermodynamic characteristics and microstructure under extreme conditions, we combine the methods of quantum (QMD) and classical (CMD) molecular dynamics. With such a combination it is possible, on the one hand, to reliably describe all the types of interatomic interactions including those that are quantum in nature, and on the other hand, to track the evolution of rather large systems (10^5 – 10^6 atoms) on time scales of about 1 ns that is prohibitively small for QMD. The equation of state we propose agrees well with available experimental data on the behavior of both

styrene and polystyrene under shock loading, and our microstructure analysis disputes Ree's hypothesis [1] that hydrocarbons respond to shock by forming carbon clusters as nanodiamonds, at least on time scales typical of CMD.

References

1. **Ree, F. H.** Systematics of high-pressure and high-temperature behavior of hydrocarbons // *J. Chem. Phys.* – 1979. – V. 70. – P. 97–983.

3-26

СВЕРХБЫСТРЫЙ ВЗРЫВ СКИН-СЛОЯ ПРИ СКОРОСТИ НАРАСТАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПРОВОДНИКА БОЛЕЕ 4 МГс/нс

С. А. Сорокин

Институт сильноточной электроники СО РАН,
Томск, Россия

E-mail: s.sorokin@rambler.ru

Представлены результаты экспериментов по сверхбыстрому взрыву скин-слоя металлического проводника. Проводящие стержни диаметром 0,5–1,0 мм нагружаются 2 МА током сильноточного генератора. Плазма с плотностью 10^{16} – 10^{17} см⁻³ предварительно инжектируется в область стержневой нагрузки. Быстрое нарастание магнитного поля на поверхности проводника реализуется в процессе сгребания инжектированной плазмы вдоль стержня силой $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$. По оценке, магнитное поле на поверхности проводника нарастает быстрее 4 МГс/нс. При такой скорости нарастания магнитного поля поверхность взрывается за субнаносекундное время в режиме высокого коэффициента поверхностной энергии. Плотная плазма поверхности нагревается до температуры около и выше 100 эВ, генерируя короткий мощный импульс мягкого рентгеновского излучения.

ULTRAFAST SKIN LAYER EXPLOSION AT SURFACE MAGNETIC FIELD RISE RATES OF MORE THAN 4 MG/ns

S. A. Sorokin

Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: s.sorokin@rambler.ru

The results of experiments on the ultrafast explosion of the skin layer of a metallic conductor are presented. Conducting rods with radii of 0.5–1.0 mm are driven with 2 MA current of the high-current generator. Plasma with density 10^{16} – 10^{17} cm⁻³ is preliminarily injected in the area of the rod load. The fast increase of the magnetic field on the conductor surface is realized, as the $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ force sweeps up the injected plasma along the rod. The estimated surface magnetic field rise rates are more than 4 MG/ns. At this rise rate of the magnetic field, the surface

explodes in a subnanosecond time in the regime of a high surface energy factor. The dense plasma of the surface is heated to a temperature of about 100 eV or more, generating a short intense pulse of soft x-ray radiation.

3-27

**ФОРМИРОВАНИЕ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА
ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
В КОНФИГУРАЦИИ СО СТЕРЖНЕВЫМ
ПИНЧ-ДИОДОМ, ЗАКОРОЧЕННЫМ НАБОРОМ
ПРОВОЛОЧЕК**

С. А. Сорокин

Институт сильноточной электроники СО РАН,
Томск, Россия

E-mail: s.sorokin@rambler.ru

Представлены результаты экспериментов по формированию низкоимпедансного диода в конфигурации стержневого пинч-диода, предварительно закороченного набором радиальных проволочек. В экспериментах реализована эффективная транспортировка и фокусировка электронного пучка на кончик стержня при удалении места контакта проволочек со стержнем от кончика стержня многократно превышающем диаметр стержня, а также при изгибе стержня, что позволяет, в частности, существенно расширить возможности использования таких диодов для вне-осевой рентгеновской радиографии.

**FORMATION OF A POINT-LIKE HARD
X-RAY SOURCE IN A CONFIGURATION
WITH A ROD-PINCH DIODE,
SHORT-CIRCUITED WITH A WIRE ARRAY**

S. A. Sorokin

Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: s.sorokin@rambler.ru

The results of experiments on the formation of a low-impedance diode in the configuration of a rod pinch diode pre-shortened with a radial wire array are presented. The experiments implemented efficient transportation and focusing of the electron beam on the rod tip when removing the contact point of the wires with the rod from the rod tip many times larger than the diameter of the rod, as well as at the rod bending, which allows, in particular, to significantly expand the possibilities of using such diodes for off-axis X-ray radiography.

3-28

**РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ
ЛАВИНО-СТРИМЕРНОГО РАЗРЯДА**

В. С. Сысов¹, Ю. А. Кузнецов¹, Д. И. Сухаревский¹,
М. Ю. Наумова¹, Н. М. Лепёхин¹,
Л. М. Макальский², А. В. Кухно²

¹Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
ВНИЦ 900, Истра, Россия

²НИУ Московский энергетический институт (ТУ),
Москва, Россия

E-mail: v.s.sysoev@vniitf.ru

Стримерный разряд является формой электрического разряда, присутствующий в газах высокого давления. Реализуется в виде стримерной короны в устройствах высокого напряжения, высоковольтных линиях, при пробое длинных воздушных промежутков (в виде стримерной зоны канала лидера, обеспечивающего пробой). Очевидно, что именно со стримерного разряда начинается зарождение и развитие разрядных процессов в грозовых облаках.

Известно, что развитие стримерного разряда сопровождается излучением в радиодиапазоне. Это приводит к возникновению радиопомех при работе устройств высокого напряжения, особенно при работе линий высокого и сверхвысокого напряжения. Вероятно, радиоизлучение грозовых облаков также имеет источником, в том числе, и стримерные процессы. В свою очередь, предшественником стримеров являются электрические лавины, из которых и развиваются стримеры.

Экспериментальное изучение радиоизлучения стримерных разрядов в естественных условиях сталкивается с большими техническими трудностями и требует больших финансовых затрат. Как правило, требуется определения, прежде всего, амплитудно-временных и спектральных характеристик радиоизлучения. Поэтому возможность изучения излучения в лабораторных условиях дает большие дополнительные возможности.

В работе для этих целей используется специально разработанный высоковольтный генератор лавинно-стримерных разрядов [1], который позволяет получать стримерные разряды длиной до 15 см в импульсно-периодическом режиме. Применение специальной измерительной радиотехники (в диапазоне от единиц МГц до единиц ГГц) позволило измерить спектр мощности излучения в этом диапазоне при развитии лавин и стримеров. При этом одновременно измерялись электрические характеристики стримерного разряда, что позволило получить некоторые взаимосвязи между ними и генерируемым радиоизлучением.

Литература

1. В. С. Сысов, Ю. А. Кузнецов, М. У. Булатов и др. Экранирующее воздействие плазмы электрического лавинно-стримерного разряда на электромагнитное излучение

в СВЧ диапазоне. XIII Международная конференция «Забабакхинские научные чтения». 20–24 марта 2017 г., Снежинск, Челябинская область, Россия, 3–42, с. 145–146.

RADIO EMISSION OF AVALANCHE-STREAMER DISCHARGE

V. S. Sysoev¹, Yu. A. Kuznetsov¹, D. I. Sukharevsky¹,
M. Yu. Naumova¹, N. M. Lepekhin¹,
L. M. Makalsky², A. V. Kukhno²

¹Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian
Research Institute of Technical Physics,
VNIC 900, Istra, Russia

²NRU Moscow Power Engineering Institute (TU),
Moscow, Russia

E-mail: v.s.sysoev@vniitf.ru

A streamer discharge is a form of electrical discharge present in high-pressure gases. It is realized in the form of a streamer corona in high-voltage devices, high-voltage lines, during the breakdown of long air gaps (in the form of a streamer zone of the leader channel providing breakdown). Obviously, the nucleation and development of discharge processes in thunderstorm clouds begins with a streamer discharge.

It is known that the development of a streamer discharge is accompanied by radiation in the radio band. This leads to radio interference when high-voltage devices operate, especially when high-voltage and ultra-high voltage lines are operating. Probably, the radio emission of thunderstorm clouds also has a source, including streamer processes. In turn, the predecessor of streamers are electric avalanches, from which streamers develop.

Experimental study of radio emission of streamer discharges under natural conditions faces great technical difficulties and requires large financial expenditures. As a rule, it is necessary to determine, first of all, the amplitude-time and spectral characteristics of radio emission. Therefore, the possibility of studying radiation in the laboratory provides great additional opportunities.

For this purpose, a specially developed high-voltage avalanche-streamer discharge generator [1] is used in the work, which allows one to obtain streamer discharges up to 15 cm long in a pulse-periodic mode. The use of special measuring radio engineering (in the range from units of MHz to units of GHz) made it possible to measure the power spectrum of radiation in this range during the development of avalanches and streamers. At the same time, the electrical characteristics of the streamer discharge were measured, which made it possible to obtain some interrelations between them and the generated radio emission.

References

1. V. S. Sysoev, Yu. A. Kuznetsov, M. U. Bulatov and others. Screening effect of an electric avalanche-streamer plasma on electromagnetic radiation in the microwave range. XIII International Conference “Zababakhin Scientific Readings”. March 20 – March 24, 2017, Snezhinsk, Chelyabinsk Region, Russia, B-42, p. 145–146.

РАСЧЕТЫ ГЕНЕРАЦИИ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВНУТРИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ХОЛЬРАУМА, ПРОВЕДЕННЫЕ ПО ПРОГРАММЕ СИНАРА ДЛЯ УСЛОВИЙ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ NIF

Д. В. Торшин, С. Н. Лебедев, В. А. Лыков,
В. В. Рыкованова, В. Н. Селезнев, К. И. Селезнева

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

E-mail: d.v.torshin@vniitf.ru

В продолжение работ [1] и с учетом новых возможностей программы СИНАРА [2] были выполнены двумерные расчеты генерации и распространения теплового рентгеновского излучения внутри цилиндрического хольраума для условий экспериментов, проведенных на лазерной установке NIF [3–5]. Расчеты проводились по двухтемпературной модели плазмы с электронной и ионной теплопроводностью, обменом энергии между ионами и электронами, а также при учете переноса излучения в групповом кинетическом приближении. Распространение и поглощение лазерного излучения внутри хольраума рассчитывалось в приближении прямолинейной трассировки лазерных лучей для реальной трехмерной геометрии облучения хольраума на установке NIF, но без учета рефракции и отражения лазерного излучения от поверхности критической плотности. Результаты расчетов поля рентгеновского излучения внутри хольраума, проведенных по программе СИНАРА, находятся в хорошем согласии с опубликованными экспериментальными данными. Так расчетные и экспериментальные значения температуры излучения внутри хольраума отличаются не более чем на 10–15%.

Литература

1. M. N. Chizhkov, M. Yu. Kozmanov, S. N. Lebedev, V. A. Lykov, V. V. Rykovanova, V. N. Seleznev, K. I. Selezneva, O. V. Strryakhnina, A. A. Shestakov, A. V. Vronskiy, Simulation of the hohlraum for laser facility of megajoule scale. The Sixth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications. Journal of Physics: Conference Series 244 (2010) 022073. IOP Publishing.

2. А. Д. Гаджиев, В. В. Гаджиева, С. Ю. Кузьмин, С. Н. Лебедев и др. Пакет программ «СИНАРА» математического моделирования динамики аварийных процессов в ядерных энергетических установках атомных электростанций на быстрых нейтронах. ВАНТ, Сер: Математическое моделирование физических процессов, 2000, в. 3, с. 25–35.

3. D. T. Casey, et al, Development of the CD Symcap platform to study gas-shell mix in implosions at the National Ignition Facility, Physics of Plasmas 21, 092705 (2014).

4. S. V. Weber, et al, Simulations of indirectly driven gas-filled capsules at the National Ignition Facility, *Physics of Plasmas* 21, 112706 (2014).
5. V. A. Smalyuk, et al, Measurements of ablator-gas atomic mix in indirectly driven implosions at the National Ignition Facility, *PRL* 112, 025002 (2014).

CALCULATIONS OF RADIATION GENERATION AND PROPAGATION INSIDE THE CYLINDRICAL HOHLRAUM PERFORMED WITH THE SINARA CODE PACKAGE FOR THE EXPERIMENTAL CONDITIONS OF THE NATIONAL IGNITION FACILITY (NIF)

D. V. Torshin, S. N. Lebedev, V. A. Lykov,
V. V. Rykovanova, V. N. Seleznev, K. I. Selezneva
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia
E-mail: d.v.torshin@vniitf.ru

Advanced capabilities of the SINARA code package [2] were used to carry out 2D simulation of thermal radiation generation and propagation inside the cylindrical hohlraum for the experimental conditions of the National Ignition Facility (NIF) [3–5]. This has been performed to continue the work [1]. The calculations were made with the two-temperature plasma model using electron and ion thermal conductivity, energy exchange between ions and electrons with considering the radiation transfer in the group kinetic approximation. The laser radiation absorption and propagation inside the hohlraum were calculated to a straight-line tracing approximation of the laser rays for an actual 3D-geometry irradiation of the hohlraum at the NIF but without considering refraction and reflection of the laser radiation from the critical density surface. Calculation results of the radiation field inside the hohlraum obtained with the SINARA code package are in good agreement with the published experimental data. Specifically, the difference between the calculated and experimental values of the hohlraum radiation temperature does not exceed 10–15%.

References

1. M. N. Chizhkov, M. Yu. Kozmanov, S. N. Lebedev, V. A. Lykov, V. V. Rykovanova, V. N. Seleznev, K. I. Selezneva, O. V. Strryakhina, A. A. Shestakov, A. V. Vronskiy, Simulation of the hohlraum for laser facility of megajoule scale. The Sixth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications. *Journal of Physics: Conference Series* 244 (2010) 022073. IOP Publishing.
2. A. D. Gadzhiev, V. V. Gadzhieva, S. Y. Kuzmin et al. SINARA code package for modeling dynamics of abnormal processes in nuclear power systems at fast neutron nuclear power stations. VANT, Series: Mathematical simulation of physical processes, 2000, V. 3, p. 25–35.
3. D. T. Casey, et al, Development of the CD Symcap platform to study gas-shell mix in implosions at the National Ignition Facility, *Physics of Plasmas* 21, 092705 (2014).

4. S. V. Weber, et al, Simulations of indirectly driven gas-filled capsules at the National Ignition Facility, *Physics of Plasmas* 21, 112706 (2014).
5. V. A. Smalyuk, et al, Measurements of ablator-gas atomic mix in indirectly driven implosions at the National Ignition Facility, *PRL* 112, 025002 (2014).

3-30

ПРИМЕНЕНИЕ ПСЕВДОАТОМНОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ К ИССЛЕДОВАНИЮ ТРАНСПОРТНЫХ СВОЙСТВ СИЛЬНОНЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ

А. Л. Фальков, А. А. Овечкин, П. А. Лобода
Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики
им. академ. Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия

Псевдоатомная молекулярная динамика (ПАМД) [1] – эффективная методика, позволяющая рассчитывать структурные, теплофизические и переносные характеристики теплового и горячего плотного вещества (WDM). Необходимый для проведения ПАМД-моделирования эффективный сферически симметричный потенциал межйонного взаимодействия V может быть получен в рамках первого приближения модели Ч. Старретта и Д. Саумона [2]. Вещество представлено как совокупность электронной подсистемы, описываемой в квазиклассическом приближении Тома-са–Ферми–Дирака, а также подсистемы псевдоатомов (ПА), взаимодействующих между собой посредством потенциала V . Для расчета траекторий ПА использован алгоритм классической МД [3], реализованный в программе PALMA.

В ходе ПАМД-моделирования накоплены наборы координат ионов, а также массивы скоростей ПА в различные моменты времени. Детальные сведения о конфигурации системы использованы для непосредственного расчета автокорреляционных функций скорости частиц и тензора давления, коэффициентов ионной самодиффузии и сдвиговой вязкости, а также ион-ионных радиальных функций распределения (РФР) и вращательных инвариантов, необходимых для изучения угловых корреляций в подсистеме ПА.

Литература

1. Starrett C. E., Saumon D. // *Phys. Rev. E.* – 2016. – Vol. 93. – P. 063202.
2. Starrett C. E., Saumon D. // *Phys. Rev. E.* – 2013. – Vol. 87. – P. 013104.
3. Рапапорт Д. К. Искусство молекулярной динамики. – М. – Ижевск: НИЦ «РХД», ИКИ, 2012. – С. 632, илл.

APPLICATION OF PSEUDOATOMIC MOLECULAR DYNAMICS METHOD FOR IONIC TRANSPORT COEFFICIENTS RESEARCH

A. L. Falkov, A. A. Ovechkin, P. A. Loboda

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

Pseudo-atomic molecular dynamics (PAMD) [1] is an effective method for modeling of structural, thermophysical and transport properties of warm and hot dense matter (WDM). An effective interionic potential V has been obtained in the first approximation of the C. E. Starrett and D. Saumon model [2]. WDM is considered as a system of semiclassical Thomas-Fermi-Dirac electrons and classical pseudo-atoms (PA) interacting via the V potential. For the modeling of ionic trajectories the method by [3] are used.

The sets of coordinates and velocities at various moments of time are used for velocity and pressure tensor autocorrelation functions (VAF and PTAF) modeling. We also obtain ionic diffusion and shear viscosity coefficients using VAF and PTAF. Ion-ion radial distribution functions (RDFs) and the angle rotating invariants are also calculated. These parameters are used for the structural investigations of WDM.

References

1. Starrett C. E., Saumon D. // Phys. Rev. E. – 2016. – Vol. 93. – P. 063202.
2. Starrett C. E., Saumon D. // Phys. Rev. E. – 2013. – Vol. 87. – P. 013104.
3. Rapaport D. C. The Arc of Molecular Dynamics. – Cambr. Univ. Press, 2004.

3-31

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ПУЧКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В ГАЗОВЫХ СТРУЯХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

В. А. Флегентов, К. В. Сафронов, С. А. Горохов,
А. С. Тищенко, Д. О. Замураев, А. Л. Шамраев,
С. Ф. Ковалева, Д. С. Гаврилов

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

E-mail: dep5@vniitf.ru

В большинстве современных лазер-плазменных экспериментов генерация электронных пучков происходит при взаимодействии ультракороткого лазерного импульса с низкоплотной мишенью (газонаполненная ячейка, газонаполненный капилляр и др.), что позволяет получать узконаправленные монохроматические

пучки электронов с высокой энергией (до нескольких ГэВ [1, 2]). Однако, заряд таких пучков, обычно, не превышает нескольких десятков пКл.

Современные лазер-плазменные ускорители электронов могут служить яркими источниками рентгеновского излучения с беспрецедентно короткими длительностями импульса, малыми размерами излучающей области, а также высокой направленностью излучения. Такие свойства источников привлекательны для ряда прикладных задач, например, в диагностировании быстропротекающих процессов. Однако для большинства практических применений необходимо увеличивать заряд пучка.

Несмотря на то, что ранее уже делались попытки увеличения количества ускоренных электронов в генерируемых пучках [3, 4], до сих пор эти режимы генерации мало изучены.

На фемтосекундной лазерной установке проведена серия экспериментов по генерации пучков релятивистских электронов в плотных газовых струях. Параметры газовых струй испускаемых соплом мишенного узла варьировались изменением давления в системе подачи газа и были измерены методом интерферометрии. Измерено время стабилизации струи после начала испускания.

Исследованы спектры генерируемых электронов при генерации в струях с различными параметрами. Сделаны оценки количества электронов в пучках.

Литература

1. X. Wang, R. Zgadjai, N. Fazel et al., Nature Communications V. 4, No.1988 (2013).
2. W. P. Leemans, A. J. Gonsalves, H.-S. Mao et al., Phys. Rev. Lett. 113, 245002 (2014).
3. V. Malka, J. Faure, J. R. Marques et al., Phys. Plasmas, Vol. 8, No. 6, 2605–2608 (2001).
4. M. I. K. Santala, Z. Najmudin, E. L. Clark et al., Phys. Rev. Lett. 86, 1227 (2001).

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ULTRASHORT LASER-DRIVEN RELATIVISTIC ELECTRON BUNCH GENERATION IN GAS JET TARGETS

V. A. Flegentov, K. V. Safronov, S. A. Gorokhov,
A. S. Tischenko, D. O. Zamuraev, A. L. Shamraev,
S. F. Kovaleva, D. S. Gavrillov

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

E-mail: dep5@vniitf.ru

Most laser plasma electron acceleration experiments are performed at irradiation of low density targets (gas-filled capillaries, gas cells etc.). Highly collimated quasi-monochromatic electron bunches with energies up to several GeV are produced [1, 2]. Typical charges of these bunches are of the order of tens of picoCoulombs.

Laser plasma electron accelerators are considered as a novel high brightness x-ray source with unprecedented features such as narrow divergence, small size and short

duration. These advantages make this source a promising diagnostic for variety of applications especially in ultra-fast radiography. For the most future applications it is necessary to enhance total charge of the electron bunch.

Several approaches were examined [3, 4] to increase the charge, but up to date these regimes haven't been investigated completely.

We report on experiments on electron acceleration from high density gas jets which were performed on 80 TW femtosecond laser facility. Gas jet density was modified by changing gas pressure and was measured using interferometry method. The optimal time for gas jet to be stabilized was determined.

Relativistic electron beam spectra were obtained in experiments with various gas jet parameters and the total charge of the electron bunch was estimated.

References

1. X. Wang, R. Zgadjai, N. Fazel et al., Nature Communications V. 4, No.1988 (2013).
2. W. P. Leemans, A. J. Gonsalves, H.-S. Mao et al., Phys. Rev. Lett. 113, 245002 (2014).
3. V. Malka, J. Faure, J. R. Marques et al., Phys. Plasmas, Vol. 8, No. 6, 2605–2608 (2001).
4. M. I. K. Santala, Z. Najmudin, E. L. Clark et al., Phys. Rev. Lett. 86, 1227 (2001).

3-32

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕКАЧКИ ЭНЕРГИИ В ПЕРЕСЕКАЮЩИХСЯ ПУЧКАХ НА ПОГЛОЩЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КОРОНЕ МИШЕНЕЙ ПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ

И. А. Химич, Н. Г. Карлыханов,
В. А. Лыков, Г. Н. Рыкованов

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

E-mail: ivanx89@mail.ru

Разработана физическая модель и математическая программа для проведения трехмерных расчетов поглощения лазерного излучения в сферической короне мишеней прямого воздействия с учетом реальной геометрии облучения на многолучевых лазерных установках. В приближении геометрической оптики рассчитываются рефракция, обратно-тормозное поглощение лазерного излучения, а также передача энергии при пересечении пучков (cross-beam energy transfer – CBET [1]). Необходимые газодинамические профили берутся из одномерных расчетов, проводимых по программе ЭРА [2] с учетом нелокального электронного теплопереноса по модели [3]. Модель и программа верифицированы как на тестовых задачах [4], так и экспериментальных данных [5], полученных при облучении оболочечных мишеней на установке OMEGA. Проведены расчеты мишени прямого об-

лучения из работы [6], которые показали, что CBET может снизить долю поглощенной лазерной энергии до 2-х раз в будущих экспериментах на 48-лучевой установке с энергией ~ 2 МДж в излучении второй гармоники Nd-лазера. Аналогично работе [7] показано, что потери энергии за счет CBET значительно уменьшаются при смещении длин волн в соседних лазерных пучках на $\Delta\lambda = 10\div 20 \text{ \AA}$.

Литература

1. I. V. Igumenshchev, et al., Phys. Plasmas., 19, 056314 (2012).
2. Н. М. Барышева и др., Жур. Выч. Мат. и Мат. Физ., 22, 401 (1982).
3. O. V. Batishchev, et al, Phys. Plasmas 9, 2302 (2002).
4. J. F. Myatt, et al., Phys. Plasmas., 24, 056308 (2017).
5. J. L. Laffite, et al., Phys. of Plasmas, 23, 012706 (2016).
6. С. А. Бельков. и др., ЖЭТФ, 2015г., том 148, вып. 4.
7. D. H. Edgell, et al., Phys. Plasmas., 24, 062706 (2017).

INFLUENCE OF CROSS-BEAM ENERGY TRANSFER ON LASER RADIATION ABSORPTION IN A CORONA OF DIRECT DRIVEN TARGETS

I. A. Khimich, N. G. Karlykhanov,
V. A. Lykov, G. N. Rykovanov

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

E-mail: ivanx89@mail.ru.

A physical model and a mathematical program for carrying out of three-dimensional calculations of laser radiation absorption in a spherical corona of direct driven targets taking into account real geometry of an irradiation on multi-beam laser facilities is developed. In the approximation of geometrical optics are calculated a refraction, inverse bremsstrahlung of laser radiation, and a cross-beam energy transfer (CBET [1]). The required gas-dynamic profiles are taken from the one-dimensional calculations carried out according to the ERA program [2] taking into account nonlocal electronic heat transport according to the model [3]. The model and the program are verified as on test problems [4], and the experimental data [5] obtained during the irradiation of shell targets on an OMEGA facility. The calculations of direct driven target from the work [6], which showed that CBET can reduce the part of absorbed laser energy up to 2 times in future experiments at a 48-beam facility with an energy of ~ 2 MJ in the second harmonic radiation of the Nd-laser in the future experiments. Similarly to the work [7] it was shown that the energy losses due to CBET are significantly reduced when wavelengths in neighboring laser beams are shifted by $\Delta\lambda = 10\div 20 \text{ \AA}$.

References

1. I. V. Igumenshchev, et al., Phys. Plasmas., 19, 056314 (2012).
2. Н.М. Барышева и др., Жур. Выч. Мат. и Мат. Физ., 22, 401 (1982).
3. O. V. Batishchev, et al, Phys. Plasmas 9, 2302 (2002).
4. J. F. Myatt, et al., Phys. Plasmas., 24, 056308 (2017).

5. J. L. Laffite, et al., Phys. of Plasmas, 23, 012706 (2016).
 6. С.А. Бельков. и др., ЖЭТФ, 2015г., том 148, вып. 4.
 7. D. H. Edgell, et al., Phys. Plasmas., 24, 062706 (2017).

3-33

**РАЗРУШЕНИЕ ТОНКИХ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК МОЩНЫМИ
ТЕРАГЕРЦОВЫМИ ИМПУЛЬСАМИ**

О. В. Чефонов¹, А. В. Овчинников¹, С. И. Ашитков¹,
С. А. Евлашин², П. С. Кондратенко³,
М. Б. Агранат¹, В. Е. Фортов¹

¹Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

²Центр проектирования, производственных методов
и материалов, Сколковский институт науки и технологий,
Москва, Россия

³Институт проблем безопасного развития атомной
энергетики РАН, Москва, Россия
E-mail: oleg.chefonov@gmail.com

Приведены результаты экспериментального исследования воздействия импульсов мощного терагерцового излучения в диапазоне 1–3 ТГц на тонкие пленки алюминия и никеля толщиной 20 нм, напыленные на стеклянную подложку. Впервые получено разрушение металлических пленок при однократном воздействии терагерцового импульса и определена величина порога разрушения по плотности падающей энергии терагерцового импульса при однократном облучении. Механизм разрушения пленок при однократном воздействии терагерцового импульса обусловлен расширением нагретой пленки, приводящим к превышению прочности сцепления пленки с поверхностью подложки, растрескиванию и абляции. Характер повреждений при многократном воздействии терагерцового импульса с интенсивностью ниже порога разрушения резко отличается от характера однократного разрушения. Повреждения представляют собой группу трещин, вытянутых перпендикулярно направлению электрического поля терагерцового импульса в плоскости пленки. Предложен механизм инициирования таких трещин, основанный на новом явлении – электрострикции в тонких металлических пленках. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда грант № 17-19-01261.

**DAMAGE OF THIN METAL FILMS
BY HIGH-POWER TERAHERTZ PULSES**

O. V. Chefonov¹, A. V. Ovchinnikov¹, S. I. Ashitkov¹,
S. A. Evlashin², P. S. Kondratenko³,
M. B. Agranat¹, V. E. Fortov¹

¹Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia,

²Center for Design, Manufacturing and Materials, Skolkovo
Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

³Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

E-mail: oleg.chefonov@gmail.com

The results of experimental study of high-power terahertz radiation pulses action in the range of 1–3 THz on aluminum and nickel films of 20 nm in thickness deposited on glass substrate are presented. For the first time the damage in a thin metal films produced by single terahertz pulse is observed and the damage threshold fluence of thin metal films is evaluated for single pulse experiments. The damage mechanism induced by a single terahertz pulse could be attributed to thermal expansion of the film causing debonding of the film from the substrate, film cracking and ablation. Damage pattern induced by multiple THz pulses at fluences below damage threshold is quite different from that observed in single pulse experiments. The observed damage pattern resembles an array of microcracks elongated perpendicular to the in-plane field direction. A mechanism related to microcracks' generation and based on a new phenomenon of electrostriction in thin metal films is proposed. This work was supported by Russian Science Foundation Grant No. 17-19-01261.

3-34

**ТОЧЕЧНЫЕ ПОТЕНЦИАЛЫ
В КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ**

А. С. Чихачев

ВЭИ – филиал ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ
им. акад. Е. И. Забабахина», Москва, Россия

В первой части рассмотрено связанное состояние заряженной частицы, созданное единичным дельта-центром в одномерной системе. Изучена ситуация, когда сторонние заряды создают дельтаобразный потенциал.

Во второй части изучается интегральная модель 3-х мерного точечного потенциала, адекватно описывающая переход состояния двух центров в состояние одного центра при уменьшении расстояния между центрами до нуля.

POINT POTENTIAL IN QUANTUM MECHANICS

A. S. Chikhachev

All-Russia Electrotechnical Institute (FGUP VEI),
Moscow, Russia

The first part of the work describes the charged particle bound state brought by a unit delta center in one-dimensional system. The case when foreign charges generate the delta-shaped potential is studied.

The second part addresses an integrated 3D point potential model which adequately describes transition from two-center to one-center state with the distance between the centers reduced to zero.

3-35

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА
ПЛОТНОГО ГАЗА ИНТЕНСИВНЫМ
ПОТОКОМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

А. П. Яловец

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

E-mail: yalovets.alex@rambler.ru

Представлена математическая модель пробоя газа лазерным излучением. В основу модели положено решение системы уравнений, включающей кинетическое уравнение для свободных электронов, уравнения для ионизационного состава газа и его нагрева за счет потерь энергии электронами в упругих столкновениях с атомами и ионами. Кинетическое уравнение учитывает процессы поглощения и вынужденного излучения квантов электронами в газе, процессы упругих и неупругих потерь энергии электронов в столкновениях с атомами и ионами газа, а также процесс ухода электронов из облучаемой области.

Предложен механизм образования «затравочных» электронов в зависимости от давления газа и интенсивности облучения. Показано, что основным процессом генерации затравочных электронов является внешний эффект с поверхности твердотельных элементов, оказавшихся в поле лазерного излучения. Эмиссионная способность внешнего фотоэффекта зависит от количества адсорбированного газа, то есть от давления. Предложен вид функции источника «затравочных» электронов. Найдены эмпирические параметры источника.

Рассчитаны пороги пробоя газа лазерным излучением, которые находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными результатами различных авторов.

Показано, что в диапазоне давлений 10^3 – 10^6 Торр поглощаемая электронами энергия излучения идет на нагревание газа за счет потерь энергии в упругих столкновениях. В данном диапазоне давлений основным механизмом ионизации является ионизация электронным ударом высоковозбужденных состояний.

При уменьшении давления газа уменьшаются потери энергии электронов в упругих столкновениях, что приводит к уменьшению роли нагрева газа в формировании условий для ионизации. Основным механизмом ионизации в этом случае является ионизация электронным ударом стояний, близких к основному.

При давлении газа выше 10^6 Торр в аргоне создаются условия для образования «затравочных» электронов за счет многоквантового фотоэффекта. Основная причина создания этих условий – снижение потенциала ионизации за счет перекрытия электронных оболочек соседних атомов. Основным механизмом ионизации при высоких давлениях является ионизация электронным ударом атомов в основном состоянии.

**SIMULATION OF SOLID GAS HEATING
BY HIGH RADIATION LASER FLUX**

A. P. Yalovets

South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia

E-mail: yalovets.alex@rambler.ru

We submit mathematical model of gas breakdown by laser radiation. The basis of the model is the solution of simultaneous equations including the kinetic equation for free electrons, the equations for an ionization composition of gas and its heating due to electron energy losses in elastic recoils with atoms and ions. The kinetic equation takes into account quantum absorption and induced quantum emission by electrons in gas, elastic and inelastic electron energy losses in collisions with gas atoms and ions, and electrons escape from irradiated area.

We have offered mechanism of formation of “seed” electrons depending on gas pressure and radiation intensity. We have demonstrated that the basic process of the seed electrons generation is the outer effect from the solid-state elements surface appeared in the field of laser radiation. The exterior photo effect emissivity depends on an amount of the adsorbed gas, in other words on pressure. We offered the source function pattern of “seed” electrons. We obtained empirical parameters of the source.

We have calculated laser-induced gas breakdown thresholds that are in reasonable agreement with experimental results of various authors.

It is shown, that in the pressure range of 10^3 – 10^6 Torr energy of radiation absorbed by the electrons is used for gas heating due to energy losses in elastic collisions. Electron impact ionization of highly excited states is the basic mechanism of ionization in the given range of pressures.

At the gas pressure is reduced electron energy losses in elastic collisions are also reduced that leads to reduction of gas heating role in development of conditions for ionization. The basic mechanism of ionization in this case is electron impact ionization of states, close to the basic state.

Conditions for “seed” electrons formation due to multi-quantum photo effect are developed in argon at gas pressure above 10^6 Torr. The main cause for development of these conditions is reduction of ionization potential due to overlapping of electron shells of the neighboring atoms. The main the ionization mechanism at high pressures is electron impact ionization of atoms in ground state.

Секция 4

**СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ
ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ
ПРОЦЕССАХ**

Section 4

**PROPERTIES OF MATTER
AT HIGH-INTENSITY
PROCESSES**

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И КИНЕТИКИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ЖЕЛЕЗА

Цзидун Юй*, Хуэй Пэн, Сюань Пэй, Цян У

Институт Физики Жидкости,
Китайская Академия Инженерной Физики (КАИФ),
Мяньян, Сычуань, Китай
*E-mail: yujidong@caep.cn

Исследуется влияние размера зерна и деформации холодной прокатки на ударно-наведенный фазовый переход высоко-чистого железа. Во-первых, проводятся эксперименты с ударным нагружением и измерения волнового профиля для высоко-чистого железа с различным размером зерна и деформацией холодной прокатки, а также выполняется плавное восстановление образцов. Экспериментальные результаты показывают, что скорость фазового перехода немного увеличивается с возрастанием деформации холодной прокатки (50%, 70% и 90%). Скорость фазового перехода гранулометрического образца значительно выше, чем у образцов с холодной прокаткой, что говорит о том, что рост новой фазы сдерживается начальным дефектом линии сдвига, а распределение двойников и морфология восстановленных образцов еще больше подтверждают этот вывод. Во-вторых, моделируется эволюция многовариантной микроструктуры при условии нагрузка-разгрузка на основе теории траектории, которая сравнивается с распределением двойников восстановленных образцов, и проверяются теоретические модели.

INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE ON PHASE TRANSITION KINETICS OF IRON

Jidong Yu*, Hui Peng, Xiaoyang Pei,
Songlin Yao, Qiang Wu

Institute of Fluid Physics,
Chian Academy of Engineering Physics,
Sichuan Mianyang, China

*E-mail: yujidong@caep.cn

The influence of grain size and cold-rolling deformation on the shock induced phase transition of high purity iron is investigated. Firstly, the shock loading experiment and wave profile measurement are carried out for high purity iron with different grain size and cold-rolling deformation, and soft recovery of samples is also performed. The experimental results show that the phase transition rate increases slightly with the increase of cold-rolling deformation (50%, 70% and 90%). The phase transition rate of grain size sample is significantly faster than that of cold rolling samples, which indicates that the growth of the new phase is inhibited by the initial slip band defect, and the twin distribution and morphology of the recovered samples further verify this conclusion. Secondly, the multi-variants microstructure evolution under loading-

unloading condition is simulated based on the pathway theory, which compare to the twin distribution of the recovered samples, and the theoretical models are verified.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ МЕТАЛЛОВ ОЦК ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ

С. Л. Яо, С. Й. Пэй, Цз. Д. Юй, Й. Й. Юй, Ц. У

Главная национальная лаборатория физики ударных волн
и детонации,

Научно-исследовательский институт физики жидких сред,
Китайская академия физических наук,
Мяньян, Сычуань, Китай

В последнее время интерпретация температурной зависимости динамической прочности ударно-нагруженных металлов стала критической задачей в физике ударных волн. Тем не менее, данный вопрос редко исследовался в связи с отсутствием точного описания определяющих характеристик ОЦК металлов под воздействием высокоскоростных деформаций и высоких температур. Для того, чтобы разобраться в основополагающем механизме динамического предела текучести ОЦК металлов при подобных экстремальных условиях, мы разработали определяющую модель на основе дислокаций, в которой эволюция дислокаций и эволюция двойникового всесторонне рассматриваются с точки зрения рассеяния энергии. Будучи примененной к ударно-нагруженным ОЦК металлам, данная модель количественно воспроизвела упруго-пластические волновые характеристики, наблюдаемые в экспериментах с соударением предварительно нагретых пластин. Новизна данной работы заключается в том, что помимо классического концептуального представления, что динамический предел текучести проистекает из движения дислокаций, предлагается рассматривать образование дислокаций как основной фактор влияния на динамический предел текучести при высоких скоростях деформации и высоких температурах. Обнаружено, что температурная зависимость динамической прочности ударно-нагруженных ОЦК металлов в основном определяется четырьмя механизмами, включая напряжение Пайерлса, фоновое трение, гомогенную нуклеацию (ГН) и упрочнение за счет неподвижных дислокаций. Несмотря на то, что все эти механизмы важны, авторы считают, что упрочнение за счет неподвижных дислокаций вследствие ГН является основным фактором влияния на наблюдаемые характеристики термического упрочнения V. На основании данного механизма мы предсказали, что подобные характеристики термического упрочнения будут также иметь место в других ОЦК металлах, таких как Mo и W, в температурных диапазонах, выходящих за пределы существующих экспериментов.

INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE DYNAMIC YIELD STRESS OF BCC METALS SUBJECTED TO SHOCK LOADING

S. L. Yao, X. Y. Pei, J. D. Yu, Y. Y. Yu, Q. Wu

National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan, China

Interpretation of the temperature dependence of the dynamic strength of shock loaded metals has recently become a critical problem in shock wave physics. However, this issue is rarely investigated for lack of an accurate description of the constitutive behavior of BCC metals subjected to high strain rate and high temperature. In order to unravel the underlying mechanism of the dynamic yield stress of BCC metals at such extreme conditions, we established a dislocation based constitutive model, in which dislocation evolution and twinning evolution are comprehensively considered, from a viewpoint of energy dissipation. When applied to shock loaded BCC metals, this model reproduced the elastic-plastic wave characteristics observed in preheated plate-impact experiments quantitatively. The novelty of this work lies in that, apart from the classical conceptualization that the dynamic yield stress stems from dislocation motion, dislocation generation has been proposed as the primary contributing factor to the dynamic yield stress at high strain rate and high temperature. It's found that the temperature dependence of the dynamic strength of shock loaded BCC metals is mainly determined by four mechanisms, including Peierls stress, phonon drag, homogeneous nucleation (HN) and forest hardening. While all these mechanisms are important, forest hardening induced by HN has been proposed as primary contributing factor to the experimentally observed thermal hardening behavior of V. Based on this mechanism, we predicted that the thermal hardening behavior would also occur in other BCC metals, e. g., Mo and W, at the temperature ranges beyond the limit of existing experiments.

4-3

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕДИ И СПЛАВОВ МЕДИ С СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ, ПОЛУЧЕННОЙ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ

Д. Н. Абдуллина¹, И. В. Хомская¹, С. В. Разоренов²,
Е. В. Шорохов³, Г. В. Гаркушин²

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

²Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

³Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия

E-mail: abdullina@imp.uran.ru

Методами металлографического, электронно-микроскопического анализа и дифракции обратно-отраженных электронов (EBSD) изучена субмикроструктурная (СМК) структура меди чистотой 99,8%, сплавов Cu-0,03%Zr и Cu-0,1%Cr, полученных динамическим канально-угловым прессованием (ДКУП). Механические свойства СМК меди и сплавов исследованы в условиях ударного сжатия интенсивностью 5,4–7,0 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. Ранее показано, что отличительной особенностью метода ДКУП, представляющего собой динамический вариант квазистатического способа РКУП, является комбинированное воздействие высокоскоростной (10^4-10^5 c^{-1}) деформации сдвига, ударно-волновой деформации сжатия и температуры. Формирование при ДКУП неравновесной СМК структуры в меди происходит в результате циклических процессов фрагментации и динамической рекристаллизации. В сплавах меди при ДКУП протекают процессы фрагментации и частичного деформационного старения с выделением наночастиц вторых фаз. Изучено влияние дисперсности СМК структуры меди и ее сплавов на сопротивление высокоскоростному деформированию и разрушению. Обнаружено, что измельчение зерна меди от 100 до 0,5 мкм в 6 раз увеличивает динамический предел упругости Гюгонио (σ_{HEL}) и динамический предел текучести (Y), но не изменяет динамическую (откольную) прочность (σ_{sp}) меди. Измельчение зерна меди до 0,05–0,35 мкм увеличивает в 1,4 раза откольную прочность. Показано, что в исследованных сплавах измельчение кристаллитов при ДКУП от 300 мкм до 1 мкм увеличивает σ_{HEL} и Y в 1,9–2,8 раза. Диспергирование СМК структуры до 0,2–0,3 мкм увеличивает в 1,5–4,0 раза динамические характеристики сплава Cu-0,1%Cr. Отмечено, что σ_{sp} меди и сплава Cu-0,1%Cr с СМК структурой, полученной ДКУП, составляет 2510 и 2760 МПа, что в 5,7 раза превышает статический предел прочности данных материалов с аналогичными структурами. Повышенный уровень механических свойств сплава, по сравнению с медью, связан с дополнительным упрочнением, обусловленным выделением наночастиц Cr в процессе ДКУП.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Структура» №АААА-А18-118020190116-6, программе Президиума РАН № 13 «Конденсированное вещество и плазма при высоких плотностях энергии» и проекту № 18-10-2-39 Программы УрО РАН.

**THE DYNAMIC PROPERTIES
OF COPPER AND COPPER ALLOYS
WITH SUBMICROCRYSTALLINE STRUCTURE
OBTAINED BY HIGH SPEED DEFORMATION**

D. N. Abdullina¹, I. V. Khomskaya¹, S. V. Razorenov²,
E. V. Shorokhov³, G. V. Garkushin²

¹M. N. Miheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of
RAS, Ekaterinburg, Russia

²Institute of Problems of Chemical Physics of RAS,
Chernogolovka, Russia

³Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: abdullina@imp.uran.ru

Methods of metallographic, electron microscopic analysis and diffraction of back-scattered electrons (EBSD) studied the submicrocrystalline (SMC) structure of copper of a purity 99.8%, Cu-0.03%Zr and Cu-0.1%Cr alloys subjected to dynamic channel-angular pressing (DCAP). The mechanical properties of SMC copper and alloys were investigated under shock compression with intensity 5.4–7.0 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. 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 by DCAP occurs as a result cyclic processes of fragmentation and dynamic recrystallization. In copper alloys by DCAP occurs processes of fragmentation and partial strain aging with the precipitation of nanoparticles of the second phase. The influence of the dispersion of SMC structure of copper and alloys on the resistance to high-speed deformation and fracture is studied. It has been found that the grain refinement of copper from 100 to 0.5 μm by a factor of 6 increases the dynamic Hugoniot elastic limit (σ_{HEL}) and the dynamic yield stress (Y), but does not change the dynamic (spall) strength (σ_{sp}) of copper. The grain refinement of copper to 0.05–0.35 μm raises the spall strength by 1.4 times. It is shown that the refinement of crystallites from 300 to 1 μm after DCAP increases σ_{HEL} and Y of the copper alloys by 1.9–2.8 times. Dispersion of SMC structure to 0.2–0.3 μm increases the dynamic characteristics of the Cu-0.1% Cr alloy by 1.5–4.0 times. It should be noted that the σ_{sp} of copper and Cu-0.1% Cr alloy with a SMC structure obtained by the DCAP is 2510 and 2760 MPa, which is more than 5.7 times higher than the static tensile strength of these materials with similar structures. The increased level of mechanical properties of the alloy, compared with copper, is associated with the additional strain hardening caused by the precipitation of Cr nanoparticles during DCAP.

The work was accomplished according to the State Assignment theme “Structure” (No AAAA-A18 118020190116 6), the program of the Presidium RAS

No 13 “Condensed matter and plasma at high energy densities” and partially supported by Ural Division of RAS (project No 18-10-2-39).

4-4

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА В ДИАПАЗОНЕ
ТЕМПЕРАТУР ОТ +20°C ДО +100°C**

А. П. Бекетов, А. Н. Ефанов,
М. В. Никольшин, О. С. Путилин

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

Взрывчатое вещество (ВВ) представляет собой спрессованную структуру, состоящую из гранул взрывчатки, армирующих волокон и связующего компонента. ВВ, как конструкционный материал, обладает рядом особенностей: разномодульность, разнотемпературность, разнотемпературность растяжению и сжатию, анизотропия.

В РФЯЦ – ВНИИТФ проведены испытания двух типов образцов из ВВ: полусферические образцы, нагруженные внутренним давлением, и цилиндрические образцы в условиях одноосного сжатия. Испытания проведены при температурах 20°C, 60°C, 80°C, 100°C. По результатам испытаний определены диаграммы деформирования ВВ и зависимости коэффициента Пуассона от деформации в температурном диапазоне от +20°C до +100°C, как для изотропного однородного материала.

**RESEARCH OF MECHANICAL PROPERTIES
OF AN EXPLOSIVE WITHIN
A TEMPERATURE RANGE FROM 20°C TO 100°C**

A. P. Beketov, A. N. Efanov,
M. V. Nikulshin, O. S. Putilin

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

The explosive is a pressed substance consists of an explosive granules, reinforcing fibers and a binder. The explosive as a structural material has different curves of deformation under tension and compression.

In RFNC – VNIITF, tests were held for two types of the explosive: hemispherical samples loaded by internal pressure and cylindrical samples in uniaxial compression. Tests were held at temperatures of 20°C, 60°C, 80°C, 100°C. According to results of experiments the deformation curves of explosive were obtained within a temperature range from 20°C to 100°C.

4-5

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ CHON ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

М. А. Бирюкова¹, Д. В. Петров¹, А. Ю. Гармашев¹,
А. К. Музыря¹, Ю. М. Ковалёв²,
Е. Б. Смирнов^{1,2}, А. В. Станкевич¹,
Е. С. Шестаковская², Л. Х. Бадретдинова³

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

²Ужно-Уральский государственный университет
(Национальный исследовательский университет),
Челябинск, Россия

³Казанский национальный исследовательский
технологический университет, Казань, Республика
Татарстан

Предложен подход построения полуэмпирического уравнения состояния для кристаллических CHON химических соединений. Вещества данного типа относятся к классу молекулярных кристаллов. Получено аналитическое выражение для потенциала Гельмгольца, с упругой компонентой учитывающей силы взаимодействия в молекулярном кристалле и тепловой компонентой представленной комбинацией моделей Дебая и Эйнштейна.

Параметры, предложенного уравнения состояния, определялись на основании данных полученных в статических и динамических экспериментах, что позволило максимально использовать имеющуюся экспериментальную информацию. В качестве объекта исследования было выбрано кристаллическое вещество $C_6H_6O_6N_6$ (триамино-тринитробензол).

Построенное уравнение состояния молекулярно-кристалла, имеет малое количество подбираемых параметров и описывает широкий набор известных экспериментальных данных для взрывчатого вещества ТАТБ. Можно ожидать, что использование данного уравнения состояния позволит повысить точность описания термодинамических параметров непрореагировавшего ВВ ТАТБ при численном моделировании ударно-волновых и детонационных процессов.

THE EQUATION OF STATE FOR CHON EXPLOSIVES

M. A. Biryukova¹, D. V. Petrov¹, A. Yu. Garmashev¹,
A. K. Muzyrya¹, Yu. M. Kovalyov²,
E. B. Smirnov^{1,2}, A. V. Stankevich¹,
E. S. Shestakovskaya², L. H. Badretdinova³

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

²South Ural State University (National Research University),
Chelyabinsk, Russia

³Kazan National Research University of Technology, Kazan,
Republic of Tatarstan

We proposed an approach to construct the semi empirical equation of state for crystalline chemical compound CHON. Substances of this type fall under the class

of molecular crystals. We obtained an analytical form for Helmholtz potential with elastic component considering interacting force in a molecular crystal, and thermal component presented by combination of Debye and Einstein models.

We determined the parameters of the offered equation of state from static and dynamic experiments data and it allowed us to make the best use of available experimental information. We chose the crystalline substance $C_6H_6O_6N_6$ (triamino trinitrobenzene) as a research object.

The equation of state for molecular crystal has few fitting parameters and presents a wide set of known experimental data for explosive TATB. One would expect that use of this equation of state would make it possible to improve precision in describing thermodynamic parameters of unreacted HE TATB during numerical modeling of shock wave and detonation processes.

4-6

СВЯЗЬ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАТРИЯ С КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРОЙ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Н. Б. Волков*, Е. А. Чингина

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*E-mail: nbv@iep.uran.ru

Экспериментально установлено, что при высоких давлениях натрия демонстрирует аномальное поведение. Так кривая плавления натрия имеет максимум $T = 1000$ К при $P = 28,3$ ГПа. При последующем росте давления температура плавления уменьшается вплоть до комнатных температур. При $P = 199$ ГПа натрий становится прозрачным для электромагнитного излучения. На основе анализа дифрактограмм сделан вывод о связи наблюдаемого аномального поведения натрия с перестройкой его кристаллической структуры. Обнаружено 6 кристаллических фаз высокого давления натрия: cI2 (Na-I) при $0 \leq P \leq 70$ ГПа ($1 \leq \rho/\rho_0 \leq 3,28$); cF4 (Na-II) – $70 \leq P \leq 114$ ГПа ($3,28 \leq \rho/\rho_0 \leq 3,97$); cI16 (Na-III) – $108 \leq P \leq 120$ ГПа ($3,86 \leq \rho/\rho_0 \leq 4,2$); oP8 (Na-IV) – $119 \leq P \leq 125,7$ ГПа ($4,15 \leq \rho/\rho_0 \leq 4,27$); tI19 (Na-V) – $125,7 \leq P \leq 156$ ГПа ($4,27 \leq \rho/\rho_0 \leq 4,717$); hP4 (Na-VI) – $199 \leq P \leq 208$ ГПа ($4,975 \leq \rho/\rho_0 \leq 5$). Структура hP4 является элементарной ячейкой двойной гексагональной решетки с плотной упаковкой (DHCP). Структуру ячейки cI16 можно представить в виде суперячейки из 8 деформированных cI2 ячеек, в которых атомы смещены из узлов на величину u . Целью предлагаемого сообщения является обсуждение влияния давления на изменение кристаллической и электронной структуры натрия, а также его физических свойств.

Проведен компьютерный эксперимент с помощью пакета программ LMTART-7 в рамках теории функционала плотности, в ходе которого рассчитаны электронная зонная структура, плотности электронных и фононных состояний, поверхности Ферми, а так

же электропроводность и теплопроводность. Расчеты проводились для cI2, cF4, hP4, а так же для cI16 с $u = 0$ и $0,05\text{\AA}$ в диапазоне $1 \leq \rho/\rho_0 \leq 6$. Для анализа топологических особенностей электронной плотности (ЭП) заряда использовались методы теории особенностей и квантовой химии. Были построены контурные карты распределения ЭП; определены особые точки ЭП и ее градиента; области бассейнов атомов; найдены положения и электронная структура неядерных аттракторов. Расчет кривой плавления проводился с использованием как двухфазной модели вещества, так и с помощью критерия Линдемана. Показано, что cF4 структура неустойчива, начиная с $\rho/\rho_0 = 1,111$, а cI2 – $\rho/\rho_0 = 3,47$. Сделан вывод о появлении диэлектрических свойств в поведении кинетических коэффициентов с ростом давления.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0389-2015-0023, а также при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-08-00466) и УрО РАН в рамках программы фундаментальных исследований (проект № 18-2-2-15).

THE RELATION OF THE SODIUM PHYSICAL PROPERTIES WITH CRYSTALLINE AND ELECTRONIC STRUCTURE AT HIGH PRESSURES

N. B. Volkov*, E. A. Chingina

Institute of Electrophysics, Russian Academy of Sciences, Ural Branch, Yekaterinburg, Russia

*E-mail: nbv@iep.uran.ru

Anomalous behavior of sodium at high pressures was experimentally established. So the melting curve of sodium has a maximum $T = 1000$ K at $P = 28.3$ GPa. The melting temperature decreases even to room temperature with a further pressure increase. Sodium becomes transparent to electromagnetic waves at $P = 199$ GPa. The abnormal behavior of sodium is explained by the rearrangement of its crystal structure on the basis of diffractograms analysis. Six sodium crystalline phases at high pressure were found: cI2 (Na-I) при $0 \leq P \leq 70$ GPa ($1 \leq \rho/\rho_0 \leq 3.28$); cF4 (Na-II) – $70 \leq P \leq 114$ GPa ($3.28 \leq \rho/\rho_0 \leq 3.97$); cI16 (Na-III) – $108 \leq P \leq 120$ GPa ($3.86 \leq \rho/\rho_0 \leq 4.2$); oP8 (Na-IV) – $119 \leq P \leq 125.7$ GPa ($4.15 \leq \rho/\rho_0 \leq 4.27$); tI19 (Na-V) – $125.7 \leq P \leq 156$ GPa ($4.27 \leq \rho/\rho_0 \leq 4.717$); hP4 (Na-VI) – $199 \leq P \leq 208$ GPa ($4.975 \leq \rho/\rho_0 \leq 5$). The hP4 structure is a unit cell of the double hexagonal close-packed lattice. The cI16 cell structure can be represented as a supercell formed by the eight deformed cI2 cells in which atoms are shifted from the lattice sites by a value of u . The purpose of the paper proposed is to discuss the pressure effect both on the crystalline and electronic structure and its physical properties of sodium.

A computer experiments using the LMTART-7 software package to calculate the electron band structure, the density of the electron and phonon states, the Fermi surfaces, as well as the electrical and thermal conductivity were carried out in the framework of the density functional theory. Calculations were performed for

cI2, cF4, hP4, and cI16 with $u = 0$ and 0.05\AA in range of $1 \leq \rho/\rho_0 \leq 6$. To analyze the topological features of the electron density (ED) the method of the singularities theory and quantum chemistry were used. Contour maps of ED distribution were plotted; singular points of ED and its gradient as well as regions of atomic basins were defined; the positions and electronic structure of non-nuclear attractors were found. The melting curve was calculated using both the two-phase model of the substance and the Lindemann criterion. It was established that the cF4 structure is unstable from $\rho/\rho_0 = 1.111$ and the cI2 structure – $\rho/\rho_0 = 3.47$. The appearance of dielectric properties in the behavior of the kinetic coefficients with increasing pressure was concluded.

The work carried out within the state order No 0389-2015-0023 and under the partial financial support from RFBR (project No 16-08-00466) and the Ural Branch of RAS within the UB RAS fundamental research program (project No 18-2-2-15).

4-7

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОР ПО РАЗМЕРАМ В АЛЮМИНИИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ РАСТЯЖЕНИИ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Д. С. Воронин*, А. Е. Майер**, В. С. Красников***

Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

E-mail: v-demonizerus@mail.ru*, mayer@csu.ru**, va_ja@mail.ru***

С помощью метода молекулярной динамики (МД) [1, 2], проводилось исследование кинетики образования пор в твердом алюминии, который подвергался всестороннему однородному растяжению. До растяжения алюминий имел идеальную решетку. МД эксперимент проводился при помощи программы LAMMPS [3] и потенциала межатомного взаимодействия AL99 [4]. Система состояла из 4 000 000 атомов алюминия, температура поддерживалась постоянной при помощи термостата, она варьировалась от 300 до 900K в различных расчетах. Система стабилизировалась баростатом при нулевом целевом давлении в течение 10 пс. Далее баростат отключался, и прилагалось растяжение по трем направления, система прослеживалась в течение 14 пс. Количество и радиус пор в МД системе были оценены в приближении их одинакового размера через объем и площадь занятой порой поверхности области [5, 6], а так же распределение пор по размерам и их количество определялось при помощи алгоритма поиска пор, взятого из работы [8]. Для анализа гистограмм (распределения радиуса пор от количества пор) применялся метод, предложенный в [8–10]. На основании данных, полученных из молекулярно-динамического моделирования, для твердого алюминия был разработан метод определения кинетических коэффициентов и верификации

модели кинетики нуклеации полостей. Показано, что на стадии гомогенной нуклеации распределение полостей носит характер экспоненциального распределения. Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ, государственное задание 3.2510.2017/4.6.

Литература

1. Allen M. P. Computer Simulation of Liquids. / M. P. Allen, D. J. Tildesley. // Oxford: Clarendon Press, 2002.
2. Шноль Э. Э. Метод молекулярной динамики в физической химии. / Э. Э. Шноль, А. Г. Гривцов // М.: Наука, 1996.
3. Plimpton S. Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics. // Journal of computational physics 117 (1), 1995, 1–19 p.
4. Mishin Y. Interatomic potentials for monoatomic metals from experimental data and ab initio calculations. / Farkas D., Mehl M. J., Papaconstantopoulos D. A. // Phys. Rev. B 59, 3393, 1999, doi: 10.1103/PhysRevB.59.3393, (<http://www.ctcms.nist.gov/potentials>).
5. Stukowski A. Computational Analysis Methods in Atomistic Modeling of Crystals. // March 2014, Vol. 66, Issue 3, P. 399–407.
6. Mayer P. Late stages of high rate tension of aluminum melt: Molecular dynamic simulation. / P. N. Mayer, A. E. Mayer // Journal of Applied Physics 120, 075901, 2016, doi: 10.1063/1.4959819.
7. Майер А. Е., Алгоритм для анализа распределения пор по размерам по результатам молекулярно-динамического моделирования. / А. Е. Майер, П. Н. Майер // Челябинский физико-математический журнал. – 2018. – Т. 3, вып. 3. – С. 193–201; doi: 10.24411/2500-0101-2018-13205.
8. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. // М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006, 816 с, ISBN 5-9221-0707-0.
9. Mayer P. Size distribution of pores in metal melts at cavitation and further stretching, and similarity with the spall fracture of solids. / P. N. Mayer, A. E. Mayer // International Journal of Heat and Mass Transfer 127 (2018) 643–657 p.
10. Mayer P. Evolution of foamed aluminum melt at high rate tension: A mechanical model based on atomistic simulations. / P. N. Mayer, A. E. Mayer // Journal of Applied Physics 124, 035901, 2018, doi: 10.1063/1.5039604.

INVESTIGATION OF THE PORE SIZE DISTRIBUTION IN ALUMINUM UNDER HIGH-RATE TENSION BY THE MOLECULAR DYNAMICS METHOD

D. S. Voronin*, A. E. Mayer** and V. S. Krasnikov***

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: v-demonizerus@mail.ru*,
mayer@csu.ru**, va_ja@mail.ru***

Using the method of molecular dynamics (MD) [1, 2], the study of the kinetics of the formation of pores in solid aluminum was carried in conditions of triaxial uniform tension. Before beginning of tension, aluminum had an ideal lattice. The MD experiment was performed using the LAMMPS program [3] and the interatomic interaction potential AL99 [4]. The system consisted of

4,000,000 aluminum atoms. The temperature was kept constant using a thermostat and was varied from 300 to 900K in various calculations. The system was stabilized by a barostat at zero target pressure for 10 ps. Next, the barostat was turned off, and tension was applied in three directions, the system was monitored for 14 ps. The number and pore radius in the MD system were estimated in the approximation of their equal size through the volume and surface area of the region occupied by pores [5, 6], as well as the pore size distribution and their number was determined using the pore search algorithm taken from [8]. For the analysis of histograms (pore radius distribution on the number of pores), the method proposed in [8–10] was used. Based on the data obtained from molecular dynamics simulation, a method for determining kinetic coefficients and verifying a model of pore nucleation kinetics was developed for solid aluminum. It was shown that at the stage of homogeneous nucleation the distribution of cavities has the character of an exponential distribution. Work is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the state task 3.2510.2017/4.6.

References

1. Allen M. P. Computer Simulation of Liquids. / M. P. Allen, D. J. Tildesley // Oxford: Clarendon Press, 2002.
2. Shnol E. E. Method of molecular dynamics in physical chemistry (russian). / E.E. Shnol., A.G. Grivtsov // Nauka, 1996, 336 p.
3. Plimpton S. Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics // Journal of computational physics 117 (1), 1995, 1–19.
4. Mishin Y. Interatomic potentials for monoatomic metals from experimental data and ab initio calculations / Farkas D., Mehl M. J., Papaconstantopoulos D. A. // Phys. Rev. B 59, 3393, 1999, doi: 10.1103/PhysRevB.59.3393, (<http://www.ctcms.nist.gov/potentials>).
5. Stukowski A. Computational Analysis Methods in Atomistic Modeling of Crystals // March 2014, Volume 66, Issue 3, pp 399–407.
6. Mayer P. Late stages of high rate tension of aluminum melt: Molecular dynamic simulation / P. N. Mayer, A. E. Mayer // Journal of Applied Physics 120, 075901, 2016, doi: 10.1063/1.4959819.
7. Mayer A. E. Algorithm for analysis of pore size distribution based on results of molecular dynamic simulations. / A. E. Mayer, P. N. Mayer // Chelyab. Fiz.-Mat. Zh., 3:3, 2018, 344–352 p.
8. Kobzar A. I. Applied mathematical statistics. For engineers and scientists. / Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov (russian). // FIZMATLIT, 2006, 816 p, ISBN 5-9221-0707-0.
9. Mayer P. Size distribution of pores in metal melts at cavitation and further stretching, and similarity with the spall fracture of solids. / P. N. Mayer, A. E. Mayer // International Journal of Heat and Mass Transfer 127, 2018, 643–657 p.
10. Mayer P. Evolution of foamed aluminum melt at high rate tension: A mechanical model based on atomistic simulations. / P. N. Mayer, A. E. Mayer // Journal of Applied Physics 124, 035901, 2018, doi: 10.1063/1.5039604.

4-8

МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ

С. Д. Гилев

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. Аprobация модели выполнена для меди. Построенное уравнение состояния описывает кривую холодного сжатия, нормальную изотерму, ударную сжимаемость, а также кривые разгрузки меди в диапазонах плотности, давления и внутренней энергии, для которых доступны опытные данные. Выполнены расчеты термодинамических характеристик меди (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.

FEW-PARAMETER EQUATION OF STATE

S. D. Gilev

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences, 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 Grü-

neisen 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. The derived equation of state describes the cold compression curve, normal isotherm, shock compressibility, as well as the copper unloading curves in density, pressure, and internal energy ranges for which experimental data are available. The thermodynamic characteristics of copper (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.

4-9

ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ МЕДИ ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ: РАВНОВЕСНАЯ МОДЕЛЬ И ГЕНЕРАЦИЯ ДЕФЕКТОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

С. Д. Гилев

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

На основе уравнения электросопротивления Блоха-Грюнайзена и уравнения состояния типа Ми-Грюнайзена рассматривается 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. Из экспериментов по измерению электросопротивления фольговых образцов при ударном сжатии определена зависимость удельного электросопротивления меди от ударного давления в диапазоне до 20 ГПа. Экспериментальные данные по удельному электросопротивлению сравниваются с предсказаниями модели. Показано, что электросопротивление ударно-сжатой меди не может быть описано уравнением Блоха-Грюнайзена. Предложено связать наблюдаемое расхождение между моделью и экспериментом с влиянием неравновесности при ударном сжатии, что приводит к генерации дефектов кристаллической структуры металла. Найдена зависимость дефектного электросопротивления меди от ударного давления. Оценена концентрация точечных дефектов в ударно-сжатой меди. Для корректного нахождения равновесного удельного электросопротивления и производных физических величин необходимо учитывать дефектное состояние ударно-сжатых металлов.

ELECTRICAL RESISTIVITY OF COPPER UNDER SHOCK COMPRESSION: EQUILIBRIUM MODEL AND GENERATION OF CRYSTAL STRUCTURE DEFECTS

S. D. Gilev

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia
E-mail: gilev@hydro.nsc.ru

A simple phenomenological model of the metal resistivity under high pressures and temperatures on the basis of the Bloch-Grüneisen resistivity equation and the Mie-Grüneisen equation of state is considered. Two free parameters of the model are obtained for copper from matching the model and the experimental data on isothermal compression and isobaric heating. A dependence of the electrical resistivity on the shock pressure is derived from experiments on measuring the electrical resistance of shock-compressed copper foils up to a pressure of 20 GPa. Experimental data and model predictions of the resistivity are compared. It is proved that the resistivity of shock-compressed copper cannot be described by the Bloch-Grüneisen equation. It is suggested to attribute the discrepancy between the experiment and the model data to the nonequilibrium effect under shock compression, which leads to generation of defects in the crystal structure of metals. A dependence of the defect resistivity on the shock pressure is derived. The concentration of point defects is estimated for shock-compressed copper. The defective state of shock-compressed metals has to be taken into account for correct evaluation of the equilibrium resistivity and derived physical quantities.

4-10

СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ПЛАСТИЧНОСТИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В АЛЮМИНИИ

Н. А. Грачёва, А. Е. Майер

Челябинский государственный университет,
Челябинск, Россия
E-mail: nagra45da@gmail.com, mayer@csu.ru

В связи с широким применением алюминия и сплавов алюминия существует большое количество исследований поведения данного материала при различных степенях и скоростях нагружения. В работе приведены результаты численного моделирования распространения в образце из алюминия ударной волны, возникающей в результате высокоскоростного соударения. Амплитуда ударных волн составляла несколько ГПа. Расчет динамики ударной волны проводился с использованием модели, учитывающей релаксацию с конечной скоростью напряжений, вышедших за предел текучести [1]; учитывалось изменение времени релаксации при деформации. Проведено сравнение с другим подходом,

в рамках которого девиатор напряжений сохраняется на динамическом пределе текучести [2], рассчитываемом по модели Зерилли-Армстронга [3]. Исследовалось влияние начальной температуры и толщины образцов. Также приведено сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными [4].

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ, проект № 3.2510.2017/4.6.

Литература

1. Popova T. V., Mayer A. E., Khishchenko K. V. Evolution of shock compression pulses in polymethacrylate and aluminum // *J. Appl. Phys.* – 2018. – Vol. 123, 235902.
2. Яловец А. П. Расчет течений среды при воздействии интенсивных потоков заряженных частиц // *ПМТФ.* – 1997. – том 38, вып. 1, с. 151–166.
3. Zerilli F. J., Armstrong R. W. Dislocation–mechanics–based constitutive relations for material dynamics calculations // *J. Appl. Phys.* – 1987. – Vol. 61, Issue. 5, p. 1816–1825.
4. Zaretsky E. B. and Kanel G. I. Effect of temperature, strain, and strain rate on the flow stress of aluminum under shock-wave compression // *J. Appl. Phys.* – 2012. – Vol. 112, 073504.

COMPARISON OF PLASTICITY MODELS FOR DESCRIPTION SHOCK WAVE PROCESSES IN ALUMINUM

N. A. Grachyova, A. E. Mayer

Chelyabinsky State University, Chelyabinsk, Russia
E-mail: nagra45da@gmail.com, mayer@csu.ru

There are a lot of studies of aluminum and aluminum alloys behavior at various degrees and speeds of load due to the widespread use of this material. The results of numerical simulation of the shock wave propagation in a sample of aluminum resulting from a high-speed collision were presented in this paper. The amplitude of the shock waves reaches some GPa. The calculation of the shock wave dynamics was carried out using a model that takes into account relaxation with a stresses finite rate out of beyond the yield point [1]; the change of the relaxation time during deformation taken into account. A comparison with another approach is made, within which the stress deviator is kept at a dynamic yield strength [2] that calculated by using the Zerilli-Armstrong model [3]. The influence of the initial temperature and thickness of the samples was investigated. Also a comparison of the results of numerical simulation with experimental data was carried out [4].

The work is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, state task 3.2510.2017/4.6.

References

1. Popova T. V., Mayer A. E., Khishchenko K. V. Evolution of shock compression pulses in polymethacrylate and aluminum // *J. Appl. Phys.* – 2018. – Vol. 123, 235902.
2. A. P. Yalovets. Calculation of flows of a medium induced by high-power beams of charged particles // *Journal of Applied*

Mechanics and Technical Physics. – 1997. – Vol. 38, Issue. 1, p. 137–150.

3. Zerilli F. J., Armstrong R. W. Dislocation–mechanics–based constitutive relations for material dynamics calculations // J. Appl. Phys. – 1987. – Vol. 61, Issue. 5, p. 1816–1825.

4. Zaretsky E. B. and Kanel G.I. Effect of temperature, strain, and strain rate on the flow stress of aluminum under shock-wave compression // J. Appl. Phys. – 2012. – Vol. 112, 073504.

4-11

**ПРОЦЕССЫ САМООРГАНИЗАЦИИ
И ЭВОЛЮЦИИ МИКРОСТРУКТУРЫ
ПРИ СИЛЬНОМ ВНЕШНЕМ ВОЗДЕЙСТВИИ
(СВАРКА ВЗРЫВОМ,
КРУЧЕНИЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ)**

Б. А. Гринберг, В. П. Пилюгин, М. С. Пушкин

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

E-mail: bella@imp.uran.ru

Разнообразные процессы самоорганизации свойственны очень большому кругу термодинамически неравновесных систем, которые находятся достаточно далеко от состояния равновесия. При этом могут возникать различные новые структуры и проявляться необычные свойства материалов, которые отсутствуют при других условиях. Можно полагать, что сценарий процессов самоорганизации в первую очередь определяется стремлением неравновесной системы обеспечить максимально быструю диссипацию имеющейся или подводимой избыточной свободной энергии. Среди подобного типа явлений особый интерес вызывает поведение разного рода веществ в условиях сильных внешних воздействий, в качестве которых использовалась сварка взрывом и кручение под давлением. Далее формулируются процессы самоорганизации для всех рассматриваемых случаев, для которых авторами доклада ранее были получены СЭМ и ТЭМ изображения микроструктуры.

Эволюция микроструктуры при сварке взрывом

- Фрагментация двух типов;
- Образование выступов и всплесков; квазиволновых и волновых поверхностей раздела;
- Локальное расплавление;
- Образование интерметаллидов.

Автоблокировка при нагреве без нагрузки и ее исчезновение после кручения под давлением

- Термоактивированные процессы перестройки дислокационной структуры при нагреве без нагрузки;
- Вытягивание дислокаций вдоль выделенных направлений при нагреве без нагрузки (автоблокировка);
- Превращения кристаллографических плоскостей в изогнутую поверхность при кручении, исчезновение автоблокировки.

Консолидация керамического порошка при ИПД кручением

- Перенос частиц, их вращение, взаимные столкновения, взаимодействие с окружением (синдром «толпы»);

- Образование и распространение микротрещин внутри пластин консолидированной керамики.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Давление» № АААА-А18-118020190104-3 и проекту №18-10-2-24 Программы УрО РАН при поддержке РФФИ (грант № 17-02-00025).

Литература

1. Сварка взрывом: процессы и структуры / под ред. Б. А. Гринберг, М. С. Иванова, С. В. Кузьмина, В. И. Лысака. – М. : Инновационное машиностроение, 2017. – 236 с.

2. B. A. Greenberg, M. A. Ivanov, V. P. Pilyugin / Processes of Self-Organization and Evolution of the Microstructure of Metals and Intermetallic Compounds under a Strong External Action // Physics of Metals and Metallography. – 2018. – V. 119, № 13. – P. 85–88.

**PROCESSES OF SELF-ORGANIZATION
AND EVOLUTION OF THE MICROSTRUCTURE
AT STRONG EXTERNAL ACTION
(EXPLOSION WELDING,
TORSION UNDER PRESSURE
[QUASI-STATIC DEFORMATION TECHNIQUE])**

B. A. Greenberg, V. P. Pilyugin, M. S. Pushkin

M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, RAS Ural Branch,
Yekaterinburg, Russia

E-mail: bella@imp.uran.ru

Different processes of self-organization are inherent to a number of thermodynamically-nonequilibrium systems that are sufficiently far from an equilibrium state. Thus there can appear various new structures and become evident unusual properties of materials which are absent under other conditions. It is believed that first of all the scenario of self-organization processes is determined by tendency of nonequilibrium system to provide maximum dissipation of available or input excess free energy. Among such phenomena special interest causes behaviour of different substances under the conditions of strong external actions such as explosive welding and torsion under pressure. Further we developed processes of self-organization for all viewed cases for which earlier we obtained SEM and TEM microscopic images.

Microstructural evolution at explosive welding

- Fragmentation of two types;
- Formation of peaks and bursts; quasi-wave and wave interfaces;
- Local melting;
- Formation of intermetallic compounds;

Automatic blocking at heating without the loading and its disappearance after torsion under pressure

- Thermally-activated processes of dislocation structure rearrangement at heating without loading;

- Extend of dislocations along preferential directions at heating without loading (automatic blocking);
- Transformations of crystallographic planes into curved plane under torsion, automatic blocking disappearance;

Consolidation of ceramic powder at spd torsion

- Particles transport, rotation, cross collisions, interaction with environment ("crowd" syndrome);
- Formation and propagation of micro cracks inside plates of the consolidated ceramics;

This work was performed within the state order under topic "Pressure" #AAAA-A18-118020190104-3 and the project #18-10-2-24 within the Ural Branch of RAS program under FASO support (grant # 17-02-00025).

References

1. Explosive welding: Processes and structures / edited by B. A. Greenberg, M. S. Ivanov, S. V. Kuzmin, V. I. Lysak. M.: Innovation machine-building industry, 2017, p. 236.
2. B. A. Greenberg, M. A. Ivanov, V. P. Pilyugin / Processes of Self-Organization and Evolution of the Microstructure of Metals and Intermetallic Compounds under a Strong External Action // Physics of Metals and Metallography. – 2018. – V. 119, #13. – P. 85–88.

4-12

ЛОКАЛЬНОЕ ПЛАВЛЕНИЕ МЕТАЛЛА В ОБОЛОЧКАХ В ПРОЦЕССЕ ВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ

С. Г. Андреев, М. М. Бойко,
Е. Ф. Грязнов, В. Ю. Клименко

Московский государственный технический университет
им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

При взрывном нагружении металлических оболочек образуются крупные и мелкие фрагменты.

Разрушение металлической оболочки при взрывном нагружении сопровождается локализованным сдвигом в зонах, прилегающих к внутренней поверхности оболочки, с образованием полос адиабатического сдвига (ПАС). Общий температурный фон в оболочке на момент разрушения оценивается в 300–400 °С, а в зонах ПАС, по мнению разных исследователей, достигает 1000–1400 °С.

Среди фрагментов стальных оболочек авторами настоящей работы впервые обнаружены сферические частицы, морфологические признаки которых свидетельствуют о достижении жидкого состояния в локальных зонах оболочки. Образование сферических частиц происходит в зонах локализованного сдвига сквозных фрагментообразующих трещин. Изучение морфологических признаков и состава частиц позволило установить, что большая часть частиц являются полыми; средний размер частиц составляет 200–300 мкм, максимальный – 750–1500 мкм; оболочки полых частиц состоят из окислов железа, что свидетельствует о горении материала частиц при движении в воздухе;

наиболее крупные частицы содержат центральное ядро, состоящее из практически чистого железа.

Проведено численное моделирование процесса локализованного сдвига, показано, что на сопряженных поверхностях температура существенно превышает общий температурный фон и может достигать температуры плавления.

LOCAL MELTING OF METAL IN SHELLS IN THE PROCESS OF EXPLOSIVE LOADING

S. G. Andreev, M. M. Boyko,
E. F. Gryaznov, V. Yu. Klimenko

Bauman MSTU, Moscow, Russia

During explosive loading of metal shells, large and small fragments are formed.

The destruction of the metal shell during explosive loading is accompanied by a localized shift in the zones adjacent to the inner surface of the shell, with the formation of adiabatic shear bands (ASB). The total temperature background in the shell at the time of destruction is estimated at 300–400 °C, and in the ASB zones, according to different researchers, it reaches 1000–1400 °C.

Among the fragments of steel shells, the authors of this work for the first time discovered spherical particles, the morphological signs of which indicate the attainment of a liquid state in the local zones of the shell. The formation of spherical particles occurs in the zones of localized shear of through fragment-forming cracks. The study of morphological features and composition of the particles made it possible to establish that most of the particles are hollow; the average particle size is 200–300 microns, the maximum – 750–1500 microns; the shells of hollow particles consist of iron oxides, which indicates the burning of the material of the particles when moving in air; the largest particles contain a central core consisting of practically pure iron.

A numerical simulation of the localized shear process was carried out, it was shown that the temperature on the conjugated surfaces significantly exceeds the total temperature background and can reach the melting temperature.

4-13

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО СЖАТИЯ ВОДОРОДА

С. А. Губин, И. В. Маклашова

Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», Москва, Россия

E-mail: gubin_sa@mail.ru

Ударная адиабата водорода рассчитана на основе равновесных термодинамических расчетов до 100 ГПа. В исходном состоянии водород находился в жидком состоянии с заданной плотностью. В результате ударно-волнового сжатия молекулярный водород H₂ дис-

социрует с образованием смеси атомарного и молекулярного водорода. При высокой температуре смесь H_2 и H ионизируется с образованием ионов H^+ и H_2^+ и электронов.

Для моделирования применялся компьютерный код TDS [1], в котором термодинамические свойства флюидных (газообразных сверхкритических) веществ рассчитывались на основе теоретически обоснованной модели уравнения состояния (УРС) газовой (флюидной) фазы. Эта модель УРС, построенная на основе теории возмущения и заданных потенциалов межмолекулярного взаимодействия, позволяет предсказывать термодинамические параметры флюидов и флюидных смесей, в том числе, продуктов химических реакций в широком диапазоне давлений и температур. Основная идея теории возмущения заключается в выражении избыточной энергии Гельмгольца смеси в виде ряда Тейлора относительно базисного твердосферного флюида. Предполагается, что молекулы, атомы и ионы продуктов взаимодействуют друг с другом в соответствии со сферически симметричными потенциалами Букингема Exp-6.

В качестве калорического УРС использовалась база данных ИВТАНТЕРМО.

Взаимодействие между ионами и электронами учитывалось заданием энергии кулоновского потенциала.

Результаты расчетов с различными значениями начальной плотности жидкого водорода, удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными [2, 3].

Литература

1. Victorov S. B., Gubin S. A., Maklashova I. V., Revyakin I. I. // In: Energetic Materials, Ignition, Combustion and Detonation. 32nd Int. Annual Conf. of ICT, 2001, P. 69/1–69/15.
2. Loubeyre P., Brygoo S., Eggert J., Celliers P. M., Spaulding D. K., Rygg J. R., Boehly T. R. // Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics 2012, 86 (14), 144115
3. S. P. Marsh (Ed.). LASL Shock Hugoniot Data, Univ. California Press, Berkeley, 1980.

THERMODYNAMIC MODELING OF SHOCK COMPRESSED HYDROGEN

S. A. Gubin, I. V. Maklashova

National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow,
Russia

E-mail: gubin_sa@mail.ru

The Hugoniot adiabat of hydrogen is calculated up to 100 GPa based on equilibrium thermodynamic calculations. The molecular hydrogen was a liquid at a predetermined density in the initial state. As a result of shock-wave compression, molecular hydrogen H_2 dissociates to form a mixture of atomic and molecular hydrogen. The mixture of H_2 and H can ionize by forming H^+ and H_2^+ ions and electrons at high temperature.

The computer code TDS [1] was used for simulation in which the thermodynamic properties of fluid (super-

critical gaseous) substances were calculated based on the accurate theoretically justified model of the equation of state (EOS) of the gas (fluid) phase. This EOS model is built on the basis of perturbation theory and given intermolecular interaction potentials, it makes possible to predict the thermodynamic parameters of fluids and fluid mixtures, including the products of chemical reactions in a wide range of pressures and temperatures. The main idea of the perturbation theory is to express the Helmholtz excess energy of the mixture in the form of a Taylor series relative to the basic hard sphere fluid. It is assumed that the molecules, atoms and ions of the products interact with each other in accordance with the spherically symmetric Buckingham potential Exp-6.

The IVTANTERMO database was used as a caloric EOS.

The interaction between ions and electrons was considered as the Coulomb energy.

The results of calculations with different values of the initial density of liquid hydrogen are in satisfactory agreement with the experimental data [2, 3].

References

1. Victorov S. B., Gubin S. A., Maklashova I. V., Revyakin I. I. // In: Energetic Materials, Ignition, Combustion and Detonation. 32nd Int. Annual Conf. of ICT, 2001, P. 69/1–69/15.
2. Loubeyre P., Brygoo S., Eggert J., Celliers P. M., Spaulding D. K., Rygg J. R., Boehly T. R. // Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics 2012, 86 (14), 144115
3. S. P. Marsh (Ed.). LASL Shock Hugoniot Data, Univ. California Press, Berkeley, 1980.

4-14

НЕРАВНОПЛЕЧНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР С ЛИНЕЙНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ФИЗИКИ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА НА УСТАНОВКЕ ЛУЧ

К. Л. Губский¹, А. В. Михайлюк¹, В. Н. Деркач²,
А. П. Кузнецов¹, В. В. Алексеев²

¹Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», Москва, Россия

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

Представлено описание интерферометра, разработанного для исследования ударных волн на установке ЛУЧ. Он основан на принципах неравноплечной интерферометрии и позволяет измерять скорости до 100 км/с с временным и пространственным разрешением 10 пс и 5 мкм соответственно. Приводятся первые результаты экспериментов.

LINE IMAGE VELOCIMETER FOR SHOCK EXPERIMENTS AT LUCH LASER FACILITY

K. L. Gubskiy¹, A. V. Mikhailyuk¹, V. N. Derkach²,
A. P. Kuznetsov¹, V. V. Alekseev²

¹National Research Nuclear University «MEPhI»,
Moscow, Russia

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

Line image interferometer for research of shock waves at LUCH laser facility was developed and constructed. It is based on VISAR principles and allows to measure velocity up to 100 km/s with 10 ps and 5 μ m resolution. The first experimental results are presented.

4-15

ИССЛЕДОВАНИЕ СДВИГОВОЙ ПРОЧНОСТИ БЕРИЛЛИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

В. К. Баранов, А. М. Глыбин, П. В. Дудай,
А. В. Ивановский, Д. А. Ирничев, А. А. Зименков,
А. И. Краев, С. С. Надежин

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

E-mail: duday@elph.vniief.ru

В последнее время наблюдается возрастание интереса мирового научного сообщества к такому материалу, как бериллий, демонстрирующему ряд уникальных свойств и характеристик в условиях динамического нагружения. Проведенные исследования выявили высокую удельную сдвиговую прочность бериллия, аномально низкий коэффициент Пуассона, высокую скорость звука, а также сложную зависимость пластичности от скорости деформации.

Имеющаяся на сегодняшний день экспериментальная информация, касающаяся таких свойств как, например, сдвиговая и откольная прочность, крайне ограничена и недостаточна для построения широкодиапазонных феноменологических расчетных моделей. Традиционно, для исследования сдвиговой прочности бериллия используются такие методики как составной стержень Гопкинсона и метод «возмущений».

Рассмотрен новый метод исследования сдвиговой прочности, основанный на динамическом нагружении бериллиевых образцов цилиндрической оболочкой (лайнром), ускоряемой магнитным полем взрывомагнитного генератора (ВМГ). Метод позволяет реализовать в исследуемых образцах достаточно широкий диапазон скоростей деформации 10^3 – 10^5 с⁻¹ с возможностью выбора режима нагружения: ударно-волнового, квазиизэнтропического и комбинированного.

Представлены результаты серии экспериментов по исследованию сдвиговой прочности бериллия в условиях ударно-волнового нагружения. Применение ВМГ позволило реализовать высокую точность контроля и воспроизведения параметров нагружения. Лазерная опто-гетеродинная методика измерения скорости обеспечила высокоточную регистрацию процесса взаимодействия лайнера и образцов до и после соударения. В совокупности с измерением радиусов остановки сохраненных бериллиевых образцов это предоставило возможность определить сдвиговую прочность бериллия в указанном диапазоне нагружений и верифицировать различные математические модели его динамических свойств.

Расчетно-теоретический анализ результатов представленной серии экспериментов показал, что метод исследования динамических свойств материалов с использованием ВМГ позволяет получать данные о сдвиговой прочности в области высоких пластических деформаций. В экспериментах на бериллиевых образцах различной толщины достигнуты конечные деформации в диапазоне 10–100%, что значительно превышает предельные значения, получаемые стандартными методами определения прочности.

STUDY OF SHEAR STRENGTH OF BERYLLIUM WITH THE USE OF EXPLOSIVE MAGNETIC GENERATORS

V. K. Baranov, A. M. Glybin, P. V. Duday,
A. V. Ivanovsky, D. A. Irinichev, A. A. Zimenkov,
A. I. Kravev, S. S. Nadezhin

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

E-mail: duday@elph.vniief.ru

In recent years the global scientific community displays a growing interest in beryllium, a material that exhibits a set of unique properties and characteristics under dynamic loading. The conducted studies revealed high specific shear strength of beryllium, an abnormally low Poisson ratio, a high sound velocity, and a complex dependence of plasticity on strain rate.

The available experimental data on such properties as shear and spall strengths is very limited and insufficient to build wide-range phenomenological computational models. Traditionally, shear strength of beryllium is studied by such methods as the split Hopkinson bar method and the method of perturbations.

The paper describes a new method to study shear strength based on dynamic loading of beryllium samples by a cylindrical shell (liner) accelerated by a magnetic field of an explosive magnetic generator (EMG). The method makes it possible to implement a rather wide strain rate range from 10^3 to 10^5 s⁻¹ with a possibility of loading mode selection (a shock wave mode, a quasi-isentropic mode, and a mixed one).

The results of a series of experiments on shear strength of beryllium under shock wave loading are presented. The use of EMG made it possible to realize high

precision of control and reproduction of loading parameters,

The laser-heterodyne technique of velocity measurement provided for high-precision recording of the process of liner-sample interaction before and after collision. Together with the measurement of stopping radii of recovered beryllium samples, this allowed the authors to determine shear strength of beryllium in the specified loading range and to verify different simulation models of its dynamic properties.

Computational and theoretical analysis of the considered series of experiments showed that the method of studying dynamic properties of materials with the use of EMG allows obtaining data on shear strength in the range of high plastic strain. The finite strain obtained in the experiments with beryllium samples of different thickness reached 10–100%, which greatly exceeds maximum values obtained by standard strength measuring methods.

4-16

**КОНТИНУАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ
КАРБИДА БОРА И СТАЛИ
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ
ПО ВЗРЫВНОМУ ОБЖАТИЮ
СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК**

С. А. Дьячков, С. Ю. Григорьев,
В. В. Жаховский, А. Н. Паршиков

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

E-mail: serj.dyachkov@gmail.com

В работе представлены континуальные модели карбида бора и стали для задач, в которых материалы подвергаются экстремальным воздействиям ударных и детонационных волн. Приводится сравнение результатов расчета методом сглаженных частиц (SPH) как с опытами по одноосному нагружению, так и в случае взрывного обжата сферических оболочек. Показано, что использование результатов последних позволяет более точно настроить модели материалов в области напряжений порядка 1 ГПа.

**THE MODELS OF BORON CARBIDE AND STEEL
FOR SIMULATIONS OF EXPERIMENTS
ON EXPLOSIVE COMPRESSION OF SPHERICAL
SHELLS USING COMPUTATIONAL FLUID
DYNAMICS**

S. A. Dyachkov, S. Yu. Grigoryev,
V. V. Zhakhovsky, A. N. Parshikov

Federal State Unitary Enterprise Dukhov Research Institute of
Automatics, Moscow, Russia

E-mail: serj.dyachkov@gmail.com

The continuum models of boron carbide and steel are developed for samples subjected to extreme loading of shock and detonation waves. The results of simulations

using smoothed particles hydrodynamics (SPH) method are compared to the experimental data on uniaxial and explosive spherical compression of samples. The latter are shown to be useful for precise adjusting of the models in the region of stresses about 1 GPa.

4-17

**РАСЧЕТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ
ПО МЕТОДУ ЭФФЕКТИВНОГО ПОТЕНЦИАЛА
МЕЖАТОМНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ,
ЗАВИСЯЩЕГО ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ**

Д. А. Емелин, А. А. Рыкунов

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

E-mail: emelinda@vniitf.ru

Первопринципные методы изучения физических свойств кристаллов базируются на расчетах изменения термодинамических потенциалов системы в зависимости от типов частиц, их положения в моделируемой области, плотности, приложенного давления, количества структурных дефектов и т. д. Моделирование этих зависимостей зачастую проводится путем расчета плотности фоновых состояний при нулевой температуре, а учет тепловых эффектов при $T > 0$ К производится с помощью квазигармонического приближения. Такой подход неприменим для кристаллов, у которых ангармонические поправки вносят значительный вклад в динамику решетки (например, ОЦК-Li и ОЦК-Zr) или определяют ее (например, гидрид ГЦК-Pd). Кроме того, наличие в фоновых спектрах отрицательных частот при $T = 0$ К является непреодолимым препятствием для вычисления тепловых вкладов в свободную энергию при ненулевых температурах.

Для оценки температурных эффектов может быть использован метод квантовой молекулярной динамики, позволяющий рассматривать эволюцию систем, состоящих из нескольких сотен атомов, на временах порядка нескольких десятков пикосекунд. Однако ряд внутренних ограничений, таких как невозможность вычисления ионной энтропии и учета энергии нулевых колебаний, приводит к тому, что, например, границы областей термодинамической устойчивости кристаллических фаз веществ при $T > 0$ К приходится определять в рамках тех или иных модельных представлений.

В последнее десятилетие был разработан метод эффективного потенциала межатомного взаимодействия зависящего от температуры (TDEP) [1], позволяющий по данным молекулярной динамики, во-первых, учесть ангармонические эффекты, а во-вторых, произвести расчет зависимости фоновых спектров кристалла от температуры. На основе полученных спектров можно вычислить термодинамические

функции фаз, в том числе для систем, динамически нестабильных при $T = 0$ К, недоступные или недостаточно точно описываемые в рамках квазигармонического приближения.

В этой работе представлены результаты исследования сходимости метода TDEP на модельных системах и анализ зависимости фононного спектра меди от температуры на нулевой изобаре, с помощью методов квантовой молекулярной динамики в рамках теории функционала плотности с использованием псевдопотенциального приближения. Согласие полученных по методу TDEP фононных спектров при конечных температурах с экспериментальными и расчетными данными также показано на примере полиморфных модификаций лития, бериллия, магния, меди, железа, циркония и урана, характеризующихся различными пространственными группами симметрии.

Литература

1. O. Hellman, P. Steneteg, A. Abrikosov, S.I. Simak // Phys. Rev. B – 2013. – V. 87. – P. 104111.

CALCULATION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF METALS WITH THE TEMPERATURE DEPENDENT EFFECTIVE POTENTIAL METHOD

D. A. Emelin, A. A. Rykounov

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

E-mail: emelinda@vniitf.ru

The ab initio methods that are used to study the physical properties of crystals are based on the analysis of how the thermodynamic potentials of the system depend on the type of particles and their configuration in the region being modeled, density, temperature, pressure, structural defects and so on. These dependences are often modeled through the calculation of phonon densities of states at zero temperature and the temperature effects at $T > 0$ K are allowed for with the quasi-harmonic approximation [1]. This approach cannot be applied to crystals for which the anharmonic corrections significantly contribute to (for example, bcc Li and bcc Zr) or control (fcc Pd hydride) lattice dynamics. Moreover, the presence of negative frequencies in phonon spectra makes it impossible to calculate thermal contributions to free energy.

The temperature effects can be evaluated with quantum molecular dynamics capable of tracking the evolution of systems of hundreds atoms on time scales of tens picoseconds. However, some inherent restrictions such as impossibility of calculating ion entropy and accounting for zero point energy results in, for example, a situation when one has to determine the boundaries of regions where the crystal phases are thermodynamically stable at $T > 0$ K within the scope of model formulations.

The recently developed Temperature Dependent Effective Potential method (TDEP) [1] which allows the anharmonic effects to be accounted for and phonon spectra versus temperature for metals calculated from quantum

molecular dynamics data. The frequencies it gives can be used to calculate the thermodynamic functions of phases, including ones that are mechanically unstable at $T = 0$ K, unavailable or described by quasi-harmonic approximation with insufficient accuracy.

The paper describes our investigation into the convergence of TDEP on model systems and presents calculated phonon spectra for lithium, beryllium, magnesium, iron, zirconium, and uranium at finite temperatures. The calculations were done with quantum molecular dynamics methods within density functional theory in the frame of pseudopotential method. The spectra are shown to agree with experimental and calculated data for polymorphous modifications of the above metals characterized by different space groups. In our view, TDEP is promising for calculation of phonon spectra of metals, including those with magnetic properties, and can be used to determine the regions where polymorphous modifications of metals are dynamically stable and to derive local equations of state.

The paper presents results obtained in our study of TDEP convergence on model systems and analysis of the copper phonon spectrum dependence on temperature on zero-pressure isobar with quantum molecular dynamics methods within density functional theory in the frame of pseudopotential method. The phonon spectra calculated with the TDEP method at finite temperatures for the polymorphic modifications of lithium, beryllium, magnesium, copper, iron, zirconium, and uranium which differ in spatial symmetry are also shown to agree with experimental and calculation data.

References

1. Hellman O., Steneteg P., Abrikosov I. A., Simak S. I. // Phys. Rev. B – 2013. – V. 87. – P. 104111.

4-18

РЕГИСТРАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СХОЖДЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ И СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК МЕТОДОМ МНОГОКАНАЛЬНОГО ГЕТЕРОДИН-ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Д. А. Калашников, А. В. Федоров, С. А. Финюшин,
Е. А. Чудаков, И. В. Шмелев, И. С. Гнутов,
Л. К. Антонюк, А. О. Яговкин, М. В. Жерноклетов,
А. В. Дергунов, М. П. Калинин, М. Ю. Батьков

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

Одним из направлений исследований газодинамических процессов является многоканальная регистрация схождения цилиндрических и сферических оболочек. Для этого успешно применяется методика гетеродин-интерферометра (PDV).

В докладе представлены результаты экспериментов по регистрации скорости схождения цилиндрических и сферических образцов а также особенностей их разрушения в зависимости от физико-механических

свойств материалов. Описана конструкция составных оптических датчиков, позволяющих проводить измерения с помощью коллиматоров PDV в экспериментальных сборках с цилиндрической геометрией.

Зарегистрированы и проанализированы особенности разрушения сферических оболочек из различных металлов (сталь, чугун, цинк) на сдвиговых деформациях. Приведены данные, полученные в опытах с одноточечным иницированием сферических блоков. Для стальных и медных цилиндрических образцов получены профили скорости их схождения, рассчитаны параметры отскольного импульса.

REGISTRATION OF CYLINDRICAL AND SPHERICAL SHELLS CONVERGENCE PARAMETERS WITH MULTICHANNEL PDV SYSTEM

D. A. Kalashnikov, A. V. Fedorov, S. A. Finyushin,
E. A. Chudakov, I. V. Shmelev, I. S. Gnutov,
L. K. Antoniuk, A. O. Iagovkin, M. V. Zhernokletov,
A. V. Dergunov, M. P. Kalinin, M. U. Batkov

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

E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

One of the research areas of gas-dynamic processes is a multichannel recording convergence of cylindrical and spherical shells. For this has been successfully applied heterodyne interferometer (PDV).

The paper presents the results of experiments on the recording speed of convergence of cylindrical and spherical designs and features of their destruction, depending on the physico-mechanical properties of materials. The design of the special optical sensors that enable measurements using PDV collimators in experimental assemblies with cylindrical geometry.

Recorded and analyzed characteristics of fracture metal spherical shells (steel, iron, zinc) to shear deformations. The data obtained in experiments with single-point initiation spherical assembly. For steel and copper cylindrical samples obtained velocity profiles of their convergence, spall pulse parameters are calculated.

4-19

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ НА ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЯ

А. И. Киселёв, В. Г. Шевченко,
Н. А. Попов, Л. А. Акашев

Институт химии твердого тела УрО РАН, Екатеринбург,
Россия

E-mail: kis1771@yandex.ru

Исследовано изменение заполнения поверхностных состояний электронов как пленки алюминия, так и его порошка. Результаты получены на базе данных оптического эксперимента.

Экспериментальные зависимости оптических постоянных от длины волны были получены эллипсометрическим методом Битти (эллипсометр ЛЭФ-3М, в спектральном диапазоне 0,4–2,5 мкм). Анализировались полученные на основе этих данных спектры оптической проводимости. Показано, что заполнение электронами поверхностных состояний алюминия в виде порошка на порядок превышает такое заполнение как для пленки алюминия, так и для массивных образцов алюминия. Работа выполнена по госбюджетной теме № АААА-А16-116122810219-4 и при частичной поддержке проекта УрО РАН № 18-3-3-5.

EFFECT OF DISPERSION ON ELECTRONIC PROPERTIES OF ALUMINUM

A. I. Kiselev, V. G. Shevchenko,
N. A. Popov, L. A. Akashev

Institute of Solid State Chemistry Ural Branch of RAS,
Ekaterinburg, Russia

E-mail: kis1771@yandex.ru

The change in the electron filling of the surface states of both the aluminum film and its powder was investigated. The results were obtained on the basis of optical experiment data. The experimental dependences of the optical constants from wavelength were obtained using the Beattie ellipsometric method (LEF-3M ellipsometer, in the spectral range 0.4–2.5 μm). The optical conductivity spectra obtained on the basis of these data were analyzed. It is shown that the electron filling of the surface states on powder aluminum exceeds the filling for both aluminum film and bulk aluminum samples by an order of magnitude. The research was carried out within the state assignment of FASO of Russia (theme № АААА-А16-116122810219-4) and supported by Program of UD RAS, project № 18-3-3-5.

4-20

ОПИСАНИЕ СДВИГОВОЙ ПРОЧНОСТИ СТАЛИ 30ХГСА НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ МОДЕЛИ MTS

Р. М. Кичигин^{1,2}, Д. М. Шалковский², А. В. Караваев²,
А. В. Петровцев², Е. А. Козлов²,
А. М. Брагин³, А. К. Ломунов³

¹Южно-Уральский государственный университет
(Национальный исследовательский университет),
Челябинск, Россия

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

³НИИ механики Нижегородского государственного
университета им. Н. И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия

В докладе представлена модель для описания изменения упругопластических свойств конструкционной стали 30ХГСА при различных режимах нагружения.

В основе лежит известная модель MTS (Mechanical Threshold Stress) [1, 2], в которой изменение сдвиговой прочности рассматривается как процесс накопления, движения и торможения дислокаций, вследствие их взаимодействия с дефектами. В исходную MTS модель введены дополнительные соотношения для описания изменения сдвиговой прочности при высоких скоростях деформирования и учета влияния обратимого полиморфного α - ϵ превращения.

Определение параметров модели проводилось по результатам динамических испытаний образцов стали 30ХГСА по методике Кольского на установке разрезных стрежней Гопкинсона [3]. Испытания проводились при нормальной ($T = 20^\circ\text{C}$) и повышенной ($T = 300^\circ\text{C}$) температурах со скоростями деформации $\dot{\epsilon} \sim (1\div 5) \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$. Исследовались образцы стали 30ХГСА трех типов: первый тип образцов изготавливался из материала в исходном состоянии; в образцах второго типа материал предварительно подвергался взрывному нагружению малой амплитуды ($\sigma \approx 12 \text{ ГПа}$) в области исходной α -фазы, в материале третьего типа образцов при взрывном нагружении ($\sigma = 17\div 25 \text{ ГПа}$) происходило обратимое полиморфное α - ϵ превращение. Также использовались данные, полученные при квазистатических условиях деформирования ($\dot{\epsilon} = 0,001 \text{ c}^{-1}$). Калибровка модели для сверхвысоких скоростей деформации проводилась с привлечением результатов теоретических оценок сдвиговых напряжений на фронте сильных стационарных ударных волн ($60\div 200 \text{ ГПа}$) [4] и анализе профилей слабых волн напряжений [5] в железе.

Полученная широкодиапазонная модель для стали 30ХГСА позволяет описывать и прогнозировать поведение материала при различных температурах, скоростях деформации, а также учитывать влияние фазового α - ϵ превращения.

Литература

1. P. S. Follansbee and U. F. Kocks. A constitutive description of the deformation of copper on the use of the mechanical threshold stress as an internal state variable. / *Acta metal.* Vol. 36, No. 1, pp. 81–93, 1988.
2. U. F. Kocks. Realistic constitutive relations for metal plasticity / *Materials Science and Engineering A* 317 (2001), pp. 181–187
3. A. M. Bragov, G. T. Gray III, E. A. Kozlov, A. K. Lomunov, A. V. Petrovtsev, I. V. Sergeichev. Proc.V HDP Symp., France, 2003, Tome I, pp. 297–309
4. Wallace, D. C., Irreversible thermodynamics of flow in solids, *Phys.Rev. B*, 1980, vol. 22, pp. 1477–1486. Wallace, D. C., Flow process of weak shock in solids, *Phys.Rev. B*, 1980, vol. 22, pp. 1487–1502.
5. Tonks D. L. The datashop: A database of weak-shock constitutive data., Los Alamos National Laboratory Report, LA-12068-MS, 1991.

30CGSA STEEL SHEAR STRENGTH DESCRIPTION WITH A MODIFIED MTS MODEL

R. M. Kichigin^{1,2}, D. M. Shalkovsky², A. V. Karavayev²,
A. V. Petrovtsev², E. A. Kozlov²,
A. M. Bragin³, A. K. Lomunov³

¹South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

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

³Lobachevsky Nizhny Novgorod State University's Institute for Mechanical Research, Nizhny Novgorod, Russia

The paper presents a model which describes how the elastic-plastic properties of structural 30CGSA steel vary under different conditions of loading. The model is based on the known Mechanical Threshold Stress (MTS) model [1, 2] where the variation of shear strength is considered as a process of dislocation accumulation, motion and deceleration due to dislocation interaction with defects. Additional relations are introduced in the original MTS model to describe the variation of shear strength at high strain rates and the effect of the reversible α - ϵ polymorphic transformation.

Parameters of our model were determined from results of 30CGSA steel dynamical testing with the split Hopkinson pressure bars [3] by the Kolsky technique. The tests were done under ambient ($T = 20^\circ\text{C}$) and elevated ($T = 300^\circ\text{C}$) temperatures and strain rates $\dot{\epsilon} \sim (1\div 5) \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$. Three types of 30CGSA steel samples were tested: 1) samples of material in the initial state; 2) samples of material which was subjected to explosive loading at a small amplitude ($\sigma \approx 12 \text{ GPa}$) in the initial α -phase, and 3) samples of material where the reversible α - ϵ polymorphic transformation occurred in response to explosive loading ($\sigma = 17\div 25 \text{ GPa}$). We also used quasi-static data ($\dot{\epsilon} = 0.001 \text{ s}^{-1}$). At super-high strain rates, we used theoretical evaluations of shear stresses in the front of strong stationary shocks ($60\div 200 \text{ GPa}$) [4] and results of analysis into the profiles of weak stress waves [5] in iron.

The resulted wide-range model for 30CGSA steel helps describe and predict behavior of the material at different temperatures and strain rates including the effect of the α - ϵ phase transformation.

References

1. P. S. Follansbee and U. F. Kocks. A constitutive description of the deformation of copper on the use of the mechanical threshold stress as an internal state variable. / *Acta metal.* Vol. 36, No. 1, pp. 81–93, 1988.
2. U. F. Kocks. Realistic constitutive relations for metal plasticity / *Materials Science and Engineering A* 317 (2001), pp. 181–187
3. A. M. Bragov, G. T. Gray III, E. A. Kozlov, A. K. Lomunov, A. V. Petrovtsev, I. V. Sergeichev. Proc.V HDP Symp., France, 2003, Tome I, pp. 297–309
4. Wallace, D. C., Irreversible thermodynamics of flow in solids, *Phys.Rev. B*, 1980, vol. 22, pp. 1477–1486. Wallace, D. C., Flow process of weak shock in solids, *Phys.Rev. B*, 1980, vol. 22, pp. 1487–1502.

5. Tonks D. L. The datashop: A database of weak-shock constitutive data., Los Alamos National Laboratory Report, LA-12068-MS, 1991.

4-21

**ДВУХСТУПЕНЧАТАЯ ЛЕГКОГАЗОВАЯ ПУШКА
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ
ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ПРОЦЕССАХ**

А. Ю. Гармашев, Е. Б. Смирнов,
Д. Т. Юсупов, А. И. Клёнов

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

Изучение динамических свойств конструкционных материалов является одним из основных направлений развития современной науки и техники. Начиная с середины прошлого века и по сегодняшний день главным инструментом для исследования динамических свойств конструкционных материалов являются ударные волны. Применение ударной волны в качестве инструмента исследования позволяет изучать сжимаемость конструкционных материалов, обнаруживать фазовые превращения и исследовать ряд других явлений, происходящих в области высоких давлений и температур.

В качестве систем ударно-волнового нагружения, как правило, используются взрывные ударно-волновые генераторы и легкогазовые пушки. Бесспорным преимуществом легкогазовых пушек является возможность плавной регулировки скорости соударения, обеспечение минимального и контролируемого в каждом опыте перекоса ударника относительно плоскости образца, высокая однородность области одномерного течения за фронтом ударной волны в исследуемом образце. Для измерения ударной сжимаемости важно также, что ударник в процессе разгона в легкогазовых ускорителях практически не претерпевает разогрева.

В работе приводится описание конструкции двухступенчатой легкогазовой пушки, предназначенной для исследования свойств ударно-сжатых материалов. Технические решения, заложенные в конструкцию пушки, опробованы в ходе испытаний.

Приведены первые результаты нагружения образцов, полученные с использованием электроконтактных и пьезорезистивных датчиков.

**TWO-STAGE LIGHT-GAS GUN
FOR MATTER PROPERTIES STUDIES
AT HIGH-INTENSITY PROCESSES**

A. Yu. Garmashev, E. B. Smirnov,
D. T. Yusupov, A. I. Klyonov

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

Analysis of structural materials dynamic properties is one of the main directions of state-of-the-art science and technology development. Since the middle of the last century and up to date, the main tools for structural materials dynamic properties research were shock waves. Shock wave application as the research tool allows us to investigate structural materials compressibility, to detect phase transitions and to investigate a number of other phenomena in the field of high pressures and temperatures.

Generally, explosive shock-wave generators and light-gas guns are used as shock-wave loading systems. Ability of smooth adjustment of impact velocity, maintenance of the impactor minimum and controlled distortion with respect to the sample plane in each experiment, high uniformity of one-dimensional flow behind the shock front in the test sample are distinctive benefits of the light-gas guns. When measuring shock compressibility it is also important that the impactor practically does not warm up during speedup in the light-gas accelerators.

This paper describes the construction of the two-stage light-gas gun intended for study of the shock-compressed materials properties. The technologies included in the construction of the gun, were tested during the trials.

We presented the first results of the sample loading obtained using the contact and piezoresistive sensors.

4-22

**РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ
УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО
ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ
И ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ КВАРЦИТА**

М. Г. Коваленко, Д. М. Шалковский, А. В. Петровцев,
А. В. Павленко, С. Н. Малюгина, Д. Т. Юсупов

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

Доклад посвящен построению модели одной из наиболее распространенных горных пород – кварцита. Для описания изменения термодинамических свойств кварцита в широком диапазоне нагружающих импульсов используется многофазное уравнение состояния [1], которое описывает три основные фазы: α -кварц, стишовит и жидкий кварц. Положение линии фазового равновесия α -кварца и стишовита определено по результатам анализа опытов с разгрузкой ударно-сжатого кварцита в буферные материалы. Для полученной линии равновесия проведена калибровка кинетической модели прямого неравновесного фазового перехода. Изменение сдвиговой прочности кварцита описывается упругопластической моделью, в которой учитывается деформационное упрочнение (и разупрочнение), влияние термодинамического и фазового состояний. Параметры моделей кинетики фазовых переходов и упругопластических свойств определены по результатам моделирования

ударно-волновых экспериментов с образцами сплошного кварца и привлечением данных по сжимаемости смеси мелкодисперсного кварца с высокопластичными материалами (фторопласт, парафин) [2, 3]. В модели учитывается высокий уровень неравновесности прямого фазового превращения, который существенно влияет на эволюцию профиля волны напряжений при ее распространении по образцу. Изменение сдвиговой прочности имеет сложный характер и зависит от уровня пластической деформации и фазового состояния.

Для определения параметров модели использовались экспериментальные данные, полученные в РФЯЦ – ВНИИТФ [2]. Основная часть информации получена в опытах с нагружением образцов различной толщины ударниками, разогнанными продуктами взрыва. В этих опытах профили напряжений регистрировались методом манганинового датчика. Для проверки моделей использовались результаты взрывных экспериментов, представленные в другом докладе [4] и данные из опытов с разгоном ударников в легкогазовой пушке с регистрацией профиля скорости границы кварцитового образца и окна посредством интерферометрической методики VISAR.

Разработанная модель позволила описать результаты серии экспериментов с ударно-волновым нагружением кварцита в диапазоне напряжений 10–55 ГПа, в котором наблюдается переход α -кварца в стшовит, характеризующийся большим временем превращения и значительным изменением сдвиговой прочности.

Литература

1. A. V. Petrovtsev, V. V. Dremov, V. G. Vildanov, M. M. Gorshkov, V. T. Zahikin, Yu. N. Zhugin, Equation of state and phase diagram of quartz, AIP Conference proceedings, Vol. 849, 2006, pp. 380–392.
2. Zhugin, Yu. N. The behaviour of α -Quartz under High Dynamic and Static Pressures: New Results and Views. In Shock Compression of Condensed Matter-1995, Woodbury, New-York: AIP Press, 1996. Part I, pp. 97–100.
3. Ю. Н. Жугин, К. К. Крупников и др. Известия АН СССР, Физика земли, 10, 1994, стр. 16–22.
4. А. Ю. Гармашев, Е. Б. Смирнов, Д. Т. Юсупов, К. С. Сидоров, М. А. Штириков, А. И. Клёнов, Е. А. Петухов Новые экспериментальные данные по ударно-волновым свойствам кварцита, полученные с помощью низкоомных манганиновых датчиков в диапазоне 20–50 ГПа, Доклад на XIV международной конференции «Забабакхинские научные чтения», г. Снежинск, 18–22 марта 2019 г.

EVALUATION OF DATA FROM SHOCK EXPERIMENTS TAKEN TO STUDY STRENGTH AND PHASE TRANSFORMATIONS IN QUARTZITE

M. G. Kovalenko, D. M. Shalkovsky, A. V. Petrovtsev, A. V. Pavlenko, S. N. Malyugina, D. T. Yusupov

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

The paper is devoted to a model of quartzite – one of the most abundant rocks. The variation of its thermodynamic properties in a wide range of loading pressures is described using a multiphase equation of state [1] which includes three basic phases: α -quartz, stishovite, and liquid quartz. The line of α -quartz and stishovite phase equilibrium was determined from results of tests with shocked quartzite unloading into buffer materials. With the resulted line we normalized the kinetic model of the direct non-equilibrium phase transition. The variation of shear strength is described by an elastic-plastic model which allows for strain hardening (and softening) and the effect of thermodynamic and phase states. Parameters for the models of phase transition kinetics and elastic-plastic properties were determined from results of calculations which modeled shock experiments with solid quartz and data on compressibility of fine-grained quartz in a high-plastic (fluoroplastic or paraffin) matrix [2, 3]. Our model allows for a high level of non-equilibrium of the direct phase transition which significantly changes the profile of the stress wave propagating in the sample. Shear strength varies in a complicated manner depending on the plastic deformation and phase state.

Parameters for our model were determined from experimental data obtained at RFNC – VNIITF [2]. They mostly come from tests where samples of different thicknesses were impacted by flyers accelerated by explosion products. Stress profiles were measured with manganin gauges. The models were verified against data from shock experiments reported in another paper [4] and data from light gas gun experiments where the VISAR interferometric technique was used to measure the velocity of the sample-window boundary.

The model we developed helped us reproduce data from experiments where in quartzite shocked under pressures 10–55 GPa we observed the transition of α -quartz to stishovite, characterized by a long transition time and a significant change of shear strength.

References

1. A. V. Petrovtsev, V. V. Dremov, V. G. Vildanov, M. M. Gorshkov, V. T. Zahikin, Yu. N. Zhugin, Equation of state and phase diagram of quartz. AIP Conference Proceedings, Vol. 849, 2006, pp. 380–392.
2. Zhugin, Yu. N. The behaviour of α -Quartz under High Dynamic and Static Pressures: New Results and Views. In Shock Compression of Condensed Matter-1995, Woodbury, New-York: AIP Press, 1996. Part I, pp. 97–100.
3. Yu. N. Zhugin, K. K. Krupnikov et al, Proceedings of the USSR Academy of Sciences, Physics of the Earth, 10, 1994, pp. 16–22.
4. A. Y. Garmashev, E. B. Smirnov, D. T. Yusupov, K. S. Sidоров, M. A. Shistirikov, A. I. Klyonov, and E. A. Petukhov, New experimental data on shocked quartzite properties under pressures 20–50 GPa collected with low-ohm manganin gauges. Presentation to XIV Zababakhin Scientific Talks, Snezhinsk, 18–22 March 2019.

4-23

АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ В СПЛАВЕ УРАН-МОЛИБДЕН ПРИ ПРОЛЕТЕ ОСКОЛКА ДЕЛЕНИЯ

Л. Н. Колотова, С. В. Стариков

Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

E-mail: lada.kolotova@gmail.com

Сплав уран-молибден является одним из кандидатов на роль ядерного топлива для реакторов нового поколения на быстрых нейтронах. При делении урана в ядерном топливе формируются быстрые тяжелые ионы, которые при пролете через вещество теряют свою энергию в двух независимых процессах: передача энергии в электронную подсистему и столкновительные каскады. Оба процесса могут приводить к образованию дефектов.

В работе проведена оценка полного числа первичных радиационных дефектов, которые образуются на стадии «термической вспышки» и в столкновительных каскадах для различных температур. Выявлены различные механизмы генерации дефектов при облучении сплава U-Mo быстрыми тяжелыми ионами: плавление с последующей кристаллизацией, переход между кристаллическими фазами $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$, генерация дефектов без плавления. Результаты расчетов пороговых энерговкладов ионов, приходящих к образованию дефектов на стадии «термической вспышки», находятся в хорошем согласии с имеющимися теоретическими и экспериментальными данными. Полученные в данной работе результаты могут являться входными данными в многомасштабные модели, описывающие эволюцию топлива в условиях эксплуатации.

ATOMISTIC SIMULATIONS OF DEFECTS FORMATION AT SWIFT HEAVY ION IRRADIATION IN U-Mo ALLOY

L. N. Kolotova, S. V. Starikov

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: lada.kolotova@gmail.com

Uranium is the main component of nuclear fuel. At irradiation of swift heavy ions, the defects formation frequently takes place in crystals. In this work, the atomistic simulation of defects formation and structure transitions U-Mo alloys at irradiation of swift heavy ions has been carried out. We use the two-temperature atomistic model with explicit account of electron pressure and electron thermal conductivity. This two-temperature model describes ionic subsystem by means of molecular dynamics while the electron subsystem is considered in the continuum approach.

The various mechanisms of structure changes at irradiation are examined. In particular, the simulation results indicate that the defects formation may be produced without melting and subsequent crystallization. The threshold values of the stopping power for track formation are estimated.

4-24

СПОСОБ ОБНАРУЖЕНИЯ РАЗВИВАЮЩИХСЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН

В. Г. Шевченко¹, Д. А. Еселевич¹, А. В. Конюкова¹,
А. В. Рябина¹, И. А. Чупова¹, И. В. Конюков²¹Институт химии твердого тела УрО РАН, Екатеринбург,
Россия²АО ЦВЕТМЕТАЛЛАДКА, Екатеринбург, Россия

E-mail: shevchenko@ihim.uran.ru

При воздействии лазерного излучения возможно образование зон термического влияния, которые будут изменять механические характеристики сплавов и вносить погрешности в результат испытаний. Для исключения указанных недостатков возможно применение метода акустической эмиссии. Предложен более чувствительный и достоверный способ обнаружения развивающихся усталостных трещин, где указанная цель достигается за счет того, что к берегам усталостной трещины прикладывается механическое нагружение (за счет пондеромоторных сил), приводящее к появлению акустической эмиссии в период раскрытия трещины. Работа выполнена по госбюджетной теме № АААА-А16-116122810219-4 и при частичной поддержке проекта УрО РАН № 18-3-3-5.

METHOD FOR DETECTING DEVELOPING FATIGUE SURFACE CRACKS

V. G. Shevchenko¹, D. A. Eselevich¹, A. V. Konyukova¹,
A. V. Ryabina¹, I. A. Chupova¹, I. V. Konyukov²¹Institute of Solid State Chemistry UB RAS, Ekaterinburg,
Russia²SC TSVETMETNALADKA, Ekaterinburg, Russia

E-mail: shevchenko@ihim.uran.ru

When exposed to laser radiation, the formation of heat-affected zones, which will change the mechanical characteristics of the alloys and introduce errors in the test result. To eliminate these drawbacks, it is possible to use the method of acoustic emission. A more sensitive and reliable method of detecting developing fatigue cracks is proposed, where this goal is achieved due to the fact that mechanical loading is applied to the banks of the fatigue crack (due to ponderomotive forces), leading to the appearance of acoustic emission during the crack opening period. The research was carried out within the state assignment of FASO of Russia (theme № АААА-А16-116122810219-4) and supported by Program of UD RAS, project № 18-3-3-5.

4-25

МНОГОКАНАЛЬНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ В УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

А. П. Кузнецов, К. Л. Губский, В. А. Пирог,
Т. В. Казиева, И. Ю. Тищенко, Р. Д. Глухов

Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», Москва, Россия

В докладе представлено описание многоканальных диагностических систем на основе неравноплечной интерферометрии (VISAR) и прямого оптического гетеродинамирования (PDV), разработанных для дистанционного исследования параметров ударно нагруженных веществ. Приводятся результаты их использования в экспериментах различного типа.

MULTICHANNEL LASER SYSTEMS FOR VELOCITY MEASUREMENTS IN SHOCK EXPERIMENTS

A. P. Kuznetsov, K. L. Gubskiy, V. A. Pirog,
T. V. Kazieva, I. Yu. Tishchenko, R. D. Glukhov

National Research Nuclear University «MEPhI»,
Moscow, Russia

The report provides a description of multi-channel diagnostic systems based on VISAR and PDV methods designed for remote studying of shock-loaded substances. The results of their use in experiments of various types are given.

4-26

ОСОБЕННОСТИ РЕЛАКСАЦИИ ПЕРЕГРЕТОГО РАСПЛАВА ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

М. Н. Ларичев, А. М. Величко,
Г. Е. Беляев, И. Г. Степанов

Институт энергетических проблем химической физики
им. В. Л. Тальрозе РАН, Москва, Россия
E-mail: mlarichev@chph.ras.ru

Оксид алюминия является соединением, обладающим уникальными свойствами, обеспечившими ему широкое использование во многих областях современной техники и технологии. Во многом проявляемые им свойства зависят от условий образования (синтеза) соединения. Кроме того оксид алюминия является продуктом, образующимся в ряде ответственных технологических процессов, например, горение алюминизированных топлив. По этим причинам информация о свойствах Al_2O_3 , особенно проявляемых при высоких температурах, является востребованной.

Перегретый расплав оксида алюминия создавался в лазерном кратере, образующемся на поверхнос-

ти оптического сапфира при облучении поверхности импульсным излучением CO_2 -лазера большой мощности. Опыты проводились в вакууме и в атмосфере инертного аргона на специально сконструированном лазерном стенде. Методами высокоскоростной фотографии, оптической пирометрии, электронной микроскопии и оптической пространственно-временной спектроскопии исследовались вылетающие из кратера частицы конденсированной фазы (КП) и газофазные продукты (ГП) лазерной абляции. Измерены температуры продуктов абляции, в том числе одиночных летящих частиц КП. Изучены виды частиц КП, траектории и параметры их движения, спектры частот колебаний интенсивности свечения во время полета и остывания. Наблюдаемые при остывании продуктов эффекты позволяют делать заключения об особенностях релаксации перегретого расплава оксида алюминия, и дают основание отнести Al_2O_3 к классу веществ, нагрев и испарение которых являются инконгруэнтными процессами.

Впервые обнаружено явление образования полых микросфер микронного, субмикронного, а также миллиметрового диаметров с толщиной оболочки 10–30 нм. Физико-химические свойства подобных оболочек могут представлять интерес благодаря специфическим условиям их формирования.

Обнаруженные эффекты представляют интерес с точки зрения фундаментальной и прикладной науки.

FEATURES OF RELAXATION OF SUPERHEATED MELT OF ALUMINA

M. N. Larichev, A. M. Velichko,
G. E. Belyaev, I. G. Stepanov

Talrose Institute for Energy Problems of Chemical Physics,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
E-mail: mlarichev@chph.ras.ru

Aluminum oxide (alumina) is a compound with unique properties that ensured its wide use in many areas of modern techniques and technologies. Its characteristics largely depend on the conditions of its formation. Furthermore, alumina is a product which is formed in a number of important technological processes, for example, the burning of aluminized fuels. For these reasons any information on the properties of Al_2O_3 , especially exhibited at high temperatures, is in demand.

The superheated melt of alumina was created in a laser crater formed on the surface of an optical sapphire while being irradiated by pulsed radiation from a high-power CO_2 laser. The experiments were carried out in vacuum and in an inert argon atmosphere on a specially designed laser setup. The methods of high-speed photography, optical pyrometry, electron microscopy, and optical space-time spectroscopy were used to study particles in a condensed phase (CP) and gas-phase products (GP) of laser ablation emitted from the crater. The temperatures of the products of ablation, including the single flying particles, were measured. The types of CP particles, the trajectories and parameters of their movement, the spectra of the

frequencies of oscillations of the radiation intensity during flight and cooling were studied. The effects observed during the cooling of products make it possible to draw conclusions about the features of relaxation of a superheated melt of alumina, and give justifications to categorize it as a class of substances whose heating and evaporation are incongruent processes.

For the first time, the phenomenon of the formation of hollow microspheres of micron, submicron, and millimeter diameters with a shell thickness of 10–30 nm has been detected. The physical-chemical properties of such shells may be of interest due to the specific conditions of their formation.

The discovered effects are of interest from the point of view of fundamental and applied science.

4-27

АТОМИСТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КОНТИНУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ДИСЛОКАЦИОННОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ

А. Е. Майер, В. С. Красников, В. В. Погорелко

Челябинский государственный университет,
Челябинск, Россия

E-mail: mayer@csu.ru

Усредненный учет движения и взаимодействия дислокаций является естественным способом описания пластичности на макроуровне в металлах. Среди других преимуществ этот подход позволяет описать инертность развития пластичности, которая имеет решающее значение в динамических задачах [1, 2]. Основными недостатками моделей дислокационной пластичности являются дополнительные уравнения, обычно записываемые для каждой системы скольжения, и ряд параметров. Как форму уравнений, так и значения параметров необходимо определять из других источников. Помимо теоретического рассмотрения и подгонки к экспериментальным данным, можно использовать атомистическое моделирование элементарных процессов в ансамбле дислокаций на наноуровне. Здесь мы представляем наши недавние результаты по использованию классической молекулярной динамики (МД) для поиска уравнений движения и кинетики дислокаций. МД моделирование движения отдельной дислокационной линии в чистых металлах [3] и металлах с включениями используется для проверки уравнения движения дислокации и поиска его параметров. МД моделирование позволяет исследовать концентрацию напряжений внутри включения при взаимодействии с дислокационной линией, образование петли Орована вокруг включения, и перерезание включения дислокацией. Высокоскоростная сдвиговая деформация предварительно сжатых или растянутых образцов МД используется для исследования гомогенной нуклеации дислокаций в идеальной решетке [4]. Однородная нуклеация важна при динамической деформации со сверхвысокими

скоростями деформации, поскольку она ограничивает уровень достигаемого напряжения сдвига. Исследование зарождения при совместном действии давления и напряжения сдвига является актуальным, поскольку оба напряжения могут действовать в ударных волнах в разных сочетаниях на разных стадиях ударного сжатия. Это же постановка задачи используется и для проверки всей системы кинетических уравнений дислокаций, поскольку после начала нуклеации происходят как размножение, так и аннигиляция дислокаций, и они определяют плотность дислокаций в МД системе. Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ, государственное задание 3.2510.2017/4.6, и РНФ, проект 18-7110038.

Литература

1. Krasnikov V. S., Mayer A. E., Yalovets A. P. Dislocation based high-rate plasticity model and its application to plate-impact and ultra short electron irradiation simulations // *International Journal of Plasticity*. – 2011. – V. 27. Iss. 8. – P. 1294–1308.
2. Mayer A. E., Khishchenko K. V., Levashov P.R., Mayer P. N. Modeling of plasticity and fracture of metals at shock loading // *Journal of Applied Physics*. – 2013. – V. 113 (19) – P. 193508.
3. Krasnikov V. S., Mayer A. E. Influence of local stresses on motion of edge dislocation in aluminum // *International Journal of Plasticity*. – 2018. – V. 101. – P. 170–187.
4. Mayer A., Krasnikov V., Pogorelko V. Limit of ultra-high strain rates in plastic response of metals / In: Gdoutos E. (Ed.) *Proceedings of the First International Conference on Theoretical, Applied and Experimental Mechanics. ICTAEM 2018. Structural Integrity, Vol 5*. Springer, Cham, 2019. – P. 273–278.

ATOMISTIC APPROACHES FOR CONSTRUCTION OF CONTINUUM DISLOCATION PLASTICITY MODEL

A. E. Mayer, V. S. Krasnikov, V. V. Pogorelko

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: mayer@csu.ru

Averaged accounting of motion and interaction of dislocations is a natural way to describe plasticity at macroscale in metals. Among other advantages, this approach allows one to describe the inertness of the plasticity development, which is crucial in dynamic problems [1,2]. The main disadvantages of the dislocation plasticity models are additional equations typically written for each slip system, and a number of parameters. Both, the form of equations and the values of parameters, have to be determined from elsewhere. Besides theoretical consideration and fitting with experimental data, the atomistic simulations of elementary processes in the dislocation ensemble at nanoscale can be used. Here we present our recent results on the use of classical molecular dynamics (MD) for searching the dislocation motion and kinetics equations. MD simulation of motion of a single dislocation line in pure metals [3] and metals with precipitates are used for verification of the dislocation motion equation and searching of its parameters. MD simulation allows one to investigate the

stress concentration inside the precipitate at interaction with the dislocation line, the dislocation looping around precipitate and the precipitate cutting by the dislocation. High-rate shear deformation of previously pressed MD samples is used for investigation of the homogeneous nucleation of dislocations in an ideal lattice [4]. The homogeneous nucleation is important at dynamical deformation with ultra-high strain rates as far as it restricts the level of achieved shear stress. Investigation of the nucleation under combined action of pressure and shear stress is relevant because both stresses can act in the shock waves in different combinations at various stages of the shock compression. The same problem statement is used also for verification of the whole set of the dislocation kinetic equations, because after the starting of nucleation, both the dislocation multiplication and annihilation take place and determine the dislocation density in the MD system. Work is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the state task 3.2510.2017/4.6, and by the Russian Science Foundation, project 18-7110038.

References

1. Krasnikov V. S., Mayer A. E., Yalovets A. P. Dislocation based high-rate plasticity model and its application to plate-impact and ultra short electron irradiation simulations // *International Journal of Plasticity*. – 2011. – V. 27. Iss. 8. – P. 1294–1308.
2. Mayer A. E., Khishchenko K. V., Levashov P. R., Mayer P. N. Modeling of plasticity and fracture of metals at shock loading // *Journal of Applied Physics*. – 2013. – V. 113 (19) – P. 193508.
3. Krasnikov V. S., Mayer A. E. Influence of local stresses on motion of edge dislocation in aluminum // *International Journal of Plasticity*. – 2018. – V. 101. – P. 170–187.
4. Mayer A., Krasnikov V., Pogorelko V. Limit of ultra-high strain rates in plastic response of metals / In: Gdoutos E. (Ed.) *Proceedings of the First International Conference on Theoretical, Applied and Experimental Mechanics. ICTAEM 2018. Structural Integrity, Vol 5*. Springer, Cham, 2019. – P. 273–278.

4-28

ЭВОЛЮЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОР ПО РАЗМЕРАМ В МЕТАЛЛАХ ПРИ ОТКОЛЬНОМ РАЗРУШЕНИИ

П. Н. Майер, А. Е. Майер

Челябинский государственный университет,
Челябинск, Россия

E-mail: polina.nik@mail.ru

Динамическое разрушение при растяжении (откольное разрушение) твердого и расплавленного металла во многом сходно. Отрицательное давление переводит вещество в метастабильное состояние, а образование пустот устраняет метастабильность. Материалы различаются механизмом последующего роста пустот, который представляет собой пластическую деформацию или хрупкое расщепление в случае твердых веществ и вязкое течение в случае жидкост-

тей. Динамика откольного разрушения и дальнейшей эволюции металла с порами определяется процессами зарождения и изменения размера в ансамбле пор. Исследование распределения пор по размерам в процессе растяжения металла важно для глубокого понимания процесса откольного разрушения и разработки адекватных моделей процесса. Здесь мы исследуем распределение пор по размерам, как в твердых, так и в расплавленных [1, 2] металлах, при высокоскоростном растяжении с помощью молекулярно-динамического моделирования для систем, содержащих несколько миллионов атомов. Распределение пор по размерам хорошо соответствует экспоненциальному распределению на стадии активного гомогенного зарождения пор во всех рассмотренных случаях. В случае расплавов последующая эволюция определяется двумя конкурирующими процессами. Первый – это коллапс всех мелких пор на фоне роста нескольких крупнейших пустот [1]; этот процесс приводит к депопуляции в области небольших пустот и переходу к нормальному распределению по размерам. Другой процесс – это прямое слияние пустот, которое сохраняет экспоненциальную форму распределения. В зависимости от вещества преобладает либо коллапс, либо слияние, и происходит либо нет переход к нормальному распределению по размерам [2]. В случае твердых металлов третий процесс вторичного зарождения пор может внести свой вклад и усложнить распределение по размерам. Исследование расплавленных металлов поддержано Российским научным фондом (проект 17-71-10205), исследование твердых металлов поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание 3.2510.2017/4.6).

Литература

1. Mayer P. N., Mayer A. E. Evolution of foamed aluminum melt at high rate tension: A mechanical model based on atomistic simulations // *Journal of Applied Physics*. – 2018. – V. 124(3). – P. 035901.
2. Mayer P. N., Mayer A. E. Size distribution of pores in metal melts at non-equilibrium cavitation and further stretching, and similarity with the spall fracture of solids // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – V. 127, Part C. – P. 643–657.

EVOLUTION OF THE SIZE DISTRIBUTION OF PORES IN METALS DURING TENSILE FRACTURE

P. N. Mayer, A. E. Mayer

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: polina.nik@mail.ru

Dynamic tensile (spall) fracture of solid and molten metal is similar in many aspects. Negative pressure translates substance into a metastable state, and formation of voids relaxes the metastability. Different substances differ in the mechanism of subsequent void growth that is the plastic deformation or brittle cleavage in the case of solids and the viscous flow in the case of liquids. The

dynamics of spall fracture and further evolution of metal with pores are determined by the processes of nucleation and size variation in the ensemble of pores. Investigation of the size distribution of pores in the course of the metal tension is important for in-deep understanding of the spall fracture process and formulation of adequate models of the process. Here we investigate the size distribution of pores in both solid and molten [1, 2] metals at high-rate tension by means of molecular dynamics simulations for systems containing several million atoms. The size distribution of pores fits well to exponential one at the stage of active homogeneous nucleation of pores in all considered cases. In the case of melts, the following evolution is determined by two competing processes. The first one is the collapse of all the smaller pores on the background of the growth of several largest voids [1]; this process leads to depopulation in the area of small voids and transition to normal size distribution. Another process is direct merging of voids, which retains the exponential form of distribution. Depending on substance, either collapse or merging is predominating, and the transition to the normal size distribution either takes place or not [2]. In the case of solid metals, the third process of secondary pore nucleation can contribute and make the size distribution more complex. Investigation of molten metals is supported by the Russian Science Foundation (project 17-71-10205), investigation of solid metals is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state task 3.2510.2017/4.6).

References

1. Mayer P. N., Mayer A. E. Evolution of foamed aluminum melt at high rate tension: A mechanical model based on atomistic simulations // *Journal of Applied Physics*. – 2018. – V. 124(3). – P. 035901.
2. Mayer P. N., Mayer A. E. Size distribution of pores in metal melts at non-equilibrium cavitation and further stretching, and similarity with the spall fracture of solids // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – V. 127, Part C. – P. 643–657.

4-29

ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛИ ЭК-181

С. Н. Малюгина, А. В. Павленко, А. С. Майорова,
С. С. Мокрушин, Д. Н. Казаков

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

В докладе представлены результаты исследования динамических свойств малоактивируемой жаропрочной 12-процентной хромистой стали ЭК-181 (RUSFER-EK181, 16X12B2TaP), разработанной во ВНИИИМ имени академика А. А. Бочвара. Исследования проводились в условиях воздействия на образцы плоскими ударными волнами в хорошо контроли-

руемых условиях нагружения. Температуру образцов варьировали от минус 147 до 674°C. Регистрация профилей скорости свободной поверхности осуществлялась лазерными доплеровскими измерителями скорости VISAR и PDV с наносекундным временным разрешением. По результатам экспериментов построены температурные зависимости прочностных свойств стали ЭК181.

TEMPERATURE-VELOCITY DEPENDENCES OF STEEL EK-181 STRENGTH PROPERTIES

S. N. Malyugina, A. V. Pavlenko, A. S. Mayorova,
S. S. Mokrushin, D. N. Kazakov

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

The report presents the research results of dynamic properties of low-activated heat resisting 12 percent chromium steel EK-181 (RUSFER-EK181, 16X12B2TaP), developed in Bochvar Institute, VNIINM. We performed the studies in conditions of the plane shock waves effect on the samples under well-controlled loading conditions. We varied sample temperatures from minus 147 up to 674°C. Laser doppler velocimeters VISAR and PDV with the nanosecond time resolution recorded free surface velocity profiles. Temperature dependences of steel EK181 strength properties were built according to the results of the experiments.

4-30

СОГЛАСОВАННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ДЛЯ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ В ОКРЕСТНОСТИ КРИВЫХ ПЛАВЛЕНИЯ И ИСПАРЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПЕРВОПРИНЦИПНЫХ РАСЧЕТОВ

Д. В. Минаков^{1,2*}, М. А. Парамонов^{1,2},
П. Р. Левашов^{1,2}

¹Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

²Московский физико-технический институт
(государственный университет), Москва, Россия

*E-mail: minakovd@ihed.ras.ru

Основными источниками эмпирической информации о теплофизических свойствах тугоплавких металлов в окрестности кривых плавления и испарения являются эксперименты по изоэнтропическому и изобарическому расширению. Однако, до недавнего времени не существовало моделей, которые могли бы непротиворечиво описать оба типа имеющихся данных для молибдена и вольфрама.

В данной работе мы представляем результаты квантовых молекулярно-динамических расчетов, которые позволили согласованно описать имеющиеся данные по изоэнтропическому расширению

в различные преграды ударно-сжатых пористых образцов рассматриваемых металлов, а также некоторые эксперименты по импульсному нагреву проводников.

Помимо этого, были выполнены оценки критических параметров молибдена и вольфрама.

CONSISTENT INTERPRETATION OF DYNAMIC EXPERIMENTS FOR REFRACTORY METALS NEAR THE MELTING AND THE VAPORIZATION CURVES BY AB INITIO CALCULATIONS

D. V. Minakov^{1,2*}, M. A. Paramonov^{1,2},
P. R. Levashov^{1,2}

¹Joint Institute for High Temperature of RAS, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology
(State University), Moscow, Russia

*E-mail: minakovd@ihed.ras.ru

The main sources of empirical information about thermophysical properties of refractory metals in vicinity of melting and evaporation curve are isentropic and isobaric expansion experiments. However, there are no models that could consistently describe both type of data until now.

In this work, we present results of quantum molecular dynamics calculations, which made it possible to describe consistently existing data on isentropic expansion into different anvil materials of shocked porous samples of Mo and W and results of fast resistive pulse heating experiments.

Our estimates of the critical parameters for Mo and W are also presented.

4-31

ГИБРИДНАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С. С. Мокрушин, А. А. Тяктев,
Н. Б. Аникин, А. В. Павленко

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

Для измерения скорости в ударно-волновых экспериментах авторами создана гибридная (PDV – VISAR) интерферометрическая система, из оптоволоконных компонентов с лазером инфракрасного диапазона ($\lambda = 1,55$ мкм). Система регистрирует сигнал из одной точки поверхности исследуемого образца.

Гибридная система позволяет использовать преимущества двух методов в проводимых измерениях, что повышает их надежность и достоверность. Также гибридная система может помочь решить ряд методических вопросов, связанных, например, с обоснованием временного разрешения и точности методов.

В работе приводятся некоторые результаты экспериментальной отработки гибридного интерферометра.

HYBRID INTERFEROMETRY SYSTEM FOR GAS DYNAMIC STUDIES

S. S. Mokrushin, A. A. Tyaktev,
N. B. Anikin, A. V. Pavlenko

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

Authors have developed a hybrid (PDV – VISAR) interferometry system from fiber optic components with infrared ($\lambda = 1.55$ μm) laser for the sake of velocity measurements in shock-wave experiments. The system records signals from one point on the surface of studied specimen.

Hybrid systems benefits from advantages of both techniques in performed measurements that enhances their reliability and credibility. Also hybrid system can help in resolution of several methodical issues such as justification of temporal resolution and accuracy of techniques.

The presentation covers some results of hybrid interferometer experimental development.

4-32

МАКЕТ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ VISAR-LINE С ОРИГИНАЛЬНОЙ СХемой ТРАНСЛЯЦИИ СИГНАЛОВ

М. С. Мытарев, А. В. Павленко,
С. Н. Малюгина, Н. Б. Аникин

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

E-mail: www.dep5@vniitf.ru

В данной работе представлен макет интерферометрической системы VISAR-line. Данная система используется для получения профилей скорости свободной поверхности в ударно-волновых экспериментах. Ключевыми особенностями VISAR-line являются: высокое временное разрешение; возможность получать пространственно-временной профиль скорости $v(x, t)$.

Временное разрешение систем VISAR в основном определяется регистрирующей аппаратурой. В качестве последней в VISAR-line используется стрик-камера ВЗГЛЯД-2А. Возможные временные развертки: 3 мкс – 2 нс.

Система VISAR-line основана на технических решениях, примененных в классических одноканальных VISAR, однако использование стрик-камеры с малым размером фотоатода (1 мм \times 6 мм) заставило разработать оригинальную и простую схему прямой трансляции сигналов на ЭОП-регистратор. Все четыре луча попадают в центральную часть объектива стрик-камеры, поэтому в нашем случае оказалось возможным использовать объектив небольшого диаметра, а влияние оптических aberrаций на изображе-

ние на фотокатоде камеры должно быть не существенным. Схема интерферометра получилась компактной: 80 см × 50 см × 35 см. Поле зрения интерферометра ≈ 3,5 мм, которое ограничено в основном размерами светоделительных кубиков и диаметром выходного объектива.

Представляемая система прошла апробацию в экспериментах на легкогазовой пушке при относительно небольших скоростях метания – около 320 м/с. В качестве исследуемых материалов выступали: сплав алюминия, стали. В качестве результатов эксперимента записывались снимки сигналов (регистрации), развернутых во времени. Для обработки изображений со стрик-камеры использовалась программа, уменьшающая влияние шума и неравномерную чувствительность фотокатода ЭОП-регистратора. В результате были получены профили скорости свободной поверхности для разных точек образца. В представленных в работе экспериментах использовалась наиболее длинная развертка в 3 мкс.

Дальнейшая работа связана с использованием в экспериментах более коротких разверток.

THE PROTOTYPE OF INTERFEROMETRIC COMPLEX VISAR-LINE WITH ORIGINAL SCHEME OF RELAY

M. S. Mytarev, A. V. Pavlenko,
S. N. Malyutina, N. B. Anikin

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

E-mail: www.dep5@vniitf.ru

Interferometric complex for measuring velocity VISAR-line is presented in this work. Such system is used for getting profiles of velocity of free surface in shock experiments. The key features of VISAR-line are: high time resolution; ability to receive spatiotemporal profile of speed $v(x, t)$.

Time resolution of VISAR systems is defined by recording system. In VISAR-line recording instrument is a streak-camera “ВЗГЛЯД-2А”. Possible time sweeps: 3 mks – 2 ns.

Getting the spational dependence of velocity of free surface expands the opportunities of using VISAR systems. The experiments with non planar shock waves become available for diagnostics. In particular, they are laser experiments, which characterized by heterogeneous impact of laser emission on sample under investigation. Non-planar shock waves also propagate in porous and heterogenous materials. Systems VISAR-line allow to resolve spationally this nonuniformities. Spational resolution theoretically can reach 40 mkm.

System VISAR-line is based on technical solutions, which are used in classical one-channel VISAR. Though, the using of streak-camera with small sizes of photocathode (1 mm × 6 mm) caused to design original and simple scheme of optical relay “four-to-one” on the streak-camera. All four beams pass through central part of the streak camera’s objective. Thus, it is possible to use an

objective with small aperture diameter. Also the influence of optical picture’s aberrations on the photocathode must be negligible. The scheme of interferometer is rather compact: 80 cm × 50 cm × 35 cm. The depth of the field of interferometer is 3.5 mm, which is manually limited by sizes of beamsplitters and output objective.

This system was examined in the experiments on light gas-gun LGP-1200 with relatively low velocities – near 320 m/s. The observable materials were aluminum alloys, steels. As the results of experiments, pictures from streak camera (records) were written. The program for processing data was used to minimize influence of the noise and irregular sensitivity of streak-camera’s photocathode. As a result, the profiles of speed of free surface were received for different points of the target. In the experiments the longest sweep of 3 mks was used.

The future work is connected with using shorter sweeps.

4-33

ВЛИЯНИЕ ИСХОДНОЙ ЧИСТОТЫ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО U НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ ЕГО ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

А. В. Ольховский, Е. А. Козлов, Д. П. Кучко,
А. Е. Широбоков, С. А. Бричиков

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

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

В дополнение к ранее опубликованным результатам по влиянию квазистатического экструирования нелегированного урана технической чистоты и его малолегированного молибденом сплава на прочностные свойства при квазистатическом и взрывном нагружении [1–4], в данной работе представлены постановки и результаты взрывных экспериментов по изучению прочностных характеристик образцов из высокочистого мелкозернистого урана, а также урана, микролегированного углеродом С или кремнием Si, при их динамическом нагружении. Постановки экспериментов позволили реализовать в образцах продольные напряжения в диапазоне от 10 до 120 ГПа. Для регистрации временных профилей скоростей $W(x, t)$ диагностируемых участков свободной поверхности исследуемых образцов использовалась многоканальная лазерно-гетеродинная диагностика (PDV). Такой подход позволяет получить статистически представительные результаты в относительно небольшом количестве сравнительных взрывных экспериментов. Как и в металле технической чистоты и его малолегированном сплаве с молибденом, квазистатическое экструирование, сопровождавшееся измельчением зерна и возрастанием прочностных характеристик при низкоскоростном деформировании, значимо не проявилось при интенсивном ударно-волновом нагружении.

Литература

1. Е. А. Козлов, Д. Г. Панкратов, В. И. Таржанов, И. В. Теличко, Релаксация упругого предвестника при взрывном нагружении предварительно квазистатически экструдированного мелкозернистого нелегированного урана, ДАН, 2008, том 421, № 3, С. 332–334, [Doklady Physics (Engl. transl.), 2008, Vol. 53, No. 7, pp. 368–370]
2. Е. А. Козлов, Д. Г. Панкратов, В. И. Таржанов, И. В. Теличко, Динамическая сдвиговая и откольная прочности предварительно квазистатически экструдированных мелкозернистого урана и сплава U – 0,3% Mo, ДАН, 2009, т. 424, № 6, стр. 769–773 [Doklady Physics (Engl. transl.), 2009, Vol. 54, No. 2, pp. 88–92]
3. Е. А. Козлов, Д. Г. Панкратов, В. И. Таржанов, И. В. Теличко, Динамическая сдвиговая и откольная прочности предварительно квазистатически экструдированных мелкозернистого урана и сплава U – 0,3% Mo, ФММ, 2009, т. 108, № 4, стр. 424–438 The Physics of Metals and Metallography 10/2009; 108(4):401–414
4. Е. А. Козлов, С. В. Бондарчук, Ю. Н. Зуев, С. М. Новгородцев, Механизмы высокоскоростной деформации и разрушения мелкозернистого нелегированного урана при взрывном нагружении, ФММ, 2011, т. 111, вып. 4, стр. 428–438 [The Physics of Metals and Metallography (Engl. transl.), 2011, V. 111, No. 4, pp. 410–420]

**THE EFFECT OF THE INITIAL PURITY
OF FINE-GRAIN URANIUM ON ITS STRENGTH
UNDER DYNAMIC LOADING**

A. V. Olhovskiy, E. A. Kozlov, D. P. Kuchko,
A. E. Shirobokov, S. A. Brichikov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia
E-mail: d.p.kuchko@vniitf.ru

In addition to the previously published results on the effect of quasistatic extrusion of unalloyed uranium of technical purity and uranium alloyed with small quantities of molybdenum on strength properties under quasistatic and explosive loading [1–4], the paper presents the setups and the results of explosive experiments on strength properties of samples of high-purity fine-grain uranium, as well as uranium micro-alloyed with carbon C or silicon Si, under dynamic loading. The setups made it possible to realize longitudinal stresses ranging from 10 to 120 GPa in the samples. The multi-channel heterodyne diagnostics (PDV) was used to record time-velocity profiles $W(x, t)$ of the tested fragments of the free surface of samples under study. This approach makes it possible to obtain statistically representative results based on a relatively small number of comparative explosive experiments. Similarly to the case with uranium metal of technical purity and its dilute alloy, the quasistatic extrusion that entailed grain refinement and the increase of strength characteristics under low-rate strain, had no significant manifestations under shock wave loading.

References

1. E. A. Kozlov, D. G. Pankratov, V. I. Tarzhanov, I. V. Telichko, Relaxation of Elastic Precursor under Shock Loading of Quasistatically Pre-Extruded Fine-Grain Unalloyed Uranium, Academy of Sciences Reports, 2008, Vol. 421, No. 3, pp. 332–334 (in Russian), [Doklady Physics (Engl. transl.), 2008, Vol. 53, No. 7, pp. 368–370].
2. E. A. Kozlov, D. G. Pankratov, V. I. Tarzhanov, I. V. Telichko, Dynamic Shear and Spall Strengths of Quasistatically Pre-Extruded Fine-Grain Uranium and U – 0.3% Mo Alloy, Academy of Sciences Reports, 2009, Vol. 424, No. 6, pp. 769–773 (in Russian) [Doklady Physics (Engl. transl.), 2009, Vol. 54, No. 2, pp. 88–92].
3. E. A. Kozlov, D. G. Pankratov, V. I. Tarzhanov, I. V. Telichko, Dynamic Shear and Spall Strengths of Quasistatically Pre-Extruded Fine-Grain Uranium and U – 0.3% Mo Alloy, Physics of Metals and Metallography 2009, Vol. 108, No. 4, pp. 424–438 (in Russian) [The Physics of Metals and Metallography (Engl. transl.) 10/2009; Vol. 108, No. pp. 401–414].
4. E. A. Kozlov, S. V. Bondarchuk, S. M. Novgorodtsev, Mechanisms of High-Rate Strain and Failure of Fine-Grain Unalloyed Uranium under Shock Loading, Physics of Metals and Metallography, 2011, Vol. 111, No. 4, pp. 428–438 (in Russian) [The Physics of Metals and Metallography (Engl. transl.), 2011, Vol. 111, No. 4, pp. 410–420].

4-34

**УДАРНО-ВОЛНОВЫЕ И РЕОЛОГИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА ТИТАНА
И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

А. В. Павленко, С. Н. Малюгина, А. С. Майорова,
С. С. Мокрушин, Д. Н. Казаков, С. Ю. Филатов

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

Методами физики ударных волн изучались реологические и динамические свойства титана и сплавов на его основе. Измерялось сопротивление высокоскоростному деформированию и разрушению чистого титана ВТ1-00 (α -сплав), технического титана марки ВТ1-0 (α -сплав), титановых сплавов ВТ8 ($(\alpha+\beta)$ -сплав), ВТ20 (псевдо α -сплав) и ОТ4 (псевдо α -сплав). Измерения динамических свойств проводились лазерно-интерферометрическими методиками VISAR и PDV с наносекундным временным разрешением. Получены данные о температурно-релаксационных зависимостях динамических пределов упругости чистого титана ВТ1-00, технического титана марки ВТ1-0, титановых сплавов ВТ8, ВТ20 и ОТ4 в диапазоне температур от минус 168 до 880°C. Амплитуду ударных волн варьировали от 3 до 28 ГПа. Получены зависимости откольной прочности сплавов от скорости деформирования. Для титана ВТ1-00 и ВТ1-0 определены границы $\alpha \rightarrow \omega$ превращения на ударной адиабате. Исследована исходная структура данных материалов, а также механизмы деформи-

рования и разрушения при ударно-волновом воздействии.

SHOCK-WAVE AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF TITAN AND TITANIUM ALLOYS

A. V. Pavlenko, S. N. Malyugina, A. S. Mayorova,
S. S. Mokrushin, D. N. Kazakov, S. Yu. Filatov

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

We investigated rheological and dynamic properties of titan and titanium-base alloys using physics of shock waves. We measured resistance to high-rate deformation and to rupture of pure titanium BT1-00 (α -alloy), commercial titanium BT1-0 (α -alloy), titanium alloys BT8 ($(\alpha + \beta)$ -alloy), BT20 (pseudo α -alloy) and OT4 (pseudo α -alloy). We measured dynamic properties using laser-interferometric techniques VISAR and PDV with the nano-second time resolution. We obtained the results on temperature-relaxation dependences of dynamic elastic limits of pure titanium BT1-00, commercial titanium BT1-0, titanium alloys BT8, BT20 and OT4 within the temperature range from minus 168 to 880°C. Shock-wave amplitude varied from 3 up to 28 GPa. The spall strength dependences of alloys on strain rate were obtained. Transition boundaries $\alpha \rightarrow \omega$ on Hugoniot adiabat were determined for titanium BT1-00 and BT1-0. The initial structure of the given materials, and also deformation and rupture mechanisms were studied under shock-wave action.

4-35

СТРУКТУРА И ПРОЧНОСТЬ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО AL-ZN-MG-FE-NI СПЛАВА С РАЗНЫМ РАЗМЕРОМ ЗЕРНА

A. N. Петрова¹, И. Г. Бродова¹, Н. А. Белов²,
Т. К. Акопян², С. В. Разоренов³,
Е. В. Шорохов⁴, З. С. Завьялов⁴

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

²Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС», Москва, Россия

³Институт проблем химической физики РАН,
Черноголовка, Россия

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

E-mail: petrovanastya@yahoo.com

Исследовано влияние структурных параметров экономно легированного сплава никалина в крупнокристаллическом состоянии и субмикроструктурном (СМК) и нанокристаллическом (НК) состояниях после кручения под высоким давлением в наковальнях Бриджмена на прочность материала в широком диапазоне скорости деформации. Определена зависимость степени измельчения структурных

составляющих, включая эвтектическую фазу Al_9FeNi , с ростом величины накопленной деформации кручением. Выявлены закономерности протекания циклических фазовых превращений. Динамические механические свойства и откольные явления исследованы при сжатии в разрезном стержне Гопкинсона и при ударном сжатии. Определено, что кручение под высоким давлением сплава никалин на 10 и 15 оборотов наковальни приводит к формированию СМК структуры со средним размером зерна 100–160 нм. При 10 оборотах наковальни основным механизмом формирования СМК структуры является фрагментация, а при 15 оборотах – динамическая рекристаллизация. Преобладание динамической рекристаллизации при $n=15$ приводит к снижению твердости сплава и статических прочностных свойств. Сплав с СМК структурой ($n=10$, $D_{cp}=160$ нм) характеризуется повышенными на 150% и 50% значениями предела текучести и предела прочности, соответственно. Динамический предел текучести СМК сплава не зависит от размера зерна и превышает динамический предел текучести литого сплава на 75%. Формирование СМК структуры не улучшает динамическую прочность сплава.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Структура», номер госрегистрации АААА-А18-118020190116-6), в рамках Программы и при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект №18-03-00102).

STRUCTURE AND STRENGTH OF THE EUTECTIC AL-ZN-MG-FE-NI ALLOY WITH DIFFERENT GRAIN SIZE

A. N. Petrova¹, I. G. Brodova¹, N. A. Belov²,
T. K. Akopyan², S. V. Razorenov³,
E. V. Shorokhov⁴, Z. S. Zavialov⁴

¹M. N. Miheev Institute of Metal Physics of Ural Branch
of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

²National University of Science and Technology MISIS,
Moscow, Russia

³Institute of Problems of Chemical Physics of Russian
Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia

⁴Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia
E-mail: petrovanastya@yahoo.com

The influence of structural parameters of the coarse grained and submicrocrystalline (SMC) Nikalin alloy after high pressure torsion on materials strength was investigated in a wide range of the strain rate. The structure refinement degree (including eutectic Al_9FeNi phase) was determined depending on accumulated HPT strain. Cyclic phase transformations were revealed. Dynamic mechanical properties and spall phenomena were investigated using Hopkinson split bar and shock-wave loading technique. HPT by 10 and 15 revolutions leads to the SMC structure formation in the Nikalin alloy ($D_{av}=100-160$ nm). At 10 revolutions the main structural mechanism is fragmentation, but at 15 revolutions – dynamic recrystallization. Dynamic recrystallization results in decrease in hardness and static strength

properties. The SMC alloy ($n=10$, $D_{av}=160$ nm) has enhanced by 150% и 50% static yield strength and tensile strength correspondingly. Dynamic yield strength of SMC alloy does not depend on grain size and exceeds the dynamic yield strength of coarse grained alloy by 75%. The formation of SMC structure does not improve spall strength of the alloy.

The research was carried out within the state assignment of Minobrnauki of Russia (theme «Structura» No. AAAA-A18-118020190116-6), supported in part by RFBR (project No. 18-03-00102).

4-36

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ
НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ
С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,
МЕТОДОМ СОСТАВНЫХ СТЕРЖНЕЙ
ГОПКИНСОНА В ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ
ДЕФОРМАЦИИ 10^2 – 10^3 с⁻¹**

А. Ю. Гармашев, С. М. Долгих, Е. А. Петухов,
Е. Б. Смирнов, М. А. Шестириков,
Д. Т. Юсупов, З. И. Завьялов, А. А. Борцов

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

Исследование физических и механических свойств материалов, подвергаемых воздействию интенсивных динамических нагрузок и высокоскоростной деформации, представляет собой большой научный и практический интерес в связи с развитием ряда областей новой техники, а также в связи с разработкой и внедрением в промышленность новых перспективных технологических приемов обработки материалов.

В настоящей работе приведены результаты исследований динамических свойств конструкционного материала – нержавеющей стали, полученной по аддитивной технологии методом 3D-печати. Исследования проведены с помощью установки метода составных стержней Гопкинсона. Этот метод позволяет проводить испытания широкого круга материалов, исследовать динамические диаграммы сжатия и растяжения в диапазоне скоростей деформации $\dot{\epsilon} = 10^2$ – 10^3 с⁻¹.

Образцы из нержавеющей стали (аналог 12X18N10T) были изготовлены методом лазерного спекания металлического порошка (Selective Laser Sintering) на промышленном 3D-принтере Realizer SLM-100-200.

В ходе исследований проведено 12 экспериментов с образцами из нержавеющей стали. Диапазон скоростей ударника от 7 до 14 м/с, при этом собственные скорости деформации образцов – от $0,75 \times 10^3$ до $2,8 \times 10^3$ 1/с. В работе приведены диаграммы напряжение-деформация и скорость деформации-деформация.

**INVESTIGATION INTO DEFORMATION
OF STAINLESS STEEL FABRICATED
WITH HELP OF ADDITIVE TECHNIQUES,
BY METHOD OF HOPKINSON COMPOSITE
RODS IN THE RANGE
OF STRAIN RATES 10^2 – 10^3 s⁻¹**

A. Yu. Garmashev, S. M. Dolgikh, E. A. Petukhov,
E. B. Smirnov, M. A. Shistirikov, D. T. Yusupov,
Z. I. Zavyalov, A. A. Bortsov

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

Investigation of physical and mechanical properties of materials subjected to intensive dynamic loadings and high-speed deformation is of great scientific and practical interest in relation to the development of several domains of new equipment, and the development and implementation of new promising technological methods for material processing.

This work gives the results of investigation into dynamic properties of structural material – stainless steel fabricated according to additive technique, by 3D-print method. Investigations were performed with the help of method of Hopkinson composite rods. This method permits to conduct tests for wide variety of materials, to study dynamic diagrams of compression and expansion in the range of strain rates $\dot{\epsilon} = 10^2$ – 10^3 s⁻¹.

Samples of stainless steel (12Kh18N10T analog) were fabricated by method of metallic powder laser sintering (Selective Laser Sintering) on industrial 3D-printer Realizer SLM-100-200.

In the course of studies, 12 experiments were performed with the samples out of stainless steel. The range of impactor velocities was from 7 up to 14 m/s, while proper strain rates were from 0.75×10^3 up to 2.8×10^3 1/s. The work gives the diagrams stress-strain and velocity strain-strain.

4-37

**СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ
В ГПУ-МЕТАЛЛАХ
ПРИ МЕГАПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ
ПОД ДАВЛЕНИЕМ В ДИАПАЗОНЕ
ТЕМПЕРАТУР 80–450 К**

В. П. Пилюгин^{1,2}, Л. Ю. Егорова¹, А. М. Пацелов¹,
Т. Р. Суаридзе¹, Т. П. Толмачёв^{1,2},
П. Е. Панфилов², Ю. В. Хлебникова¹

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

²ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России
Б. Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия

E-mail: pilyugin@imp.uran.ru

Целью работы являлось изучение структурных и фазовых превращений в титане и цирконии в результате барического и деформационно-барического

воздействия при различных значениях температуры. Исходные псевдомонокристаллические (ПМК) образцы чистых титана и циркония подвергали деформации в камере Бриджмена на различные степени от малых до мегапластических (МПД) в условиях высокого квазигидростатического давления 8 ГПа при различных температурах, от кипения жидкого азота до нагревов до 450 К. Образцы подвергались комплексному исследованию микроструктуры и измерению микротвердости. Изучена эволюция микроструктуры и определен фазовый состав (α - и ω -фазы) Ti и Zr при криогенной, комнатной и теплой деформациях, от исходного ПМК до нанокристаллического (НК) состояния. Обнаружены эффекты влияния температуры на пути формирования и степень совершенства (размер и форму кристаллитов) деформационного происхождения НК структур. Для Ti и Zr определены значения температур, ниже которых процессы динамической и постдинамической рекристаллизации не происходят и это является условием формирования однородных и совершенных НК структур. Однако выше этих температур в микроструктуре металлов наблюдаются участки, испытавшие динамическую рекристаллизацию (ДР) и постдинамическую рекристаллизацию. Наличие рекристаллизованных областей в Ti свидетельствует о цикличности хода процессов «деформационная фрагментация-динамическая рекристаллизация» и локального восстановления структуры выше некоторой критической температуры. Данное явление обнаружено в Ti при деформации при комнатной температуре и в Zr при теплой деформации 100–120°C. В иных *d*-металлах, например в железе, никеле МПД при комнатной температуре не приводит к ДР, несмотря на то, что у них температура плавления выше, чем у Ti. Приемлемым теплофизическим критерием для ДР при МПД является тепловая активность, значения которой у Ti существенно ниже, чем у других *d*-переходных металлов. В работе рассматриваются механизмы деформационной фрагментации, связанные с подвижностью дислокаций в Ti и Zr.

Работа выполняется при частичной поддержке РФФИ (грант № 18-19-00217).

**STRUCTURAL AND PHASE
TRANSFORMATIONS OF HCP-METALS
UNDER SEVERE PLASTIC DEFORMATION
AT 80–450 K TEMPERATURES**

V. P. Pilyugin^{1,2}, L. Yu. Egorova¹, A. M. Patselov¹,
T. R. Suaridze¹, T. P. Tolmachev^{1,2},
P. E. Panfilov² and Yu. V. Khlebnikova¹

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

²Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin», Yekaterinburg, Russia

E-mail: pilyugin@imp.uran.ru

Structural and phase transformations in titanium and zirconium as a result of pressure and deformation-

pressure effects at various temperatures of severe plastic deformation (SPD) were studied. Quasi-single-crystalline (QSC) pure titanium and zirconium were subjected to high pressure torsion from small to high strains under high quasi-hydrostatic pressure of 8 GPa at temperatures from boiling liquid nitrogen up to 450 K. Microstructure evolution of the SPD-samples is studied and the phase composition (α - and ω -phases) of Ti and Zr after cryogenic, room and warm deformations, from the initial QSC to the nanocrystalline (NC) state is determined. Microhardness measurements were also made. The effects of temperature on the formation, size and shape of crystallites of deformation-induced NC structures were found. It was determined that dynamic and post-dynamic recrystallization for Ti and Zr do not occur below temperatures determined experimentally and this is the condition for the formation of homogeneous and perfect NC structures. However, above these temperatures, areas that have experienced dynamic (DR) and post-dynamic recrystallization are observed in the microstructure of metals. The presence of recrystallized regions in Ti indicates the cyclical nature of “deformation fragmentation – dynamic recrystallization” processes and local structure restoration above the certain critical temperature. This phenomenon is found in Ti at deformation at room temperature and in Zr at warm deformation 100–120°C. In other *d*-metals, for example, in iron or nickel, SPD at room temperature does not lead to DR, despite the higher melting point. Acceptable thermophysical criterion for DR under SPD is thermal activity, which values for Ti are significantly lower than for other *d*-transition metals. Also the work discusses the mechanisms of deformation fragmentation associated with the mobility of dislocations in Ti and Zr.

The work is carried out with the partial support of the RSF grant (project No. 18-19-00217).

4-38

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОМАСШТАБНОГО
ПОДХОДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ**

П. А. Покаташкин*, Д. К. Ильницкий, А. В. Янилкин
ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт
автоматики им. Н. Л. Духова, Москва, Россия

*E-mail: p.a.pokatahshkin@gmail.com

Вклад различных механизмов (фононное трение, дислокационное упрочнение, термоактивационные процессы) в прочностные свойства материалов существенно зависит от скорости деформации. До недавнего времени, методами молекулярной динамики (МД) было возможно исследовать только крайне высокоскоростную деформацию. В рамках работы производятся крупномасштабные МД расчеты, позволяющие получить параметры движения и взаимодействия дислокаций. Позволяя таким образом сделать «сшивку» МД и ДД на широком диапазоне скоростей деформации.

USING OF MULTISCALE APPROACH FOR STUDYING CRYSTAL PLASTICITY

P. A. Pokatashkin*, D. K. Ilnitsky, A. V. Yanilkin

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

*E-mail: p.a.pokatashkin@gmail.com

Contribution of various mechanisms (phonon drag, forest-hardening, thermal activated processes) to material properties e.g. strength significantly changes with strain rate. Until recently, molecular dynamics (MD) considered simulations of only extremely high strain-rates. In present work large-scale MD simulations are performed to obtain parameters of dislocation motion and interaction between dislocations. Therefore those results allow coupling MD and DD on a broad range of strain rates.

вляется как скольжением, так и двойникованием, причем последнее превалирует. Это является следствием того, что гафний в данном случае находится в твердом растворе, что вызывает понижение энергии дефектов упаковки.

Показано, что результатом легирования является более интенсивное упрочнение за счет включения механизма двойникования и уменьшения вероятности протекания процессов возврата и рекристаллизации при высокоскоростной деформации. По сравнению с чистой медью гафниевая бронза, подвергнутая закалке, упрочняется быстрее, и для нее может быть достигнута более высокая твердость. Однако в бронзе существует опасность образования трещин и, действительно, в закаленном образце, продеформированном на 3 прохода ДКУП, наблюдались трещины.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Спин» при поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН (проект № 18-10-2-37).

4-39

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ ГАФНИЕВОЙ БРОНЗЫ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

V. V. Popov¹, E. N. Popova¹, A. V. Stolbovsky¹,
R. M. Falahutdinov¹, K. V. Gaan², E. V. Shorohov²

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: vpopov@imp.uran.ru

Исследованы структура и свойства образцов гафниевой бронзы (Cu-0,78%Нf), полученных методом высокоскоростной динамической деформации – динамическим канально-угловым прессованием (ДКУП), и проведено сравнение с медью после аналогичной обработки. Исследования выполнены методами оптической, растровой и просвечивающей электронной микроскопии и дюротрии (измерения микротвердости).

Перед ДКУП образцы гафниевой бронзы подвергались отжигу при температуре 800°C, 1 ч или закалке от температуры 930°C.

Исследование структуры бронзы после отжига 800°C, 1 ч показало, что в ней присутствуют крупные включения правильной геометрической формы, предположительно фазы Cu₅Hf, в которые связана большая часть Hf. Исследование структуры и микротвердости бронзы после отжига и высокоскоростной деформации по методу ДКУП показало, что они мало отличаются от полученных в меди, подвергнутой такой же обработке. В данном случае почти не развивается двойникование, что, по-видимому, связано с тем, что большая часть Hf находится в связанном состоянии.

Существенно иная картина наблюдается в образцах бронзы, подвергнутых ДКУП после закалки. Обнаружено, что в этом случае деформация осуществ-

EVOLUTION OF STRUCTURE OF HAFNIUM BRONZE UNDER HIGH-SPEED DYNAMIC DEFORMATION

V. V. Popov¹, E. N. Popova¹, A. V. Stolbovsky¹,
R. M. Falahutdinov¹, K. V. Gaan², E. V. Shorohov²

¹M. N. Miheev Institute of Metal Physics Ural Branch of RAS,
Ekaterinburg, Russia

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

E-mail: vpopov@imp.uran.ru

The structure and properties of hafnium bronze (Cu-0.78%Нf) processed by high-speed dynamic deformation – dynamic channel-angular pressing (DCAP) – have been studied by optical, scanning and transmission electron microscopy and microhardness measurements, and compared with those of copper after the similar treatment. Before the DCAP specimens of hafnium bronze were annealed at 800°C, 1 h or quenched from 930°C.

Structural studies of the bronze annealed at 800°C, 1 h have shown that there are coarse inclusions of regular geometrical shape in the structure, presumably of Cu₅Hf phase, in which most of Hf is fixed. The structure and microhardness of the bronze after annealing and high-speed deformation by DCAP only slightly differ from those of DCAP-ed copper. In particular, practically no twinning is observed, which may be because of Hf bonding in the precipitates.

Substantially another situation is observed in the bronze specimens processed by DCAP after quenching. In this case deformation proceeds both by dislocation sliding and twinning, the latter mechanism being prevailing. This may be due to hafnium presence in the solid solution, which results in decreasing of the stacking fault energy.

It is demonstrated that doping with Hf results in more intensive strengthening due to the twinning mechanism and decreasing of probability of recovery and recrystallization under the high-speed deformation. Compared to

pure copper, the hafnium bronze subjected to quenching strengthens faster under the following deformation, and higher hardness can be achieved in it. However, there is a danger of cracking in bronzes, and, indeed, cracks are observed in the quenched bronze subjected to three passes of DCAP.

The work has been done within the state assignment on the topic “Spin” and supported by the program of fundamental research of Ural Branch of RAS (project No. 18-10-2-37).

4-40

**О ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ В НЕКОТОРЫХ
ГАЛОГЕНПРОИЗВОДНЫХ МЕТАНА
ПРИ ИХ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

Д. Г. Панкратов, А. К. Якунин, А. Г. Попцов

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

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

В дополнение к [1] представлены результаты измерений скоростей звука в ударно-сжатых хлороформе CHCl_3 и бромформе CHBr_3 , выполненные при помощи фотоэлектрической (индикаторной) методики [2] при давлениях до 60 ГПа.

Выявлены особенности, связанные с возможным протеканием в указанных веществах фазовых превращений во фронте ударной волны.

Литература

1. М. Ф. Гоголя, А. Ю. Долгобородов. Индикаторный метод исследования ударных и детонационных волн. Химическая физика, 1994, т. 13, № 12, стр. 118–127.
2. R. G. McQueen, J. W. Hopson, L. N. Fritz. Optical technique for determining rarefaction wave velocities at very high pressures. Rev. Sci. Instrum., 1982, V. 53, # 2, pp. 245–250.

**ABOUT PHASE TRANSITIONS
IN SOME HALOGENATED METHANE
AT THE DYNAMIC LOADING**

D. G. Pankratov, A. K. Yakunin, A. G. Poptsov

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

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

In addition to ref. [1] we present the results of sound velocity measurements in shock-compressed chloroform CHCl_3 and bromoform CHBr_3 , performed by means of photoelectric (indicator) technique [2] at pressures up to 60 GPa.

We have determined the features concerning possible leakage in specified substances of phase transformation in a shock-wave front.

References

1. M. F. Gogulya, A. Yu. Dolgorodov. The Indicator method for shock and detonation waves research. Chemical Physics, 1994, V.13, #12, pp. 118–127.
2. R. G. McQueen, J. W. Hopson, L. N. Fritz. Optical technique for determining rarefaction wave velocities at very high pressures. Rev. Sci. Instrum., 1982, V. 53, # 2, pp. 245–250.

4-41

**КОМПЛЕКСЫ PDV,
ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ
ОТДЕЛЕНИИ РФЯЦ – ВНИИТФ**

Д. П. Кучко, М. А. Ральников, А. Е. Широбоков

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

Применение в газодинамических экспериментах многоканальных комплексов, основанных на методике PDV (Photonic Doppler Velocimetry), позволяет получать новые статистически представительные данные о динамических свойствах исследуемых материалов при их взрывном нагружении.

В работе представлены принципиальные схемы построения классического четырёхканального PDV-комплекса, а также многоканальных PDV-комплексов с частотным и временным уплотнением информации, используемых в газодинамическом отделении РФЯЦ – ВНИИТФ. Описаны выявленные в ходе эксплуатации комплексов преимущества и недостатки оптических схем. Показан метод выявления «паразитных» сигналов в спектре и борьбы с ними посредством программного обеспечения.

**PDV COMPLEXES USED AT RFNC – VNIITF
GAS-DYNAMICS DEPARTMENT**

M. A. Ralnikov, D. P. Kuchko, A. E. Shirobokov

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

Multichannel complexes based on the PDV (Photonic Doppler Velocimetry) technique in gas-dynamics experiments make it possible to obtain new statistically representative data on dynamics of fast processes.

The paper presents conceptual flow charts of a classic 4-channel PDV complex, as well as those of multichannel PDV complexes used at RFNC – VNIITF Gas-Dynamics Department with frequency division and time division multiplexing. The paper also sets forth the algorithms for experimental data processing. The advantages and disadvantages of optical schemes revealed during operation of the complexes are described. The method of parasitic signal extraction from the spectrum with time-frequency division multiplexing and ways to control these parasitic signals by software are demonstrated.

4-42

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМЕСИ C-N-O-H В ОБЛАСТИ НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ

А. А. Рыкунов, М. А. Воробьева

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

E-mail: arykounov@gmail.com

Недра планет-гигантов, входящих в состав Солнечной системы, таких как Уран и Нептун, представляют собой смесь воды, аммиака и метана, разогретых до состояния теплого плотного вещества. Все эти соединения имеют достаточно сложные фазовые диаграммы, которые включают в себя такие экзотические структуры, как, например, супер-ионная вода. Физически верное описание всей совокупности взаимодействий в таких смесях возможно лишь из первых принципов. Однако неэмпирические методы, такие как квантовая молекулярная динамика (QMD), сильно ограничены и в части размеров рассматриваемых систем, и времен, на которых прослеживается их эволюция. Мы попытались решить эти проблемы путем модификации классического реакционного потенциала ReaxFF [1], основываясь на парных корреляционных функциях, вычисленных методом QMD. В работе исследуется зависимость получаемых термодинамических свойств смеси, состоящей из углерода, азота, кислорода и азота от параметров потенциала ReaxFF для систем, содержащих несколько десятков тысяч атомов, и проводится сопоставление с соответствующими результатами первопринципных расчетов, полученных на системах существенно меньшего размера.

Литература

1. Strachan A., van Duin A.C.T., Chakraborty D. et al. // Phys. Rev. Lett., 2003, 91, 098301 ().

THERMODYNAMIC PROPERTIES OF C-N-O-H MIXTURE IN THE REGION OF NON-IDEAL PLASMA

А. А. Rykounov, M. A. Vorobyova

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

E-mail: arykounov@gmail.com

The atmosphere of giant planets in the Solar System, such as Uranus and Neptune, consists of mixed water, ammonia, and methane heated to the state of warm dense matter. All these compounds have rather complicated phase diagrams which include some exotic structures, e.g., super-ionic water. A physically consistent description of all interactions in such mixtures can only be attained from first principles. The non-empirical methods, such as quantum molecular dynamics (QMD), are however strongly limited both in the dimensions of systems which

can be modeled, and in the times during which their evolution can be tracked. We try to tackle these problems by modifying the classical reaction potential ReaxFF [1] on the basis of the pair correlations functions obtained in QMD calculations. Here we investigate how the calculated thermodynamic properties of mixed carbon, nitrogen, oxygen and hydrogen depend on ReaxFF parameters for systems of several tens of thousand atoms, and do comparisons with similar results obtained from first principles for much smaller systems.

References

1. Strachan A., van Duin A. C. T., Chakraborty D. et al. // Phys. Rev. Lett., 2003, 91, 098301.

4-43

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЕВОЙ БРОНЗЫ НА ЕЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Г. Г. Савенков^{1,2}, А. В. Кузнецов¹,
А. М. Брагов³, А. К. Ломунов³

¹АО «Машиностроительный завод «Армалит»,
Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный технологический
институт (технический университет),
Санкт-Петербург, Россия

³НИИ Механики Нижегородского государственного
университета им. Н. И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия

E-mail: sav-georgij@yandex.ru

Лазерное поверхностное легирование металлов и сплавов в настоящее время является эффективным способом упрочнения их поверхности, что позволяет в первую очередь повысить износостойкость деталей, изготовленных из легированных материалов. При лазерном легировании повышение твердости и других эксплуатационных характеристик поверхностного слоя материала достигается не только за счет структурных и фазовых превращений в зоне лазерного воздействия, но и за счет создания нового сплава, отличающегося от матричного материала химическим составом [1].

Как правило, после лазерного легирования контролируют только микротвердость поверхностного слоя (реже определяют с помощью рентгеноструктурного анализа фазовый состав). Практически не определяют другие механические стандартные характеристики и, тем более, не определяют динамические механические характеристики. На примере алюминиевой бронзы марки БрАЖНМц этот пробел в исследованиях динамической прочности материалов в какой-то степени заполнен в настоящей работе.

Для динамических испытаний бронзы применялась экспериментальная установка, реализующая методику разрезного стержня Гопкинсона [2]. Установка включает в себя пневматическое нагружающее устройство (газовая пушка калибром 20 мм)

с системой управления, комплекс измерительно-регистрающей аппаратуры и сменные комплекты разрезных стержней Гопкинсона диаметром 20 мм.

Лазерному поверхностному легированию подвергалась поверхность всего образца. Режим лазерной обработки: мощность лазерного излучения – 2,5 кВт; скорость обработки – 13 мм/с; присадочный материал – алюминий; состав флюса: фтористый натрий – 20%, хлористый натрий – 20%, фтористый барий – 20%, хлористый калий – 40%; легирование производилось в среде аргона. Как показали микроструктурные исследования лазерная обработка образцов (диаметр рабочей части – 5 мм) вызвала перекристаллизацию металла, а быстрое охлаждение – структуру мартенситного типа. Глубина обработки – неоднородна и колеблется от 0,3 до 0,5 мм. При этом микротвердость упрочненного легированного слоя выросла по сравнению с исходным состоянием более, чем в два раза.

Результаты динамических испытаний в диапазоне скоростей деформации 750–1500 с⁻¹ показали, что по сравнению с исходным состоянием характеристики динамической прочности (временное сопротивление и предел текучести) выросли на 10–50%, в то время как деформационные характеристики (относительные удлинение и сужение) практически остались без изменения. В целом можно констатировать, что эффект лазерного упрочнения невелик.

Литература

1. Гуляев А. П. *Металловедение*. М. : *Металлургия*, 1986. – 544 с.
2. Брагов А. М., Ломунов А. К. *Использование метода Кольского для исследования процессов высокоскоростного деформирования материалов различной физической природы*. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2017. – 148 с.

THE INFLUENCE OF LASER SURFACE ALLOYING OF ALUMINUM BRONZE ON ITS DYNAMIC PROPERTIES

G. G. Savenkov^{1,2}, A. V. Kuznetsov¹,
A. M. Bragov³, A. K. Lomunov³

¹JSC “Machine-building plant “Armalit”,
Saint-Petersburg, Russia

²Saint-Petersburg State Technological Institute (Technical
University), Saint-Petersburg, Russia

³Research Institute of Mechanics State University of Nizhny
Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia
E-mail: sav-georgij@yandex.ru

Laser surface alloying of metals and alloys is currently an effective way to strengthen their surface, which allows primarily to increase the wear resistance of parts made of alloyed materials. In laser doping, the increase in hardness and other performance characteristics of the surface layer of the material is achieved not only due to structural and phase transformations in the zone of laser exposure, but also due to the creation of a new alloy, different from the matrix material by chemical composition [1].

As a rule, after laser doping, only the microhardness of the surface layer is controlled (less often the phase

composition is determined by x-ray diffraction analysis). Practically do not determine other mechanical standard characteristics and, moreover, do not determine the dynamic mechanical characteristics. On the example of aluminum bronze brand BrAZHNMTs this gap in the study of the dynamic strength of materials to some extent filled in this paper.

For dynamic tests of bronze, an experimental setup was used that implements the Hopkinson split rod technique [2]. The installation includes a pneumatic loading device (gas gun with a caliber of 20 mm) with a control system, a set of measuring and recording equipment and replacement sets of split Hopkinson rods with a diameter of 20 mm.

Laser surface doping was applied to the surface of the entire sample. Laser treatment mode: laser radiation power – 2.5 kW; processing speed – 13 mm/s; filler material – aluminum; flux composition: sodium fluoride – 20%, sodium chloride – 20%, barium fluoride – 20%, potassium chloride – 40%; doping was carried out in argon medium. As shown by microstructural studies, laser processing of samples (diameter of the working part – 5 mm) caused recrystallization of the metal, and rapid cooling – martensitic type structure. The depth of treatment is heterogeneous and ranges from 0.3 to 0.5 mm. the microhardness of hardened alloyed layer increased in comparison with the initial state more than twice.

The results of dynamic tests in the range of strain rates of 750–1500 s⁻¹ showed that in comparison with the initial state of the dynamic strength characteristics (tensile strength and yield strength) increased 10–50%, while the deformation properties (elongation and contraction) remain practically unchanged. In General, we can say that the effect of laser hardening is small.

References

1. Gulyaev A. P. *Physical Metallurgy*. M. : *Metallurgy*, 1986. – 544 p. (in Russian)
2. The use of the Kola method for the study of the processes of high-speed deformation of materials of different physical nature. N. Novgorod: Publishing house of NNSU, 2017. – 148 p. (in Russian)

4-44

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

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

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия
E-mail: otd@expd.vniief.ru

Работа посвящена анализу данных по амплитудно-временным закономерностям процесса динамического разрушения твердых тел при различных видах

высокоинтенсивного воздействия в диапазонах неравновесных состояний $t \sim 10^{-5}$ с и $t \sim 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-10}$ с и установлению общих закономерностей поведения неисследованных материалов в экстремальных условиях [1].

В работе проанализированы результаты исследований процесса динамического разрушения твердых тел различной природы с использованием магнитоимпульсного способа нагружения – микросекундный диапазон неравновесных состояний и результаты исследований процесса динамического разрушения ряда металлов в режиме импульсного объемного разогрева при воздействии импульсов релятивистских электронных пучков – нано- и субнаносекундный диапазон неравновесных состояний [1–3].

Показано, что в динамическом диапазоне долговечности зависимость времени разрушения от амплитуды приложенной нагрузки при двух способах импульсного нагружения твердых тел различной природы имеет степенной вид, что говорит о скейлинговой природе процесса разрушения в микросекундном – субнаносекундном диапазонах неравновесных состояний [1].

Вышеизложенное определяет возможность прогнозирования неисследованных твердых тел в микро-, нано- и субнаносекундном диапазонах неравновесных состояний.

Литература

1. Кошелева Е. В., Кривошеев С. И., Сельченкова Н. И., Учаев А. Я. Обоснование возможности прогнозирования поведения твердых тел в экстремальных условиях при различных видах высокоинтенсивного воздействия // Ядерная физика и инжиниринг, том 7, № 4, с. 347–354, 2016.
2. Кошелева Е. В., Пунин В. Т., Сельченкова Н. И., Учаев А. Я. Общие закономерности иерархических релаксационных процессов в металлах при воздействии импульсов проникающих излучений: монография – Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2015. – 211 с.
3. Krivosheev S. I. and Magazinov S. G. Irreducible specific energy of new surfaces creation in materials with crack-type macro defects under pulse action // Journal of Physics: Conference Series 774, 2016. – P. 1–8.

**SUBSTANTIATION OF A CRITERION
OF PREDICTABILITY OF SOLID STATES'
BEHAVIOR UNDER EXTREME CONDITIONS
AT HIGH-INTENSITY ACTION
OF DIFFERENT TYPES**

E. V. Kosheleva, N. I. Sel'chenkova, A. Ya. Uchaev
Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Research Institute
of Experimental Physics
E-mail: otd@expd.vniief.ru

The paper is devoted to data analysis by time-amplitude regularities of dynamic solid states' failure under different types of high-intense action within the ranges of non-equilibrium states $t \sim 10^{-5}$ s and $t \sim 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-10}$ s as well as to determining general

regularities of unstudied materials' behavior under extreme conditions [1].

The paper analyzes results of studies of dynamic process of failure of various nature solid states using a magnetoimpulse loading method – a microsecond range of non-equilibrium states and results of studying the process of dynamic failure of a number of metals in the pulse volume heat-up mode under the action of relativistic electron beam pulses – nano- and sub-nanosecond range of non-equilibrium states [1–3].

It is shown that within the dynamic longevity range the failure time as a function of applied loading amplitude are of power view under two types of pulsed loading of various nature solid states, what testifies to a scaling nature of failure process in microsecond – subnanosecond ranges of non-equilibrium states [1].

The above mentioned specifies a criterion of predictability for unstudied solid states in micro-, nano- and subnanosecond ranges of non-equilibrium states.

References

1. Kosheleva E. V., Krivosheev S. I., Sel'chenkova N. I., Uchaev A. Ya. Substantiation of a criterion of predictability of solid states' behavior under extreme conditions at different types of high-intensity action // Yad. Fiz. i Ingen., vol. 7, № 4, p. 347–354, 2016.
2. Kosheleva E. V., Pulin V. T., Sel'chenkova N. I., Uchaev A. Ya. General regularities of hierarchy relaxation processes in metals under the action of penetrating pulses: Monograph – Sarov: RFNC – VNIIEF, 2015. – 211 p.
3. Krivosheev S. I. and Magazinov S. G. Irreducible specific energy of new surfaces creation in materials with crack-type macro-defects under pulse action // Journal of Physics: Conference Series 774, 2016. – P. 1–8.

4-45

**СИНХРОТРОННАЯ ДИАГНОСТИКА
ПРОЦЕССОВ ДВУКРАТНОГО
УДАРНОГО СЖАТИЯ**

Д. В. Петров¹, А. Ю. Гармашев¹, С. М. Долгих¹,
Е. Б. Смирнов¹, Э. Р. Прууэл², К. А. Тен²,
А. О. Кашкаров², Б. П. Толочко^{3,4}

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

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, Россия

³Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,
Новосибирск, Россия

⁴Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, Россия

Уникальные особенности синхротронного излучения открывают широкие возможности его применения для визуализации быстротекущих процессов. Высокая периодичность синхротронного излучения, малая длительность импульса и малая угловая расходимость зондирующего излучения поз-

воляют проводить прецизионную невозмущающую диагностику ударно-волновых явлений, в том числе процессов многократного взаимодействия ударных волн и волн разрежения.

В работе приводятся постановки и результаты экспериментов, в которых реализованы режимы отражения ударных волн от преграды и столкновения встречных ударных волн. Регистрация процессов движения падающих ударных волн, столкновения и образования отраженной ударных волн осуществлялась с использованием синхротронного излучения. Эксперименты выполнены на ускорительном комплексе ВЭПП-3 института ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН.

SYNCHRONOUS DIAGNOSTICS FOR THE PROCESSES OF TWOFOLD SHOCK COMPRESSION

D. V. Petrov¹, A. Yu. Garmashev¹, S. M. Dolgikh¹,
E. B. Smirnov¹, E. R. Prueel², K. A. Ten²,
A. O. Kashkarov², B. P. Tolochko^{3,4}

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

²Lavrentiev Institute of Hydrodynamics RAS SB, Novosibirsk, Russia

³Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry RAS SB, Novosibirsk, Russia

⁴Budker Institute of Nuclear Physics RAS SB, Novosibirsk, Russia

Unique features of synchronous radiation open wide possibilities of its application for visualization high-speed processes. High periodicity of synchronous radiation, low duration of pulse and low angle divergence of probing radiation permit to conduct precise noninvasive diagnostics of shock-wave phenomena, including the processes of multiple interactions of shock waves and rarefaction waves.

The work presents the set-ups and the results of experiments, which realized the regimes of shock waves reflection from a barrier and collision of oncoming shock waves. Registration of the processes of incident shock waves motion, collision and formation of reflected shock waves was performed using synchronous radiation. Experiments were conducted on acceleration complex VEPP-3 at Budker Institute of Nuclear Physics RAS SB.

4-46

PT-ДИАГРАММА ОЛОВА И СВИНЦА ПРИ ДАВЛЕНИЯХ В НЕСКОЛЬКО ТПа

Н. А. Смирнов

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

E-mail: nasmirnov@vniitf.ru

В работе представлены результаты первопринципных расчетов структурной стабильности олова и свинца при давлениях более 1 ТПа и температурах выше нуля. Расчеты выполнены с помощью полноэлектронного метода линейных маффин-тин орбиталей (FP-LMTO). Тепловой вклад в свободную энергию кристалла от колебаний решетки был рассчитан в квазигармоническом приближении, с использованием вычисленных при $T = 0$ фононных спектров. Кривые плавления металлов определены по критерию Линдемана. Расчеты показали, что в олове при давлениях выше 100 ГПа и комнатной температуре имеются два структурных перехода, $bcc \rightarrow hcp$ и $hcp \rightarrow bcc$. Причем, область существования hcp олова ограничена сверху температурой ~ 2000 К. Для свинца при $T = 300$ К наблюдаются переходы $bcc \rightarrow hcp$ и $hcp \rightarrow fcc$ в диапазоне давлений от ~ 1 ТПа и выше. В представленной работе проводится сравнительный анализ структурной устойчивости рассмотренных металлов и обсуждается возможность обнаружения предсказанных фазовых превращений в экспериментах по квазиизэнтропическому сжатию вещества.

PT-DIAGRAM OF TIN AND LEAD AT PRESSURES OF SEVERAL TPa

N. A. Smirnov

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

E-mail: nasmirnov@vniitf.ru

The paper presents results of ab initio calculations on tin and lead stability at pressures above 1 TPa and $T > 0$. The calculations were done by the all-electron full-potential linear muffin-tin orbital method (FP-LMTO). The thermal contribution from lattice vibrations to free energy was calculated in quasiharmonic approximation with use of phonon spectra calculated at $T = 0$. The melting curves were determined from the Lindeman criterion. Our calculations suggest that two structural transitions, $bcc \rightarrow hcp$ and $hcp \rightarrow bcc$, occur in tin at pressures above 100 GPa and room temperature, and the region where hcp tin exists has an upper bound of ~ 2000 K. In lead, $bcc \rightarrow hcp$ and $hcp \rightarrow fcc$ transitions are predicted to occur at $T = 300$ K and at pressures from ~ 1 TPa and above. The paper makes comparative analysis into the structural stability of the metals and discusses feasibility of observing the predicted phase transitions in quasi-isentropic compression experiments.

4-47

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В УДАРНО-СЖАТОЙ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Ф. И. Тарасов, Е. Б. Смирнов, А. Ю. Николаев,
Р. Н. Канунников, В. В. Малёв,
А. С. Лобачёв, Д. В. Мухин

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия
E-mail: vniitf@vniitf.ru

В работе приведены результаты определения скорости звука методом догоняющей разгрузки в ударно-сжатых образцах из эпоксидного компаунда ЭК-34 в диапазоне давлений от 16 до 38 ГПа. Для создания ударных волн в образцах применялись взрывные нагружающие устройства на основе мощных конденсированных взрывчатых веществ с ударниками из стали со скоростями полета от 2,7 до 4,8 км/с. Регистрация сигналов осуществлялась фотоэлектрическим методом. Проведено сравнение полученных результатов и ранее опубликованных данных по скорости звука в ударно-сжатой эпоксидной смоле.

SOUND VELOCITY MEASUREMENTS OF SHOCK-COMPRESSED EPOXIDE RESIN BY THE PHOTOELECTRIC REGISTRATION TECHNIQUE

F. I. Tarasov, E. B. Smirnov, A. Yu. Nikolaev,
R. N. Kanunnikov, V. V. Malev,
A. S. Lobachev, D. V. Mukhin

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

The paper presents results of the sound velocity measurements by the overtaking release method used with shock-compressed samples of the EK-34 epoxide compound in the pressure range from 16 to 38 GPa. The loading explosive devices based on powerful condensed explosives with steel impactors at flight velocities ranging from 2.7 to 4.8 km/s were used to produce the shockwaves in the samples. The signals were recorded by the photoelectric registration technique. The obtained results of measured sound velocities in shock-compressed epoxide resin are compared to the previously published data.

4-48

ДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ СИ

К. А. Тен^{1,2}, Э. Р. Прууэл¹, А. О. Кашкаров¹,
И. А. Рубцов¹, Б. П. Толочко²

¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, Россия
²Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, Россия
E-mail: kten276@gmail.com

Использование синхротронного излучения (СИ) позволяет на новом уровне исследовать формирование и эволюцию функциональных материалов в различных ударно-волновых процессах (в том числе детонационных) в режиме *in situ* с высоким временным разрешением. В Сибирском Отделении РАН ведутся работы по развитию инструментальной базы, методов и подходов, позволяющих исследовать формирование и эволюцию функциональных материалов в различных физико-химических процессах в режиме *in situ* с использованием синхротронного излучения. Цель данных работ – исследование поведения вещества в экстремальных условиях при интенсивных динамических воздействиях.

В докладе представлен обзор быстрых методик исследования ударно сжатого вещества структурного и фазового состояния сжатого вещества в субмикросекундном диапазоне. В настоящее время реализованы методики томографии плотности сжатого (и разлетающегося) вещества, динамики распределения малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) с временным разрешением ~100 нс. Проведены первые эксперименты по регистрации дифракционных рефлексов на больших углах при тепловом воздействии на вольфрам.

Наши дальнейшие планы можно разделить на несколько направлений:

1. Создание ударно-волновой установки для динамического сжатия вещества. (Использование взрывных камер, газовых пушек и импульсных лазеров).
2. Создание новых источников СИ (Вигглеры и ондуляторы).
3. Разработка и изготовление рентгеновской оптики (зеркала и линзы).
4. Разработка быстрых детекторов. (Твердотельных, стрик камеры).

Реализация этих планов позволит на новом уровне исследовать свойства энергетических материалов, структуру ударного и детонационного фронта, уравнения состояния продуктов взрыва, химические реакции, динамическое формирование наноструктур из углерода и металлов, а также исследовать кинетику синтеза наночастиц металлов в условиях быстрого разложения прекурсора.

DYNAMIC STUDIES OF THE PROPERTIES OF NEW MATERIALS BY SR METHODS

K. A. Ten^{1,2}, E. R. Prueel¹, A. O. Kashkarov¹,
I. A. Rubtsov¹, B. P. Tolochko²

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

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

E-mail: kten276@gmail.com

The use of synchrotron radiation (SR) allows at a new level to investigate the formation and evolution of functional materials in various shock-wave processes (including detonation) in *in situ* with high time resolution. In the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, work is underway to develop the instrumental base, methods, and approaches that allow one to study the formation and evolution of functional materials in various physicochemical processes in *in situ* using synchrotron radiation. The goal of this work is to study the behavior of a substance under extreme conditions with intense dynamic effects.

The report provides an overview of fast methods for studying a shock-compressed substance of the structural and phase state of a compressed substance in the sub-microsecond range. At present, methods of tomography of the density of a shock compressed (and expanding) substance, the dynamics of the distribution of small-angle X-ray scattering (SAXS) with a time resolution of ~100 ns are implemented. The first experiments were carried out on the registration of diffraction reflections at large angles under thermal action on tungsten.

Our future plans can be divided into several areas:

1. Creating a shock-wave installation for dynamic compression of a substance (use of explosive chambers, gas guns and pulsed lasers).
2. Creation of new sources of SR (wigglers and undulators).
3. Development and production of x-ray optics (mirrors and lenses).
4. Development of fast detectors (solid-state, streak camera).

The implementation of these plans will make it possible to investigate the properties of energetic materials, the structure of the shock and detonation front, the equations of state of explosion products, chemical reactions, the dynamic formation of carbon and metal nanostructures, as well as explore the kinetics of the synthesis of metal nanoparticles under conditions of rapid precursor decomposition.

4-49

ДЕСТРУКТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ – ДИНАМИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ И ДИСПЕРГИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОВ – КАК КРИТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Е. В. Кошелева, Н. И. Сельченкова, С. С. Соколов,
И. Р. Трунин, А. Я. Учаев

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

E-mail: otd@expd.vniief.ru

В работе определены количественные характеристики продуктов диспергирования и каскада диссипативных структур, возникающих в металлах при ударно-волновом нагружении. Показано, что каскад центров разрушения на различных масштабных временных уровнях является фрактальным кластером, а на пороге макроразрушения, когда возникает связность в системе центров разрушения – перколяционным. Определен показатель Херста H – нормированный размах диссипативных структур – продуктов диспергирования и гидродинамических мод. Количественные характеристики диссипативных структур обладают свойством самоподобия [1, 2].

Самоподобие диссипативных структур является следствием самоорганизации в неравновесных системах; процессы динамического разрушения и диспергирования демонстрируют примеры масштабной инвариантности.

Применение методов нелинейной физики и теории фракталов к определению количественных характеристик диссипативных структур позволило установить подобие процессов диспергирования металлов, вытекающее из сугубо неравновесного диссипативного характера процесса – его масштабной инвариантности.

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

Реализация будущего состояния неравновесной диссипативной системы через последовательность бифуркаций делает эволюцию системы необратимой.

Проведено численное моделирование деструктивных процессов, протекающих в нагруженных образцах с использованием лагранжевой методики ТИМ 3D [3].

Результаты проведенных исследований позволяют прогнозировать поведение металлов при протекании динамических диссипативных процессов в микро-наносекундных диапазонах неравновесных состояний и полезны при разработке новых уравнений состояния, позволяющих описать поведение металлов в экстремальных условиях.

Литература

1. Ильяев Р. И., Пунин В. Т., Учаев А. Я., Новиков С. А., Кошелева Е. В., Платонова Л. А., Сельченкова Н. И., Юкина Н. А. Временные закономерности процесса динамического разрушения металлов, обусловленные иерархическими свойствами диссипативных структур – каскада центров разрушения // ДАН. – 2003. – Т. 393, № 3. – С. 326–331.
2. Кошелева Е. В., Пунин В. Т., Сельченкова Н. И., Учаев А. Я. Общие закономерности иерархических релаксационных процессов в металлах при воздействии импульсов проникающих излучений: монография. – Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2015. – 211 с.
3. Соколов С. С., Панов А. И., Воропинов А. А., Новиков И. Г. и др. Методика ТИМ расчета трехмерных задач механики сплошных сред на неструктурированных многогранных лагранжевых сетках // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Матем. моделирование физ. процессов. – 2005. – Вып. 3. – С. 37–52.

DESTRUCTIVE PROCESSES – DYNAMIC FAILURE AND METAL DISPERSION – AS CRITICAL PHENOMENA

E. V. Kosheleva, N. I. Sel'chenkova, S. S. Sokolov,
I. R. Trunin, A. Ya. Uchaev

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

E-mail: otd@expd.vniief.ru

The paper presents specification of quantity of dispersion products and dissipative structure cascade, arising in metals under shock-wave loading. It is shown, that on different scale-time levels of failure centers' cascade is a fractal cluster, and it is percolation on the macro-failure threshold, when connectivity originates in the failure centers' system. Determined is Hearst index H – normalized sweep of dissipative structures – products of dispersion and hydrodynamic modes. Specifications of quantity of dissipative structures possess a self-similarity property [1, 2].

Self-similarity of dissipative structures is a consequence of self-organization in non-equilibrium systems; processes of dynamic failure and dispersion show examples of scale invariance.

Applying of methods of nonlinear physics and fractal theory to determination of dissipative structure specifications of quantity allows determining of similarity of metal dispersion processes, resulting from especially non-equilibrium dissipative process nature – its scale invariance.

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

Realization of non-equilibrium dissipative system future state through a sequence of bifuractions makes the system's evolution irreversible.

Performed is numerical modeling of destructive processes occurring in loaded samples using Lagrangian procedure TIM 3D [3].

Results of conducted studies allow prediction of metals' behavior, provided dynamic dissipative processes are

going on within micro-nanosecond ranges of non-equilibrium states. And they are useful when developing new equations of state, allowing description of metals' behavior under extreme conditions.

References

1. Il'kaev R. I., Punin V. T., Uchaev A. Ya., Novikov S. A., Kosheleva E. V., Platonova L. A., Sel'chenkova N. I., Yukina N. A. Time regularities of dynamic metals' failure, conditioned by hierarchy properties of dissipative structures – failure centers' cascade // RAS – 2003. – V. 393, № 3. – P. 326–331.
2. Kosheleva E. V., Punin V. T., Selchenkova N. I., Uchaev A. Ya. General regularities of hierarchy relaxation process in metals under action of penetrating radiation pulses: Monograph. – Sarov: RFNC – VNIIEF, 2015. – 211 p.
3. Sokolov S. S., Panov A. I., Voropinov A. A., Novikov I. G. et al. Procedure TIM for calculating three-dimensional problems of continuum mechanics by Lagrangian technique // Vopr. Atomn. Nauki i Tekhn. Ser. Math. Model. Fiz. Prots. – 2005. – Issue. 3. – P. 37–52.

4-50

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАРОЖДЕНИЯ ДИСЛОКАЦИЙ НА ГРАНИЦЫ ЗЕРНА В ГЦК БИКРИСТАЛЛАХ

Е. В. Фомин, А. Е. Майер

Челябинский государственный университет, Челябинск,
Россия

E-mail: fomin33312@gmail.com

В данной работе исследуется зарождение дислокаций на границе зерна в кристаллах меди и алюминия и проводится сравнение зарождения дислокаций в этих металлах. В качестве образцов взяты кристаллы с двумя зернами (бикристалл) размером $20 \times 20 \times 16$ нм³, которые содержат две симметричные границы зерна наклона (вторая граница возникает из-за периодических граничных условий), угол разориентировки которых находится в диапазоне от 0 до 180 градусов, а плоскость поворота зерен [110]. Бикристаллы строятся с помощью метода диаграмм Вороного [1], а для верификации полученного кристалла, проводится сравнение энергий полученных границ зерен с результатами в работе [2]. Для того, чтобы изучать зарождение дислокаций, бикристаллы деформируются следующим образом: выбирается верхняя и нижняя область в кристалле размером 5 параметров решетки и этим областям придаются равномерная скорость (2,5 м/с и –2,5 м/с). Деформация проводится с помощью метода молекулярной динамики [3] с потенциалом погруженного атома для меди [4] и алюминия [5]. Это исследование показывает существование трех типов дислокационных границ зерен в диапазоне углов разориентировки от 0 до 90 градусов. Для каждого типа границы определена их структура, процессы зарождения дислокации и дальнейшее движения дислокаций в зернах бикристалла. Сравняются характе-

ристики зарождения дислокаций в алюминии и меди, например, критическое напряжение соответствующее зарождению дислокации, общая плотность дислокаций, возникающая при деформации бикристаллов.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания 3.2510.2017/ПЧ.

Литература:

1. Hirel P. AtomsK: A tool for manipulating and converting atomic data files // *Comput. Phys. Comm.* – 2015. – Vol. 197. – P. 212–219.
2. Michael D. S., Huseyin S., Hans J. M., Thomas N. Grain boundary characterization and energetics of superalloys // *Mater. Sci. Eng.* – A 2010. – Vol. 527. – P. 7115–7125.
3. Plimpton S. Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics // *J. Comp. Phys.* – 1995. – Vol. 117. – P. 1–19.
4. Mishin Y., Farkas D., Mehl M. J., Papaconstantopoulos D. A. Interatomic potentials for monoatomic metals from experimental data and ab initio calculations // *Phys. Rev.* – B 1999. – Vol. 59. – P. 3393.
5. Mishin Y., Mehl M. J., Papaconstantopoulos D. A., Voter A. F., Kress J. D. Structural stability and lattice defects in copper: Ab initio, tight-binding, and embedded-atom calculations // *Phys. Rev.* – B 2001. – Vol. 63. – P. 224106.

INVESTIGATION OF THE DISLOCATION NUCLEATION AT THE GRAIN BOUNDARY IN FCC BICRYSTALS

E. V. Fomin, A. E. Mayer

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: fomin33312@gmail.com

This study investigates the nucleation of dislocations at the grain boundary in copper and aluminum crystals. The samples are crystals with two grains (bicrystals) with a size of $20 \times 20 \times 16 \text{ nm}^3$, which contain two symmetric tilt grain boundaries (the second boundary arises due to periodic boundary conditions). The misorientation angle is in the range from 0 to 180 degrees, and the plane of the grain rotation is [110]. Bicrystals are constructed using the Voronoi diagram method [1]. The obtained crystals are verified by comparing the energies of the grain boundaries with the values in work [2]. The dislocations nucleate and move during plastic deformation of the material therefore all bicrystals incur plastic deformation: the upper and lower regions in the crystal of 5 atomic units are chosen and uniform velocity (2.5 m/s and -2.5 m/s) is attached to these regions. Deformation is performed using the molecular dynamics method [3] with EAM potential for copper [4] and aluminum [5]. This study shows the existence of 3 types of dislocation grain boundaries in the range of misorientation angles from 0 to 90 degrees. For each type of grain boundary, the structure, the processes of dislocation nucleation and further movement dislocation in crystal grains are defined. The characteristics of the dislocation nucleation in aluminum and copper are compared, for example, the critical stress corresponding

to the dislocation nucleation and the total dislocation density that produces during the deformation of bicrystals.

The work is supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, state task No. 3.2510.2017/PP.

Reference:

1. Hirel P. AtomsK: A tool for manipulating and converting atomic data files // *Comput. Phys. Comm.* – 2015. – Vol. 197. – P. 212–219.
2. Michael D. S., Huseyin S., Hans J. M., Thomas N. Grain boundary characterization and energetics of superalloys // *Mater. Sci. Eng.* – A 2010. – Vol. 527. – P. 7115–7125.
3. Plimpton S. Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics // *J. Comp. Phys.* – 1995. – Vol. 117. – P. 1–19.
4. Mishin Y., Farkas D., Mehl M. J., Papaconstantopoulos D. A. Interatomic potentials for monoatomic metals from experimental data and ab initio calculations // *Phys. Rev.* – B 1999. – Vol. 59. – P. 3393.
5. Mishin Y., Mehl M. J., Papaconstantopoulos D. A., Voter A. F., Kress J. D. Structural stability and lattice defects in copper: Ab initio, tight-binding, and embedded-atom calculations // *Phys. Rev.* – B 2001. – Vol. 63. – P. 224106.

4-51

МОБИЛЬНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ НА БАЗЕ БЕЗЖЕЛЕЗНОГО ИМПУЛЬСНОГО БЕТАТРОНА ДЛЯ РАДИОГРАФИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В. А. Фомичёв, С. Г. Козлов, Ю. П. Куропаткин,
В. И. Нижегородцев, И. Н. Романов, К. В. Савченко,
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

Описан мобильный циклический ускоритель на базе безжелезного импульсного бетатрона. Ускоритель позволяет получать до трех кадров в одном импульсе и предназначен для радиографирования динамических объектов с большими оптическими толщинами в составе рентгенографического комплекса (Пат. 2548585 C1 RU МПК G03B 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.). Приведены структурная схема ускорителя, временная диаграмма срабатывания его отдельных систем в рабочем цикле и осциллограммы сигналов с датчиков контроля выходных параметров. В 2018 году проведены тестовые включения в однокадровом режиме. Величина емкостного накопителя системы импульсного питания электромагнита бетатрона, определяющая граничную энергию электронного пучка,

составила $C = 1800$ мкФ. По результатам тестовых включений получено: толщина просвеченного свинцового тест-объекта на расстоянии 4 м от танталовой мишени – 140 мм, длительность выходного гамма-импульса на полувысоте – 120 нс, размеры источника излучения 6×3 мм² (размеры танталовой мишени 6×6 мм²). Применение таких ускорителей в составе рентгенографического комплекса дает возможность оптимизировать геометрию гидродинамических опытов за счет изменения расположения ускорителя и регистратора теневых изображений относительно объекта исследования. Это позволит повысить интенсивность рентгеновского излучения в плоскости регистратора как минимум в 2 раза по сравнению с действующими российскими рентгенографическими комплексами.

MOBILE ACCELERATOR BASED ON IRONLESS PULSED BETATRON FOR DYNAMIC OBJECTS RADIOGRAPHING

V. A. Fomichev, A. A. Chinin, S. G. Kozlov,
Yu. P. Kuropatkin, V. I. Nizhegorodtsev, I. N. Romanov,
K. V. Savchenko, V. D. Selemir,
O. A. Shamro, E. V. Urlin

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific
Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia
E-mail: mailbox@ntc.vniief.ru

The paper concerns a mobile accelerator based on the ironless pulsed betatron. The accelerator has a possibility to obtain up to three frames in a single pulse and is aimed to radiograph dynamic objects with a large optical thickness as a part of the radiographic complex (Pat. 2548585 C1 RU МПК G03B 42/02. D. I. Zenkov and others. “Mobile radiographic complex and radiation source of betatron type for radiographic complex” (in Russian), 2015.). The block diagram of the accelerator, the temporal diagram of its separate systems operation and oscillograms of the betatron output parameters are provided. The testing powering in a single frame mode was carried out in 2018. The capacitance of the storage of the betatron electromagnet pulsed powering system that defines the electron beam energy was equal to 1800 μ F. The following test results have been obtained. The thickness of the lead test object examined with X-rays reached 140 mm at 4 m from the tantalum target of the betatron. The full width of the output gamma pulse at half maximum in a single frame mode was equal to 120 ns; the dimension of the radiation source was 6×3 мм²; the dimension of the tantalum target was 6×6 мм². The application of these accelerators within the radiographic complex enables the optimization of the hydrodynamic experiments geometry by changing the position of the accelerator and shadow images recorder with respect to the investigation object. It will allow increasing the intensity of the X-ray radiation in the recorder plane at least twice compared to the active Russian radiographic complexes.

4-52

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАННОЙ СТРУКТУРЫ В МЕДИ ПОСЛЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СХЛОПЫВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

Н. Ю. Фролова¹, В. И. Зельдович¹, А. Э. Хейфец¹,
И. В. Хомская¹, К. В. Гаан², Е. В. Шорохов²

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

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

E-mail: frolova@imp.uran.ru

Медная цилиндрическая оболочка наружным диаметром 130 мм была подвергнута воздействию скользящей детонационной волны. На торце оболочки располагалось взрывчатое вещество (ВВ), при иницировании заряда ВВ фронт детонационной волны распространялся вдоль боковой поверхности оболочки и происходило ее обжатие. В результате воздействия получился сплошной цилиндр диаметром 57–58 мм. Процесс высокоскоростной деформации оболочки состоял из двух этапов: ударно-волнового воздействия на стенки цилиндра и инерционного схождения. Скорость инерционного схождения была на порядок меньше скорости распространения ударной волны.

Металлографическое исследование структуры схлопнутого цилиндра показало наличие трех зон: зона деформации, рекристаллизации и плавления. Установлено, что при высокоскоростной деформации в материале происходят два конкурирующих процесса, двойникование и скольжение. Деформационные двойники, возникшие в начале схождения имеют искаженные двойниковые границы и ориентацию, отличающуюся от строго двойниковой. Двойники, возникшие в конце схлопывания, имеют правильные двойниковые ориентировки между матрицей и двойником. Деформационные двойники имеют малый поперечный размер, часто группируются в пакеты.

В деформированной зоне, вблизи боковой поверхности в структуре наблюдается как ячеистая структура, так и субзеренная с поперечным размером 0,1 до 2 мкм. Границы ячеек и субзерен широкие, рыхлые, с небольшими углами разориентировки. В ячейках и субзернах наблюдается высокая плотность дислокаций. Полного перераспределения дислокаций не происходит.

Работа выполнена в рамках темы «Структура» (№ АААА-А18-118020190116-6), при частичной поддержке Комплексной программы УрО РАН (проект 18-10-2-39).

FEATURES OF DEFORMED STRUCTURE IN COPPER AFTER HIGH-SPEED COLLAPSE OF THE CYLINDRICAL SHELL

N. Yu. Frolova¹, V. I. Zel'dovich¹, A. E. Kheifets¹,
I. V. Khomsкая¹, K. V. Gaan², E. V. Shorokhov²

¹M. N. Miheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of
RAS, Ekaterinburg, Russia

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

E-mail: frolova@imp.uran.ru

A copper cylindrical shell with an outer diameter of 130 mm was exposed to a sliding detonation wave. An explosive substance (EX) was located at the end of the shell; when initiating an explosive charge, the front of the detonation wave propagated along the side surface of the shell and its compression occurred. The impact resulted in a continuous cylinder with a diameter of 57–58 mm. The process of high-speed deformation of the shell consisted of two stages: shock-wave action on the walls of the cylinder and inertial convergence. The speed of inertial convergence was an order of magnitude less than the velocity of propagation of a shock wave.

A metallographic study of the structure of a collapsed cylinder revealed the presence of three zones: the zone of deformation, recrystallization, and melting. It was established that during high-speed deformation two competing processes occur in the material, twinning and sliding. The deformation twins arising at the beginning of convergence have distorted twin boundaries and an orientation that differs from a strictly twin. The twins arising at the end of the collapse have the correct twin orientations between the matrix and the twin. Deformation twins have a small transverse size, often grouped in packages.

In the deformed zone, near the lateral surface, both the cellular structure and the subgrain with a transverse size of 0.1 to 2 μm are observed in the structure. The boundaries of cells and subgrains are wide, loose, with small angles of disorientation. In cells and subgrains, there is a high dislocation density. A complete redistribution of dislocations does not occur.

This work was supported by RAS theme “Structure” (№ АААА-А18-118020190116-6) and partially supported by projects of Presidium of RAS (project18-10-2-39).

4-53

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ГАФНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

К. В. Хищенко

Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

E-mail: konst@ihed.ras.ru

Развита полуэмпирическое уравнение состояния гафния с учетом полиморфных фазовых превращений, плавления и испарения. Представлены резуль-

таты расчетов термодинамических характеристик различных твердых, жидкой и газовой фаз в широком диапазоне давлений и температур. Проведено сопоставление расчетных результатов с имеющимися ударно-волновыми данными. Полученное многофазное уравнение состояния может быть эффективно использовано в численном моделировании различных высокоинтенсивных процессов.

PHASE TRANSFORMATIONS OF HAFNIUM AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES

К. В. Khishchenko

Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

E-mail: konst@ihed.ras.ru

Semiempirical equation of state for hafnium with taking into account polymorphic phase transformations, melting and evaporation effects is developed. Results of calculations of thermodynamic characteristics of different solid, liquid and gas phases in a wide range of pressures and temperatures are presented. Comparison of calculated results with available shockwave data is carried out. Obtained multi-phase equation of state can be used effectively in numerical modeling of various high-intensity processes

4-54

СВОЙСТВА СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ДКУП

И. В. Хомская¹, В. И. Зельдович¹, Е. В. Шорохов²,
С. В. Разоренов³, Н. Ю. Фролова¹,
А. Э. Хейфец¹, Д. Н. Абдуллина¹

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: khomsкая@imp.uran.ru

Изучены механические и эксплуатационных свойства сплавов Cu-Zr, Cu-Cr и Cu-Cr-Zr, легированных микродобавками (0,03–0,2 %) хрома и циркония (0,03–0,08 %) с субмикро-кристаллической (СМК) структурой, полученной методом динамического канально-углового прессования (ДКУП). Механические свойства СМК сплавов исследованы при ударно-волновом нагружении с давлением до 6,9 ГПа и скоростью деформации 10^5 c^{-1} . При ДКУП на образец действует высокоскоростная (10^4 – 10^5 c^{-1}) деформация сдвига, ударно-волновая деформация сжатия и температура. Установлено, что формирование неравномерной СМК структуры в дисперсионно-твердеющих сплавах меди, происходит в результате высокоскоростных процессов фрагментации, динамической полигонизации и частичного деформационного старения

с выделением наноразмерных частиц Cr и Cu₅Zr. Исследовано влияние ДКУП и старения на прочностные свойства, износостойкость и электропроводность сплавов. Показано, что измельчение структуры сплавов Cu-Cr-Zr на три порядка (от 200–400 мкм до 0,2–0,4 мкм), и повышение предела прочности в 2,6 раза и предела текучести в 3,3 раза при сохранении удовлетворительной пластичности может быть достигнуто уже при трех-четырех проходах ДКУП. Изучено влияние дисперсности кристаллической структуры, полученной при ДКУП на сопротивление сплавов высокоскоростному деформированию и разрушению. Показано, что однократное 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 и динамический предел текучести. Дальнейшее измельчение кристаллитов до 0,2–0,4 мкм при ДКУП увеличивает в 1,5–4,0 раза динамические характеристики сплава Cu-Cr. Заметим, что динамическая (откольная) прочность меди и сплава Cu-0,1% Cr с СМК структурой, полученной ДКУП, составляет 2510 и 2760 МПа, соответственно, что более чем в 5 раз превышает статический предел прочности данных материалов с аналогичными структурами.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Структура» № АААА-А18-118020190116-6 и при частичной поддержке УрО РАН (проект № 18-10-2-39).

PROPERTIES OF SUBMICROCRYSTALLINE ALLOYS BASED ON COPPER OBTAINED BY THE DCAP METHOD

I. V. Khomsкая¹, V. I. Zeldovich¹, E. V. Shorokhov²,
S. V. Razorenov³, N. Yu. Frolova¹,
A. E. Kheifets¹, D. N. Abdullina¹

¹M. N. Miheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

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

³Institute of Problems of Chemical Physics of RAS, Chernogolovka, Russia

E-mail: khomsкая@imp.uran.ru

The mechanical and functional properties of Cu-Zr, Cu-Cr and Cu-Cr-Zr alloys with chromium (0.03–0.2 %) and zirconium (0.03–0.08 %) microadditives with a submicrocrystalline (SMC) structure formed by the dynamic channel-angular pressing (DCAP) method were studied. The mechanical properties of SMC alloys were studied under shock-wave loading with pressures up to 6.9 GPa and a strain rate of 10^5 s^{-1} . The specimen subjected to DCAP is influenced by high-strain-rate (10^4 – 10^5 s^{-1}) shear deformation, shock-wave compression deformation and temperature. It has been established that the formation of a non-equilibrium SMC structure 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 Cu₅Zr nano-sized particles. The effect of DCAP and aging on strength

properties, wear resistance and electrical conductivity of the alloys has been investigated. It has been shown that the Cu-Cr-Zr alloy structure refinement on the order of three (from 200–300 to 0.2–0.4 μm), and raising ultimate strength by 2.6 times and yield stress by 3.3 times, while maintaining satisfactory ductility can be achieved even by three or four DCAP passes. The influence of the dispersion of the crystal structure obtained by the DCAP on the resistance of alloys to high-speed deformation and fracture is studied. 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 elastic limit and the dynamic yield stress by 1.9–2.8 times. Further refinement of crystallites to 0.2–0.4 μm after DCAP increases the dynamic characteristics of the Cu-Cr alloy by 1.5–4.0 times. It should be noted that the dynamic (spall) strength of copper and Cu-0.1% Cr alloy with a SMC structure obtained by the DCAP is 2510 and 2760 MPa, respectively, which is more than 5 times higher than the static tensile strength of these materials with similar structures.

The work was accomplished according to the State Assignment theme “Structure” (No АААА-А18 118020190116 6) and partially supported by Ural Division of RAS (project No 18-10-2-39).

4-55

КОНЦЕПЦИЯ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА БАЗЕ БЕЗЖЕЛЕЗНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ БЕТАТРОНОВ ДЛЯ МАЛОРАКУРСНОЙ ТОМОГРАФИИ

О. А. Шамро, Ю. П. Куропаткин, В. И. Нижегородцев,
К. В. Савченко, В. Д. Селемир,
В. А. Фомичёв, А. А. Чинин

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

E-mail: mailbox@ntc.vniief.ru

Дан краткий обзор существующих исследовательских комплексов, предназначенных для радиографирования динамических процессов в оптически плотных объектах. Предложена концепция многолучевого рентгенографического комплекса для малоракурсной томографии на базе безжелезных импульсных бетатронов (Пат. 2515053 С1 RU МПК G03B 42/02. Ю. П. Куропаткин, В. И. Нижегородцев, В. Д. Селемир, О. А. Шамро, «Способ получения радиографического изображения быстротекущих процессов в неоднородном объекте исследования и радиографический комплекс для его осуществления», БИ. 2014. № 13.). В комплексе возможно применение до 18 малогабаритных установок, расположенных в трех горизонтальных плоскостях. Объект исследования располагается во взрывозащитной камере. Каждая установка состоит из двух типовых модулей: ускорительного и модуля системы импульсного питания электромагнита. Выходные параметры

установки: просвечивающая способность – до 200 мм свинца на одном метре от мишени, разрешающая способность – не более 1 мм, длительность γ -импульса на полувысоте в однокадровом режиме – 100 нс, в трехкадровом – 150 нс. При работе каждой установки в трехкадровом режиме, комплекс позволит получать до 54 снимков в одном гидродинамическом опыте. Комплекс достаточно компактен, его диаметр с зоной обслуживания составит 20 м.

CONCEPT OF RADIOGRAPHIC COMPLEX BASED ON IRONLESS PULSED BETATRONS FOR SMALL-ANGLE TOMOGRAPHY

O. A. Shamro, A. A. Chinin, V. A. Fomichev,
Yu. P. Kuropatkin, V. I. Nizhegorodtsev,
K. V. Savchenko, V. D. Selemir

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

E-mail: mailbox@ntc.vniief.ru

The active research complexes intended for the radiography of dynamic objects with a high optical density are reviewed. The concept of a multi-beam radiographic complex for a small-angle tomography based on ironless pulsed betatrons is proposed (Pat. 2515053 C1 RU MPK G03B 42/02. Yu. P. Kuropatkin and others. “Method of Radiographic Image Formation of Fast Processes in Inhomogeneity and Radiographic Complex for its Implementation” (in Russian), 2014.). It is possible to use up to 18 compact facilities in a complex; they are located in three horizontal planes. The test object is placed in the explosion-proof chamber. Each facility consists of two typical units: an accelerator unit, and a unit of the electromagnet pulsed powering system. The output parameters of the facility are the maximum translucent capacity of 200 mm of the lead at 1 m from the betatron target, the resolution of less than 1 mm, the γ -pulse full width at half maximum of 100 ns in a single frame mode, the γ -pulse full width at half maximum of 150 ns in a three-frame mode. The complex will be able to obtain up to 54 frames in one hydrodynamic experiment at the operation of each facility in a three-frame mode. The complex is compact. Its diameter with a service area will be 20 m.

4-56

НОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО УДАРНО-ВОЛНОВЫМ СВОЙСТВАМ КВАРЦИТА, ПОЛУЧЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ НИЗКООМНЫХ МАНГАНИНОВЫХ ДАТЧИКОВ В ДИАПАЗОНЕ 20–50 ГПа

А. Ю. Гармашев, Е. Б. Смирнов, Д. Т. Юсупов,
К. С. Сидоров, М. А. Шистириков,
А. И. Клёнов, Е. А. Петухов

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

Представлены постановка и результаты ударно-волновых экспериментов с регистрацией профилей волн продольных напряжений σ_{xx} в кварците при начальной плотности $\rho_0 = 2,63 \text{ г/см}^3$. Измерения профилей волн напряжений выполнены в диапазоне 20–50 ГПа с помощью симметричного удара методом догоняющей волны разгрузки в плоских образцах с использованием встроенных в кварцит манганиновых датчиков.

Работа выполнена с целью получения экспериментальных данных по ударно-волновым свойствам горных пород, в частности кварцита, необходимых для калибровки, развития и совершенствования расчётных моделей.

Задача: получение профилей продольных напряжений σ_{xx} в образцах кварцита первоуральского месторождения с использованием методики низкоомных манганиновых датчиков.

Эксперименты выполнены с использованием взрывных плосковолновых генераторов и двухступенчатой легкогазовой пушки.

В результате серии экспериментов получены экспериментальные данные в диапазоне давлений 20–50 ГПа по зависимостям продольных напряжений от времени и по упругому предвестнику.

NEW EXPERIMENTAL DATA ON SHOCK-WAVE PROPERTIES OF QUARTZ OBTAINED WITH THE HELP OF LOW-RESISTANCE MANGANIN GAUGES IN THE RANGE 20–50 GPa

A. Yu. Garmashev, E. B. Smirnov, D. T. Yusupov,
K. S. Smirnov, M. A. Shistirikov,
A. I. Klenov, E. A. Petukhov

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

Presentation describes the set-up and the results of shock-wave experiments, which registered the profiles of waves with longitudinal stresses σ_{xx} in quartz at initial density $\rho_0 = 2.63 \text{ g/cm}^3$. The measurements of stress wave profiles were performed in the range 20–50 GPa with the help of symmetric impact by method of follow rarefaction wave in flat samples using manganin gauges built in quartz.

The work was aimed at obtaining experimental data on shock-wave properties of rocks, in particular quartzite that are necessary for calibration, development and improvement of computer models.

The task was to obtain the profiles of longitudinal stresses σ_{xx} in the samples of quartzite from Pervouralsk deposit using the technique of low-resistance manganin gauges.

Experiments were performed with help of explosive plane-wave generators and two-step light gas gun.

As the result of a series of experiments, we got experimental data in the range of pressure 20–50 GPa on dependences of longitudinal stresses on time and on elastic precursor.

4-57

**СКОРОСТИ ЗВУКА
В УДАРНО-СЖАТОМ УРАНЕ
В ДИАПАЗОНЕ 80–200 ГПа**

Д. Г. Панкратов, А. К. Якунин, А. Г. Попцов

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

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

Представлены результаты взрывных экспериментов по измерению скоростей звука в природном уране при его высокоскоростной деформации в областях α - γ -фазового перехода, γ -фазе, а также в области плавления урана на фронте ударной волны. Регистрация процессов осуществлялась при помощи фотоэлектрической (индикаторной) методики [1–3].

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 [4].

Литература

1. R. G. McQueen, J. W. Hopson, L. N. Fritz. Optical technique for determining rarefaction wave velocities at very high pressures. *Rev. Sci. Instrum.*, 1982, V. 53, # 2, pp. 245–250.
2. E. A. Kozlov, V. I. Tarzhanov, D. G. Pankratov, A. K. Yakunin, V. M. Yelkin, V. N. Mikhaylov, Application of Optical Analyzer Technique for Measurements of Sound Velocities in Shock-Compressed Al-Mn Alloy for Calibration of Recent Elastic-Viscous-Plastic Models. *Int. Conf. on High Energy Density Physics Zababakhin Scientific Talks – 2005, Snezhinsk, Russia, 5–10 September 2005, Melville, New York, 2006, AIP Conference Proceedings, Vol. 849, pp. 406–410.*
3. Е. А. Козлов, Д. Г. Панкратов, О. В. Ткачѳв, А. К. Якунин, Измерение скоростей звука в аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т в диапазоне напряжений до 200 ГПа, Международная конференция «Ударные волны в конденсированном веществе» (SWCM-2012), 16–21 сентября 2012, Киев, Украина, стр. 263–265
4. Е. А. Козлов, Д. Г. Панкратов, О. В. Ткачѳв, А. К. Якунин, Скорости звука и сдвиговая прочность ударно-сжатого урана в диапазоне 10–250 ГПа, 19-я Европейская конференция по разрушению (ECF19), 26–31 августа 2012, Казань, Россия, № 603, 6 стр.

**SOUND VELOCITIES
OF SHOCK-COMPRESSED URANIUM
IN THE PRESSURE RANGE FROM 80 TO 200 GPa**

D. G. Pankratov, A. K. Yakunin, A. G. Poptsov

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

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

We present the results of sound velocity measurements in natural uranium under high strain rate deformation in α - γ - and γ -phase regions, as well as in the region

of uranium melting at the shock wave front. The processes were recorded using the photoelectric (indicator) technique [1–3].

In the solid phase of uranium we determined the changes of elastic moduli along its Hugoniot, such as Poisson ratio, elastic modulus, bulk modulus and shear modulus [4].

References

1. R. G. McQueen, J. W. Hopson, L. N. Fritz. Optical technique for determining rarefaction wave velocities at very high pressures. *Rev. Sci. Instrum.*, 1982, V. 53, # 2, pp. 245–250.
2. E. A. Kozlov, V. I. Tarzhanov, D. G. Pankratov, A. K. Yakunin, V. M. Yelkin, V. N. Mikhaylov, Application of Optical Analyzer Technique for Measurements of Sound Velocities in Shock-Compressed Al-Mn Alloy for Calibration of Recent Elastic-Viscous-Plastic Models. *Int. Conf. on High Energy Density Physics Zababakhin Scientific Talks – 2005, Snezhinsk, Russia, 5–10 September 2005, Melville, New York, 2006, AIP Conference Proceedings, Vol. 849, pp. 406–410.*
3. E. A. Kozlov, D. G. Pankratov, O. V. Tkachov, A. K. Yakunin. Measurements of Sound Velocities in 12Kh18N10T austenitic steel in the range of longitudinal stress up to 200 GPa for calibration of elastic-plastic models. *Int. Conf. “Shock Waves in Condensed Matter”, Kiev, Ukraine, September 16–21 2012, pp. 263–265.*
4. E. A. Kozlov, D. G. Pankratov, O. V. Tkachov, A. K. Yakunin. Sound velocities and shear strength of shock-compressed uranium in the pressure range from 10 to 250 GPa. *The 19th European Conference on Failure ECF19. Kazan, Russia, August 26–31, 2012. № 603, 6 стр.*

4-58

**АДАПТИВНЫЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ПРОФИЛЯ СКОРОСТИ ИЗ PDV-ДААННЫХ**

Н. Б. Аникин

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

E-mail: dep5@vniitf.ru (с пометкой для Аникина)

В работе представлен итеративный метод вычисления частоты PDV-сигнала, использующий свойство периодичности доплеровских гармоник, который позволяет достичь для реальных экспериментальных сигналов временного разрешения равного доплеровскому периоду. Метод малочувствителен к изменению во времени амплитуды доплеровской гармоники, а также к случайному шуму, квазистационарной составляющей и высшим доплеровским гармоникам, присутствующим в экспериментальных сигналах.

Каждый шаг итеративного процесса состоит из двух последовательных операций, использующих интегральные преобразования свертки с различными ядрами. Во всех преобразованиях в качестве переменной интегрирования используется некоторое приближение фазы доплеровской гармоники. На пер-

вом этапе каждой итерации к исходному PDV-сигналу применяются два интегральных преобразования. Первое из них выделяет из экспериментального сигнала первую доплеровскую гармонику, а второе преобразует исходный PDV-сигнал в квадратурную гармонику – периодический сигнал, фаза которого сдвинута на $\pi/2$ по отношению к фазе первой доплеровской гармоники. При этом оба преобразования минимизируют все шумовые компоненты экспериментального шума, такие как высшие доплеровские гармоники, случайный шум и квазистационарную составляющую.

На втором этапе два полученных сигнала представляются в комплексной форме, что позволяет относительно просто найти как новое приближение фазы доплеровского сигнала, так и среднеквадратичную погрешность, для вычисления которой сначала вычисляется амплитуда первой гармоники. Затем квадрат погрешности вычисляется интегральным преобразованием особого вида с ядром, зависящим от амплитуды первой доплеровской гармоники, приближенной доплеровской частоты и спектральной плотности случайного шума в экспериментальном сигнале. При вычислении нового приближения доплеровской частоты полученная погрешность применяется для регуляризации процесса вычисления доплеровской частоты.

Итерационный процесс обычно повторяется 5–10 итераций. После чего в подавляющем большинстве точек, вычисленная производная истинной фазы по приближенной фазе с предыдущей итерации, отличается от единицы меньше чем на величину погрешности, что и является индикатором завершения процесса восстановления фазы.

Оценка погрешности, вычисленная из экспериментального сигнала, зависит от отношения сигнал/шум, производной амплитуды сигнала и локальной доплеровской частоты и может быть меньше одного процента даже для предельного временного разрешения.

Предложен также способ вычисления начальной приближенной доплеровской фазы, необходимой для запуска итерационного процесса.

Временное разрешение метода определялось с помощью критерия Релея, примененного к восстановленной фазе синтезированного гармонического сигнала с двумя разнесенными по времени разрывами фазы. Было показано, что разрешение зависит от параметров двух первых интегральных преобразований и в пределе равно доплеровскому периоду.

Наилучшее решение получается при последовательных расчетах с разными параметрами двух первых интегральных преобразований. То есть, сначала проводится расчет с наилучшим временным разрешением (один доплеровский период). Полученное высокочастотное решение используется в качестве начального для вычислений с ухудшенными временными разрешениями – 2, 3, 5 и т.д. до 20 или даже 50 доплеровских периодов. Такой расчет улучшает решение в низкочастотной области спектра, не ухудшая при этом временного разрешения – итерационный процесс с ухудшенным временным разрешением вносит

в изначально высокочастотную версию доплеровской фазы только низкочастотные изменения.

Для тестирования метода использовался ряд PDV-сигналов, полученных в экспериментах на легкогазовой пушке калибра 44 мм и представляющий полный спектр возможных особенностей экспериментальных сигналов. Использованные сигналы характеризовались большим количеством «перетяжек» (глубокие и резкие минимумы огибающей), очень значительным количеством и мощностью высших доплеровских гармоник, очень коротким фронтом пластической волны (менее доплеровского периода). Одни из сигналов был получен с частотным сдвигом (2 ГГц). Применение метода ко всем сигналам показало исключительную устойчивость метода к разного рода шумам и особенностям профилей скорости.

Были получены профили скоростей и оценки их погрешности для каждого экспериментального сигнала. Для некоторых сигналов погрешность не превышала $\pm 0,5\%$ во всем диапазоне восстановления для предельного временного разрешения.

ADAPTIVE TECHNIQUE OF VELOCITY PROFILE RECONSTRUCTION FROM PDV DATA

N. B. Anikin

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

E-mail: dep5@vniitf.ru (Subject: for N. B. Anikin)

The paper presents iterative technique for computation of PDV signal frequency, employing periodic nature of Doppler harmonics, allowing temporal resolution of experimental signals equal to Doppler period. The technique has low sensitivity to temporal variation of Doppler harmonic amplitude and to random noise, quasi-stationary component and higher Doppler harmonics observed in experimental signals.

Every step of iterative process consists of two sequential operations using integral transforms of convolution products with different kernels. Some approximation of Doppler harmonic phase is used as integration variable in all transforms. Two integral transforms are applied to initial PDV signal at the first stage of each iteration. The first transform extracts the first Doppler harmonic from experimental signal and the second transforms initial PDV signal into quadratic harmonic, a periodic signal the phase of which has been shifted by $\pi/2$ with regard to the phase of the first Doppler harmonic. Thus both transform minimize all noise components of experimental signal such as higher Doppler harmonics, random noise and quasi-stationary component.

Two obtained signals are presented in complex form at the second stage, that allows to find both new approximation of Doppler signal phase and root mean square deviation, for calculation of which we first find amplitude of the first harmonic, in relatively simple way. Then the deviation square is computed by integral transform of

special kind with the kernel depending on amplitude of the first Doppler harmonic, approximated Doppler frequency and spectral density of random noise in experimental signal. Obtained error is applied for regularization of Doppler frequency computation process at computation of new approximation of Doppler frequency.

We usually run 5 to 10 iterations of this process. After that computed derivative of true phase from approximated phase of previous iteration differs from unity less than by the error value in vast majority of points that is an indicator of completion of the phase reconstruction process.

Evaluation of error, computed from experimental signal depends on signal to noise ratio, derivative of signal amplitude and local Doppler velocity and may be lower than one percent even for extreme temporal resolution.

We also propose technique for computation of initial approximated Doppler phase sufficient for triggering iteration process.

Temporal resolution of technique was determined using Raleigh criterion, applied to reconstructed phase of synthesized harmonic signal with two phase discontinuities separated in time. It has been demonstrated that resolution depends on parameters of the first two integral transforms and ultimately is equal to Doppler period.

The best solution is obtained in case of sequential runs with different parameters of the first two integral

transforms. That is we first run computation with the best temporal resolution (one Doppler period). Obtained high frequency solution is used as input data for runs with worsened temporal resolutions, like 2, 3, 5, etc. up to 20 or even 50 Doppler periods. This run improves the solution in low-frequency part of the spectrum and at the same time it does not make worse temporal resolution, as iteration process with worsened temporal resolution makes only low-frequency changes in initially high-frequency version of Doppler phase.

For testing the technique we used several PDV signals, recorded in experiments with 44 mm light-gas gun and having the full spectrum of possible features of experimental signals. Used signals had high numbers of "intakes" (deep and steep minima of envelope), significant numbers and power of higher Doppler harmonics, very short front of plastic wave (less than Doppler period). One signal was obtained with frequency shift (2 GHz). Application of technique to all signals has demonstrated its extreme robustness to all kinds of noises and features of velocity profiles.

We have obtained velocity profiles and estimates of error for each experimental signal. For some signals error did not exceed $\pm 0.5\%$ in the whole range of reconstruction for ultimate temporal resolution.

Секция 5

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ
ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ,
КОНТРОЛЬ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ
И ВОДОРОДНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

Section 5

**SCIENTIFIC BASES
OF NUCLEAR POWER ENGINEERING,
NUCLEAR MATERIALS HANDLING
AND HYDROGEN SAFETY**

**ИМПУЛЬСНЫЕ
НЕЙТРОННЫЕ/РЕНТГЕНОВСКИЕ
ИСТОЧНИКИ С ЛАЗЕРНЫМ
ИНИЦИИРОВАНИЕМ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ
НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РЕШЕНИЯ
ЗАДАЧ, СВЯЗАННЫХ С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ
СОХРАННОСТИ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

А. Фавалли, С. Паланияппан, Р. Е. Рейновски

Лос-Аламосская национальная лаборатория, Лос-Аламос,
шт. Нью-Мексико, США

Лос-Аламосская национальная лаборатория (LANL) проводит исследования сверхмощного лазерного пучка для создания нейтронных и рентгеновских вспышек высокой интенсивности. На лазерной установке Trident (в LANL) с использованием короткоимпульсного лазера мы впервые получили новый мощный источник нейтронов малой длительности. Источник нейтронов обладает следующими характеристиками: высокая интенсивность (10^{10} быстрых нейтронов/стерадиан/импульс), направленность и малая длительность (~наносекунды/нейтронный импульс). На установке Trident при падении электронов, возбуждаемых лазерным излучением и обладающих энергией в мультимегаэлектронвольт, на конвертерную фольгу с большим атомным номером был получен высокоинтенсивный импульсный источник рентгеновских лучей, инициируемый лазерным излучением. Характеристики нейтронных/рентгеновских источников, возбуждаемых лазером, делают их подходящими для использования в области обеспечения сохранности ядерных материалов в мировом масштабе. Мы занимаемся исследованием областей практического применения, таких как: анализ специальных ядерных материалов при проведении учета; задачи, связанные с обеспечением гарантий и сохранности; анализ отработавшего ядерного топлива (в хранилищах, контейнерах) анализ радиоактивных продуктов ядерного взрыва в результате аварии на реакторе. Также мы проводим ядерно-физические эксперименты с лазерным инициированием, например, нейтронная резонансная спектроскопия и измерения площади поперечного сечения. Далее, будут представлены и рассмотрены экспериментальные результаты, описывающие свойства нейтронных/рентгеновских источников с лазерным инициированием, а также их применение для радиографических исследований и активного зондирования ядерных материалов.

(LAUR-18-22055)

**LASER-DRIVEN PULSE NEUTRON/X-RAY
SOURCES FOR NUCLEAR MATERIAL
SECURITY AND SCIENTIFIC APPLICATIONS**

A. Favalli, S. Palaniyappan, R. E. Reinovsky

Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, USA

Los Alamos National Laboratory (LANL) has been studying ultra-high intensity laser beam to produced high intensity neutron and X-ray bursts. Using the Trident laser facility (in LANL) we have pioneered a new short-duration, yet intense source of neutron using a short-pulse laser. The neutron source features both high intensity (10^{10} fast neutrons per steradian per pulse) and directionality, and short-duration (~nanoseconds per neutron pulse). At Trident facility, also a high intense laser-driven X-ray pulse source was produced by impinging laser-driven multi-MeV electrons onto a high-Z converter foil. The features of the laser-driven neutron/X-ray sources make them particularly suitable for applications in global nuclear material security. We have been investigating applications, such as assay of special nuclear materials for materials accountancy, safeguards and security applications, spent nuclear fuel assay (at storage facility, in casks, for nuclear debris from reactor accidents). We are also pursuing laser-driven nuclear physics experiments, e.g. neutron resonance spectroscopy and cross section measurements. The experimental results both on the laser-driven neutron/X-ray sources characterization and applications in radiography and active interrogation of nuclear material will be presented and discussed.

(LAUR-18-22055)

**МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО АНАЛИЗА
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОХРАННОСТИ
ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Р. Е. Рейновски, А. Фавалли

Лос-Аламосская национальная лаборатория, Лос-Аламос,
шт. Нью-Мексико, США

Подтверждение наличия или отсутствия специального ядерного материала внутри закрытого контейнера, равно как и определение его конфигурации, количества и свойств, является одной из наиболее важных и трудных задач, с которой столкнулись специалисты в области международных гарантий. Экспериментальная методология неразрушающего анализа (NDA) предполагает наличие нейтронного, гамма- или теплового излучения контролируемого образца, по которому можно будет определить массовый и изотопный состав. В ходе активного зондирования с облучением частицами и фотонами можно получить дополнительную информацию, включая, возможно, информацию о конфигурации и распределении интересующего материала. Метод неразрушающего анализа основывается на принципиальных элементах прикладной ядерной физики. За последние 50 лет отмечается значительный успех данного метода как инструмента обеспечения международных гарантий, контроля ядерных материалов и их учета.

Быстрые колоссальные достижения в сфере неразрушающего анализа (успехи в области прикладной

гамма-спектроскопии, новые калориметрические методы и активное зондирование с внешним определением характеристик), вместе с использованием как стационарных радиоактивных источников, так и импульсных нейтронных или гамма-источников, обеспечили расширение возможностей глобально развиваемой системы предотвращения незаконного перемещения ядерных материалов, повысили достоверность получаемых данных. Новейшие системы датчиков обеспечивают повышение чувствительности нового технического оборудования.

Быстрые радиографические исследования с высокой степенью точности, в ходе которых используются различные датчики и технические средства, позволяют применить дополнительные методы обнаружения статических объектов, чтобы обеспечить сохранность ядерных материалов, а также могут быть использованы для проведения диагностики динамических экспериментов, выполняемых в рамках фундаментальных исследований. Радиографический метод может применяться для анализа содержимого контейнеров, упаковок и сборок в целях решения задач по обеспечению ядерной безопасности в мировом масштабе: от обычной проверки багажа, до обеспечения безопасности на пропускных пунктах и при пограничном контроле, данный метод будет также полезен при проведении подробных исследований движения материала в ходе высокоскоростных динамических экспериментов.

В данной работе представлены примеры новых инструментальных средств для проведения неразрушающего анализа и методов измерений, которые были разработаны в Лос-Аламосской национальной лаборатории и успешно внедрены на местных и зарубежных ядерных установках; данные инструменты и методы используются во многих организациях. Также мы рассмотрим некоторые виды современных радиографических исследований для проведения активного зондирования.

(LAUR-18-22326)

TECHNIQUES AND TECHNOLOGY OF NON-DESTRUCTIVE ANALYSIS FOR NUCLEAR MATERIAL SECURITY

R. E. Reinovsky, A. Favalli

Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, USA

Confirming the presence or absence of a special nuclear material and its configuration, quantity, and properties inside a closed container is one of the most important and challenging tasks facing the international safeguard community. The experimental methodology of nondestructive assay (NDA) uses neutron, gamma or heat emissions from a sample under inspection to determine its mass and isotopic composition. Active probing with particles and photons can provide additional information including, potentially, information about the configuration and distribution of the material of interest. Based on the principal elements of applied nuclear physics, NDA methodology

has achieved remarkable success in the past 50 years as a tool in international safeguards, nuclear material verifications and material accountability.

Rapid and unprecedented advances in the field of non-destructive analysis including advances in applied gamma-ray spectroscopy, new calorimetry techniques, and active interrogation with external signature detection using both static radioactive sources and pulsed neutron or gamma sources have added new dimensions and enhanced fidelity to the internationally developed capability to interdict illicit movement of nuclear materials. Novel detector systems increase the sensitivity of many new techniques.

Fast, high precision, radiography using various probes and techniques provide an additional approach exploring static objects for nuclear material security and can be used to diagnose dynamic experiments for fundamental research. Radiographic technique can be applied to inspect the contents of containers, packages and assemblies for global nuclear security applications ranging from conventional baggage inspection, to portal and boarder security and to examine, in detail, the motion of material in high speed dynamic experiments.

In this paper we present examples of a few NDA instruments and measurement methods that were developed at LANL and successfully implemented at domestic and foreign nuclear facilities and used by many organizations and discuss some applications of modern radiography to active interrogation. (LAUR-18-22326)

5-3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ПАССИВНЫХ КАТАЛИТИЧЕСКИХ РЕКОМБИНАТОРОВ ВОДОРОДА

Е. В. Безгодков, В. М. Крюков, С. Д. Пасюков,
М. В. Никифоров, А. А. Тараканов, В. Н. Федюшкин,
И. А. Попов, Д. Л. Мошкин, Ю. Ф. Давлетчин,
В. Г. Серебряк, Н. В. Морозова, О. В. Титова

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

E-mail: e.v.bezgodov@vniitf.ru

Для обеспечения водородной взрывобезопасности на АЭС с ВВЭР внедряются пассивные системы безопасности, в частности, пассивные каталитические рекомбинаторы водорода (ПКРВ). Принцип работы ПКРВ основан на протекании экзотермических реакций окисления водорода и кислорода на катализаторе, расположенного в нижней части корпуса (полый металлической трубы), и возникновении естественной тяги, усиливающей процесс конверсии водорода. В качестве катализатора выступают металлы платиновой группы, нанесенные на металлические пластины, керамические стержни или вспененные структуры с развитой пористостью[1, 2].

Основной характеристикой ПКРВ является его производительность – количество окисленного, то есть удаленного из атмосферы, водорода в единицу времени, зависящее от параметров среды – давления, температуры, газового состава и др. Не менее важной характеристикой является стартовая концентрация по водороду, при которой происходит запуск ПКРВ. Главным недостатком устройства является то, что существует предел по концентрации водорода, при котором возможно воспламенение окружающей рекомбинатор смеси. В случае реализации тяжелой аварии на АЭС такое явление представляет угрозу для целостности защитной оболочки реактора.

Ориентируясь на значения характеристик, происходит отбор оптимального и наиболее безопасного типа рекомбинатора; проектировщики АЭС используют параметры ПКРВ для расчетного обоснования водородной взрывозащиты. В целях обеспечения безопасности характеристики, отраженные в технических условиях на ПКРВ производителя, в обязательном порядке должны быть проверены и обоснованы с использованием сертифицированного оборудования и аттестованных методик испытаний.

В 2018 г. в РФЯЦ – ВНИИТФ разработаны и аттестованы первые в России методики испытаний по определению характеристик ПКРВ. В ходе работ получены критерии для обнаружения определенных явлений, возникающих при функционировании ПКРВ. В связи с отсутствием в нормативных документах определений таких явлений сформулированы и уточнены основные понятия, описывающих происходящие в ПКРВ физико-химические процессы и показывающих их взаимное согласование.

Постановка и режим испытаний, приближенные к вероятным условиям тяжелых аварий на АЭС, позволили выявить особенности работы ПКРВ, которые ранее не наблюдались. Так, например, воспламенение водородосодержащей парогазовой смеси может возникнуть не только при ее контакте с раскаленным катализатором внутри корпуса ПКРВ, но и в результате вылета в окружающую рекомбинатор атмосферу частицы, образованной при отколе с каталитической поверхности. Это приводит к снижению предела беспламенной работы ПКРВ, а случайность процесса откола частицы – к неопределенности значения предела.

Важно продолжить работы по испытаниям рекомбинаторов, используемых в настоящее время на российских АЭС, с целью уточнения их характеристик и проведения сравнительного анализа. Также необходимо провести испытания в условиях наличия в смеси монооксида углерода, который может возникать при расплавлении бетона, и недостатка кислорода (подобные испытания в России ранее не проводились). Результаты испытаний могут быть применимы для верификации моделей процессов или устройств, валидации CFD-кодов. Целесообразно улучшать методики испытаний, повышать точность методик измерений и модернизировать испытательный стенд. Комплекс перечисленных работ позволит вывести безопасность и степень защищенности российских АЭС на новый уровень.

Литература

1. Gupta S., Kanzleiter T., Poss G. Passive Autocatalytic Recombiners (PAR) Induced Ignition and the Resulting Hydrogen Deflagration Behavior in LWR Containment // The 16th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-16), At Hyatt Regency Chicago. – Chicago, IL, USA, 2015.
2. Анпилов С. В., Григорук Д. Г., Кондратенко П. С. И др. Математическое моделирование тепло- и массообмена в пассивном каталитическом рекомбинаторе водорода. – Теплоэнергетика, 2013, № 11, с. 48–51.

OPERATION CHARACTERISTICS AND PECULARITIES OF PASSIVE CATALYTIC HYDROGEN RECOMBINER

E. V. Bezhodov, V. M. Kryukov, S. D. Pasyukov,
M. V. Nikiforov, A. A. Tarakanov, V. N. Fedyushkin,
I. A. Popov, D. L. Moshkin, Yu. F. Davletchin,
V. G. Serebryak, N. V. Morozova, O. V. Titova

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

E-mail: e.v.bezhodov@vniitf.ru

Passive safety systems such as passive catalytic hydrogen recombiners (PCHR) are implemented to provide for hydrogen explosive safety at nuclear power plants with pressurized water reactors. The principle of PCHR operation is based on the energy-releasing reactions of hydrogen and oxygen oxidization on the catalyzer located in the lower part of the enclosure (hollow metal tube) and on the natural draft occurring to intensify hydrogen conversion process. Metals from the platinum group deposited on metal plates, ceramic rods, and high-porosity foamed structures are used as catalyzers [1, 2].

PCHR is mainly characterized by high efficiency expressed by the amount of oxidized hydrogen (extracted from the atmosphere) per unit of time depending on the medium parameters: pressure, temperature, gas composition, etc. Another important feature is the initial concentration of hydrogen required to induce PCHR start-up. The main shortcoming of this device is conditioned by the hydrogen concentration limit that can induce the ignition of the mixture surrounding the recombiner. In the case of a heavy accident at a nuclear power plant this phenomenon constitutes a danger for the integrity of the reactor protective containment.

The safest appropriate recombiner type is sought based on the characteristic values; NPP designers use PCHR parameters for design-basis justification of hydrogen explosive safety. To ensure safety, the manufacturer's specifications for a PCHR should be definitely verified and justified using certified equipment and validated testing procedures.

In 2018, RFNC – VNIITF engineers developed and certified the first testing procedures developed in Russia to determine PCHR characteristics. They established the criteria to detect certain phenomena occurring during PCHR operation. Since such phenomena are not defined in regulatory documents, the basic notions were

formulated and defined more precisely to describe physical and chemical processes occurring in PCHR and express their interrelation.

The experimental setup and testing mode similar to the possible conditions of heavy NPP accidents permitted to reveal peculiar features of PCHR operation which were not observed beforehand. For example, ignition of hydrogen-containing vapor-gas mixture can be induced not only when it is in contact with the hot catalyzer inside PCHR enclosure but also by the release of a particle formed during the spallation of catalyzer surface into the atmosphere surrounding the recombiner. This results in reducing the limit of flame-free PCHR operation while incidental nature of particle spallation process leads to the uncertainty of the limit value.

It seems important to continue testing of the recombiners currently used in Russian NPP to precise their characteristics and to carry out their comparative analysis. Also, one should perform the experiments using the mixture containing carbon monoxide which can be produced during the concrete melting and deprived of oxygen (similar experiments have not been conducted in Russia before). The results obtained can be applied to verify process and device models, and to validate CFD codes. It is reasonable to improve testing procedures, increase measurement technique accuracy and recondition the test bed. The totality of the above works will enable to qualitatively improve safety and security of Russian NPP.

References

1. S. Gupta, T. Kanzleiter, G. Poss, Passive Autocatalytic Recombiners (PAR) Induced Ignition and the Resulting Hydrogen Deflagration Behavior in LWR Containment, The 16th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-16), At Hyatt Regency Chicago. – Chicago, IL, USA, 2015.
2. S. V. Anpilov, D. G. Grigoruk, P. S. Kondratenko et al., Mathematical Simulation of Heat and Mass Exchange in Hydrogen Passive Catalytic Recombiner, Heat Power Engineering, 2013, #11, pp. 48–51.

5-4

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНСМУТАЦИИ МИНОРНЫХ АКТИНИДОВ В ЖИДКОСОЛЕВОМ РЕАКТОРЕ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

М. Н. Белоногов, И. А. Волков, Д. Г. Модестов,
В. А. Симоненко, Д. В. Хмельницкий

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

E-mail: m.n.belonogov@vniitf.ru

Основной вклад в долговременную радиационную активность и энерговыделение отработавшего ядерного топлива наиболее распространенных легководных реакторов вносят минорные актиниды (МА) – Np,

Am, Cm (~0,1%). Утилизация МА является одной из основных проблем, которые ставят под вопрос дальнейшее развитие ядерной энергетики. В настоящее время в России широко обсуждается возможность трансмутации МА в специализированных установках – жидкосолевых реакторах-дожигателях (ЖСР-дожигатель) [1, 2].

Для расчетного исследования основных закономерностей трансмутации МА в активной зоне (а.з.) ЖСР, связанных с процессами переноса нейтронов и кинетикой нуклидного состава, была выбрана идеализированная сферическая модельная система зеркальными граничными условиями и сформулированы основные требования к реактору-дожигателю:

- высокая эффективность трансмутации МА, под которой понимается масса перешедших в продукты деления (ПД) ядер МА и их производных на единицу выделившейся в реакторе энергии;
- отсутствие накопления актинидов, в первую очередь изотопов плутония, во внешней части топливного цикла реактора в процессе его эксплуатации;
- минимизация, а в идеале отсутствие потребления ^{235}U и Pu как основного топлива энергетических реакторов;
- устойчивость к возможным вариациям состава топливной композиции как в процессе кампании, так и при перегрузках. Это означает, что изменение реактивности в процессе эксплуатации реактора должно быть минимальным с целью обеспечения необходимой эффективности органов управления реактивностью.

Для выбранной модельной системы с использованием программного комплекса ПРИЗМА+РИСК [3, 4] выполнены расчеты нейтронно-физических характеристик и эволюции нуклидного состава топливной композиции для вариантов, различающихся концентрацией актинидов в а.з., видом солевого носителя, удельной мощностью энерговыделения, режимами переработки топливной композиции и т.д.

По результатам расчетов определен диапазон возможного содержания солей актинидов в топливной композиции (3...8%, мол.), обеспечивающего:

- работу реактора в равновесном режиме трансмутации, при котором обеспечивается постоянство нуклидного состава актинидов на конец каждой кампании,
- извлечение из топливной композиции только ПД на всей стадии эксплуатации реактора,
- высокую эффективность трансмутации МА (150–300 кг МА за 300 эф. сут. при мощности энерговыделения 1 ГВт),
- устойчивость системы, выражающаяся слабым влиянием на ее реактивность вида солевого носителя, состава загружаемых МА и частоты переработки топливной композиции при фиксированном годовом объеме переработки топлива.

Была показана принципиальная возможность создания ЖСР-дожигателя МА без накопления актинидов во внешнем топливном цикле реактора. Причем при использовании солевого носителя с содержанием в нем солей актинидов ~8%, мол. может быть реализован

режим работы с добавлением только МА, т. е. с максимально возможной эффективностью трансмутации.

Литература

1. Дегтярёв А. М., Мясников А. А., Коляскин О. Е., и др., Жидко-солевой подкритический реактор-сжигатель транс-плутониевых изотопов // Атомная энергия. – 2013. – Т. 114. – Вып. 4. – С. 225–232.
2. Ignatiev, V., Feynberg, O., et al. Molten salt actinide recycler and transforming system without and with Th-U support: Fuel cycle flexibility and key material properties // Annals of Nuclear Energy, 2014, Vol. 64, p. 408–420.
3. Кандиев Я. З. Оценка эффектов малых возмущений в многовариантных расчетах по программе ПРИЗМА-Д // Атомная энергия. – 2005. – Т. 99. – Вып. 3, С. 203 – 210.
4. Модестов Д.Г. Программа решения задач ядерной кинетики РИСК-2014 // Препринт РФЯЦ – ВНИИТФ № 243. – 2014.

CALCULATIONS OF MINOR ACTINIDE TRANSMUTATION IN MOLTEN SALT REACTOR BASED ON MODEL SYSTEM

M. N. Belonogov, I. A. Volkov, D. G. Modestov,
V. A. Simonenko, D. V. Khmel'nitsky

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

E-mail: m.n.belonogov@vniitf.ru

Minor actinides (MAs) such as Np, Am, and Cm (~0,1%) are essentially responsible for the long-term radiation activity and energy deposition of spent nuclear fuel from most commonly used light-water reactors. MA recycling refers to one of the key challenges facing further development of nuclear power engineering. Currently, Russian scientists consider the opportunity of MA transmutation in specific facilities named molten salt recyclers (MSR) [1, 2].

The idealized spherical model system with mirror boundary conditions was chosen for calculation of MA transmutation pattern in MSR active core related to the neutron transport processes and nuclide composition kinetics. The main requirements to the recycler were also formulated including:

- high-efficiency of MA transmutation which implies the mass of MA nuclei and their derivatives turned into fission products per unit of energy deposited in the reactor;
- unavailability of actinides including plutonium isotopes accumulated in the external part of the reactor fuel cycle during its operation;
- minimal consumption of ^{235}U and Pu as the main fuel for energy reactors, the total lack of ^{235}U and Pu consumption being treated as the ideal case; and
- resistance to the possible variations in fuel composition both during active core life and overloads. This means that the change in reactivity during the reactor operation should be minimal to provide for the efficient operation of reactivity control tools.

Calculations of neutron physical characteristics and evolution of fuel nuclide composition were performed

for the given model system using “PRIZMA+RISK” program pack [3, 4]. We considered various scenarios differing by concentrations of actinides in the reactor core, salt carrier types, specific capacity of energy deposition, fuel composition recycling modes, etc.

The calculation results were used to determine the range of possible actinide salt concentrations in fuel composition (3...8%, mol) which enables:

- the reactor to operate in equilibrium transmutation mode characterized by the constant nuclide composition of actinides at the end of each core life,
- extraction of only fission products from the fuel composition during the whole reactor operation stage,
- high efficiency of MA transmutation (150–300 kg of MAs per 300 effective days at the energy deposition of 1 GW), and
- system stability which is expressed by slight effects of salt carrier type, composition of loaded MAs, and periodicity of fuel composition recycling on its reactivity at fixed annular volume of fuel recycling.

The work proved the feasibility of creating MA MSR characterized by the lack of actinide accumulation in the external nuclear fuel cycle. Moreover, when using salt carrier with 8% mol actinide concentration it is possible to implement operation mode involving the addition of only minor actinides i.e. providing for the maximum possible transmutation efficiency.

References

1. A. M. Degtyaryov, A. A. Myasnikov, O. E. Kolyaskin and al., Molten Salt Subcritical Transplutonium Isotope Recycler, “Atomic Energy”, 2013, vol. 114, issue 4, pp. 225–232.
2. V. Ignatiev, O. Feynberg et al., Molten Salt Actinide Recycler and Transforming System Without and With Th-U Support: Fuel Cycle Flexibility and Key Material Properties, Annals of Nuclear Energy, 2014, vol. 64, pp. 408–420.
3. Ya. Z. Kandiev, Evaluation of Small-Amplitude Perturbations in Multipath Calculations using “PRIZMA-D” Code, Atomic Energy, 2005, vol. 99, issue 3, pp. 203–210.
4. D. G. Modestov, RISK-2014 – Code for Nuclear Kinetics Problems, RFNC – VNIITF Preprint #243, 2014.

5-5

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПЕЧИ СПЕКАНИЯ МОДУЛЯ ФАБРИКАЦИИ НИТРИДНОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Е. А. Белоногова, А. А. Бочкарева,
И. Р. Макеева, У. Ф. Шереметьева

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

E-mail; e.a.belonogova@vniitf.ru

В настоящее время одной из актуальных задач моделирования технологических процессов на производствах является обоснование их безопасности. Для обоснования безопасности технологических

процессов замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) в РФЯЦ – ВНИИТФ в рамках проектного направления «Прорыв» разрабатывается теплофизическая модель печи спекания, которая будет использоваться на модуле фабрикации ядерного топлива опытно-демонстрационного энергетического комплекса (ОДЭК).

Непрерывно действующая проходная печь спекания толкательного типа предназначена для спекания топливных таблеток из смеси нитридов урана и плутония. Спрессованные топливные таблетки насыпаются в лодочки, перемещающиеся по установке на специальных подложках. В зонах предварительного нагрева и охлаждения осуществляется нагрев и охлаждение лодочек в потоке аргона. Процесс спекания проводится в потоке смеси газов $N_2 + 7\%H_2$.

Необходимым условием для проведения процесса спекания является высокая температура и среда, способствующая спеканию. Поэтому для обоснования безопасности проведения данного процесса в печи необходимо определить предельно допустимые параметры работы основного и вспомогательного оборудования, оценить давления и температуры во всем объеме аппарата и защитных боксах с учетом тепловыделения, обусловленного распадами ядер нестабильных изотопов, и возможных нештатных ситуаций, вызванных нарушениями технологических режимов.

К настоящему времени разработана модель высокотемпературной зоны печи спекания при помощи средств свободно распространяемого программного комплекса OpenFoam [1]. В модели принято допущение о мгновенном нагреве газа и учтено энерговыделение ядерного топлива, обусловленное распадами ядер нестабильных изотопов. Также в работе реализована геометрическая модель полной конструкции печи спекания с учетом ее температурных зон и теплоизоляции, проведены предварительные расчеты.

В докладе представлены результаты теплофизических и газодинамических расчетов, включающие распределение температуры в слоях теплоизоляции и лодочках, а также поля температуры, скорости и плотности технологического газа. Разработанную модель печи спекания предполагается использовать для оценки безопасности процесса спекания.

Литература

1. OpenFOAM User Guide // <http://cfd.direct/openfoam/user-guide/>

DEVELOPMENT OF SINTERING FURNACE MODEL FOR THE NITRIDE NUCLEAR FUEL FABRICATION MODULE

E. A. Belonogova, A. A. Bochkareva,
I. R. Makeeva, U. F. Sheremetyeva

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

E-mail; e.a.belonogova@vniitf.ru

Currently, one of the urgent problems concerning the modeling of technological processes at manufacturing sites resides in justification of these processes safety. To substantiate the safety of technological processes of closed nuclear fuel cycle, VNIITF has been developing a thermophysical sintering furnace model within the “Pro-ryv” project, which will be used in the nuclear fuel fabrication module of the pilot demonstration energy complex (PDEC).

Continuously operating pusher-type sintering furnace is designed to sinter the fuel pellets made of the mixture of uranium and plutonium nitrides. Pressed fuel pellets are placed into boats transported through the furnace on special supports. In the pre-heating and cooling zones, the boats are heated and cooled in an argon flow. The sintering process is carried out in the flow of mixed gases ($N_2 + 7\% H_2$).

The sintering process requires high temperatures and special environment conducive to this process. Therefore, to justify the safety of sintering in furnace, one should determine the maximum permissible parameters of main and auxiliary equipment performance, as well as estimate the pressures and temperatures throughout the furnace and protective boxes while taking into account both the heat generated due to the decay of unstable isotopes and the potential emergency situations caused by the violation of technological conditions.

This study is aimed to realize the geometrical model of the entire sintering furnace, which takes into account the furnace temperature zones and thermal insulation. Up to date, the model of high-temperature zone of this furnace has been developed by means of the freeware OpenFoam software package [1]. This model assumes the instantaneous gas heating and considers the nuclear-fuel energy release conditioned by isotope decay. Preliminary calculations have also been performed.

This report gives the results of thermophysical and gas-dynamic calculations including the temperature distribution in the insulation layers and the boats, as well as the temperature profiles, velocities, and densities of the process gas. The developed sintering furnace model is supposed to be used for assessing the safety of sintering process.

References

1. OpenFOAM User Guide // <http://cfd.direct/openfoam/user-guide/>

5-6

СИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ УСТРОЙСТВ, СОДЕРЖАЩИХ ДЕЛЯЩИЕСЯ И ВЗРЫВЧАТЫЕ МАТЕРИАЛЫ

И. И. Костенко, А. А. Юдов, С. С. Бесов,
Ю. А. Соколов, С. Ю. Касьянов

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

В РФЯЦ – ВНИИТФ был разработан и прошел тестовые испытания экспериментальный образец измерительной системы, предназначенный для измерения характеристик систем, содержащих плутоний, уран и взрывчатое вещество (ВВ).

В данном докладе представлена разработанная измерительная система, которая объединяет в себе как пассивные, так и активные методики неразрушающего контроля делящихся материалов, реализованные в измерительной системе на основе последних технических разработок с использованием коммерческого высокоэффективного измерительного оборудования.

Основными достоинствами системы является ее универсальность и простота управления. Все измеряемые характеристики разделены на три группы: плутоний, уран, ВВ. Процедуры измерения характеристик каждого материала запускаются отдельно. В системе реализовано представление информации об измеренных характеристиках в простой индикаторной форме «Да»/«Нет». Измеренная величина сравнивается с заранее установленным в системе пороговым значением и выдается ответ о превышении или не превышении порога посредством зажигания соответствующих зеленых или красных лампочек.

IDENTIFICATION SYSTEM FOR THE DEVICES CONTAINING FISSILE AND EXPLOSIVE MATERIALS

I. I. Kostenko, A. A. Yudov, S. S. Besov,
Yu. A. Sokolov, S. Yu. Kas'yanov

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

RFNC – VNIITF developed and tested experimental pattern of measuring system, which is suitable for measuring characteristics of the systems containing plutonium, uranium and high explosive (HE).

This work presents a measuring system, which unites both passive and active techniques of nondestructive control of fissile materials that were realized in a measuring system on the basis of recent technical developments using commercial high-effective measuring equipment.

The main advantages of the system are its versatility and simplicity of operation. All measured characteristics are divided into three groups: plutonium, uranium and HE. The procedures of measuring characteristics of each material are initiated separately. The system realized presentation of data about measured characteristics in simple indicator form “yes”/“no”. Measured value is compared with threshold value, which is set earlier in the system and there is a response about exceeding the threshold or about not exceeding the threshold with the help of corresponding green or red lights.

5-7

РАЗРАБОТКА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПЯТЦ

А. А. Бочкарева, И. Р. Макеева, У. Ф. Шереметьева,
Е. А. Белоногова, И. В. Пешкичев

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

E-mail: a.a.bochkareva@vniitf.ru

В рамках работ по проектному направлению «ПРОРЫВ» в РФЯЦ – ВНИИТФ проводится разработка гидродинамических и теплофизических моделей с целью обоснования безопасности технологических процессов замыкания ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) [1].

Одними из важнейших стадий в цикле радиохимической переработки отработанного ядерного топлива являются стадии растворения, осветления исходных растворов и экстракции компонентов.

Аппарат растворения представляет собой емкость с многофазной многокомпонентной смесью, состоящей из дисперсной фазы (порошка оксидов) и сплошной фазы (раствора азотной кислоты) [2]. На процесс растворения в аппарате влияет движение частиц, перемешивание раствора, теплообмен между дисперсной и сплошной фазой, выделение энергии, обусловленной протеканием химической реакции.

В процессе осветления под действием приложенного давления, растворитель и молекулы растворенных веществ проникают через мембрану, при этом другие молекулы или частицы задерживаются. Выделение энергии в процессе осветления обусловлено ядерными распадами, протеканием химических реакций, трением дисперсной фазы и столкновением частиц [3].

В центробежном экстракторе водный раствор и несмешиваемый растворитель подаются в камеру смешения. В результате химических реакций происходящих при контакте двух фаз происходит массообмен между фазами. Под действием центробежных сил и разности плотностей происходит разделение потока на легкую и тяжелую фазы [4].

Для разработки теплофизических и гидродинамических моделей выбран свободно распространяемый программный пакет OpenFOAM [5].

В результате работы разработаны теплофизические модели аппарата растворения и осветления и гидродинамическая модель экстракции. Проведенные тестовые расчеты показали, что модели адекватно описывают распределение температур, концентраций и скоростей в аппаратах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-01-00873

Литература

1. Адамов Е. О., Алексахин Р. М., Большов Л. А., Дедуль А. В., Орлов В. В., Першуков В. А., Рачков В. И., Толстоухов Д. А., Троянов В. М. Проект «ПРОРЫВ» – технологический фундамент для крупномасштабной ядерной энергетики // Известия РАН. Энергетика, № 1, 2015. – с. 5–12.
2. Marc P., Magnaldo A., Vaudano A., Delahaye T., Schaer É. Dissolution of uranium dioxide in nitric acid media: what do we know? – EPJ Nuclear Sci. Technol. 3, 13, 2017.
3. Дытнерский Ю.И., Обратный осмос и ультрафильтрация, 1978
4. http://www.rousselet-robotel.com/brochures/Monostage_centrifugal_contactors_BXP_Eng.pdf, 13.10.17.
5. [Электронный ресурс]. – <http://www.OpenFOAM.org>.

**THERMOPHYSICAL AND HYDRODYNAMIC
MODELS DEVELOPMENT
OF STATION NUCLEAR FUEL CYCLE
TECHNOLOGY PROCESSES**

A. A. Bochkareva, I. R. Makeeva, U. F. Sheremetyeva,
E. A. Belonogova, I. V. Peshkichev

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

To substantiate safety of technology processes connected with closed nuclear fuel cycle thermal physics and hydrodynamics models are developing in the RFNC – VNIITF within the scope of “Proryv” project [1].

Dissolution, input solutions clarification and components extraction are ones of the most important stages in nuclear fuel recycling process.

Dissolution apparatus is a reservoir with multiphase multicomponent mixture consisted of dispersed phase (oxide powder) and continuous phase (nitric acid solution) [3]. Dissolution process depending on the particles motion, solution blending, dispersed and continuous phase heat exchange and energy release due to chemical reaction occurs.

Solvent and dissolved component molecules under applied pressure penetrate through membrane and other molecules and particles are inhibited during clarification process. Energy release during clarification process produced by nuclear decays, chemical reaction occurring, dispersed phase friction and particles collisions [4].

Aqueous solution and immiscible solvent are supplied in mixing chamber of centrifugal extractor.

Two phase mass transfer occurred in the result of chemical reactions taking place in the time of two phases contacted.

Flow is separated on light and heavy phases under the centrifugal force and density difference [5].

Open source CFD toolbox OpenFOAM was chosen for the developing of thermalphysic and hydrodynamic models [6].

Hydrodynamic model of extraction and thermalphysic models of dissolution and clarification was developed in the result of study. Test computations indicate that devel-

oped models adequate describe temperature, concentration and velocity distributions in apparatus.

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 170100873

References

1. Adamov E. O., Aleksahin R. M., Bolshov L. A., Dedul A. V., Orlov V. V., Pershukov V. A., Rachkov V. I., Tolstouchov D. A., Troyanov V.M. Project «PRORYV» – technological fundament for large-scale nuclear power engineering // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energetics, № 1, 2015. – p. 5–12.
2. Marc P., Magnaldo A., Vaudano A., Delahaye T., Schaer É. Dissolution of uranium dioxide in nitric acid media: what do we know? – EPJ Nuclear Sci. Technol. 3, 13, 2017.
3. Dytnerskiy Yu. I., Reverse osmosis and ultrafiltration, 1978
4. http://www.rousselet-robotel.com/brochures/Monostage_centrifugal_contactors_BXP_Eng.pdf, 13.10.17.
5. [Online resource]. – <http://www.OpenFOAM.org>.

5-8

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕННОГО
И ЭЛЕКТРОННОГО АМПЛИТУДНОГО
РАЗРЕШЕНИЯ ГАММА ДЕТЕКТОРОВ
НА ОСНОВЕ LYSO СЦИНТИЛЛЯТОРОВ
ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УСТАНОВКАХ
ОБНАРУЖЕНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ,
ЯДЕРНЫХ ДЕЛЯЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ
И РАБОТАЮЩИХ ПО МЕТОДУ
МЕЧЕНОГО НЕЙТРОНА**

И. Г. Вавилова¹, В. А. Соловей¹,
А. С. Федорова¹, Ю. К. Колобов²

¹ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики
им. Б. П. Константинова национального
исследовательского центра “Курчатовский институт”»,
Санкт-Петербург, Россия

²ОАО «Научно-технический центр “РАТЭК”»,
Санкт-Петербург, Россия

Использование 12 разрядного дигитайзера работающего на частоте дискретизации 1 ГГц при соотношении сигнал/шум 40дБ или частоте дискретизации 5 ГГц при соотношении сигнал/шум 30дБ позволит достичь временного разрешения FWHM порядка 50 пс или 80 пс соответственно. Электронное амплитудное разрешение FWHM в любом случае составит лучше 1%. Моделирование производилось при использовании LYSO сцинтиллятора в качестве гамма детектора. Моделирование производилось в пакете программ математической обработки MatLab.

**SIMULATION OF THE TIME
AND ELECTRONICS AMPLITUDE RESOLUTION
GAMMA DETECTORS BASED
ON LYSO SCINTILLATORS
FOR USE IN SYSTEMS FOR THE DETECTION
OF EXPLOSIVES, NUCLEAR FISSILE
MATERIALS AND OPERATING
BY THE TAGGED NEUTRON METHOD**

I. G. Vavilova¹, V. A. Solovei¹,
A. S. Fedorova¹, Yu. K. Kolobov²

¹PNPI NRC KI, Saint-Petersburg, Russia
²Inc. "STC "RATEC", Saint-Petersburg, Russia

Using a 12-bit digitizer running at 1GHz with a signal or noise 40 dB at 5 GHz signal to noise ratio of 30 dB will achieve temporal resolution FWHM of the order of 50 ps and 80 ps, respectively. Electronic amplitude resolution FWHM in any case be less than 1%. Modeling was performed by use of LYSO scintillator as gamma detector. Modeling was made in mathematical computing software MatLab.

5-9

**ПРОБЛЕМЫ ТРАНСМУТАЦИИ
МИНОРНЫХ АКТИНИДОВ
В ЖИДКОСОЛЕВЫХ РЕАКТОРАХ**

М. Н. Белоногов, И. А. Волков, Д. Г. Модестов,
В. А. Симоненко, Д. В. Хмельницкий

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

E-mail: i.a.volkov@vniitf.ru

По оценкам МАГАТЭ [1], к 2013 году в мире накоплено ~370 тыс. тонн отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), в котором содержится более 300 тонн минорных актинидов (Np, Am, Cm – МА). Периоды полураспада некоторых изотопов МА составляют тысячи и миллионы лет, и при длительном хранении они будут вносить основной вклад в радиационную активность и энерговыделение радиоактивных отходов (РАО). Для снижения радиационной опасности направляемых на захоронение РАО рассматривается извлечение минорных актинидов из ОЯТ и их трансмутация в ядерных энергетических установках.

Мировые подходы к трансмутации минорных актинидов заключаются в исследовании как критических (реакторных) систем, так и подкритических систем с ускорителем. Большая часть из них предполагает изготовление топливных таблеток, что является технологически сложной задачей. Перспективными кандидатами на роль реакторов-сжигателей МА являются жидкосольевые реакторы (ЖСР), поскольку они не требуют изготовления топливных таблеток из высокоактивных МА.

В настоящее время работы по созданию ЖСР включены в программу GENERATION IV [2], также ведут-

ся отдельные исследовательские работы во Франции, Японии, Индии, США, Китае [2, 3, 4]. В большинстве этих программ планируется создание Th-U жидкосольевого реактора с тепловым спектром на основе опыта, полученного при эксплуатации реактора MSRE. В России исследуются различные солевые носители, которые могут быть использованы в ЖСР. Особого внимания заслуживает соль FLiNaK молярного состава, %: 46,5LiF-11,5NaF-42K со сравнительно высокой растворимостью актинидов [5]. Ведутся работы по проекту расплавно-солевого реактора MOSART [6] с промежуточным спектром нейтронов на основе солей FLiBe и FLiBeNa с составом 73LiF-27BeF₂ и 15LiF-58NaF-27BeF₂, мол. % соответственно.

В настоящее время основные усилия исследований направлены на поиск научно обоснованного решения по реализации трансмутации минорных актинидов в расплавно-солевом реакторе. Для разработки и создания расплавно-солевого реактора-дожигателя минорных актинидов и технологии замыкания его топливного цикла необходимо проведение комплексных расчетно-теоретических и экспериментальных исследований.

Литература

1. Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.14. – Vienna : International Atomic Energy Agency, 2018.
2. Generation IV International Forum. Annual report 2008. – Paris: OECD Nuclear Energy Agency, 2008.
3. Molten-Salt Reactor Program Semiannual Progress Report. – Oak Ridge National Laboratory, ORNL-3529, 1963.
4. Chengang Yu, Xiaoxiao Li, Xiangzhou Cai, et al. Minor actinide incineration and Th-U breeding in a small FLiNaK Molten Salt Fast Reactor, Ann. Nucl. Energy, 2017, v. 99, p. 335–344.
5. Дегтярёв А. М., Пономарёв Л. И. Быстрый жидко-солевой реактор на основе LiF-NaF-KF, АЭ, 112(6), (2012).
6. Advanced Reactor Technology Options for Utilization and Transmutation of Actinides in Spent Nuclear Fuel. TECDOC-1626. – Vienna, IAEA, 2009.

**PROBLEMS OF TRASMUTATION
OF MINOR ACTINIDES
IN MOLTEN-SALT REACTORS**

М. Н. Белоногов, И. А. Волков, Д. Г. Модестов,
В. А. Симоненко, Д. В. Хмельницкий

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

E-mail: i.a.volkov@vniitf.ru

According to IAEA assessments [1], by 2013, about 370 thousand tons of spent nuclear fuel (SNF) were accumulated. This fuel contains more than 300 tons of minor actinides (Np, Am, Cm). Half-life of some minor actinides (MA) isotopes makes thousands and millions of years, and with long-term storage, they will do the main contribution into radiation activity and energy release of radioactive wastes (RW). In order to decrease radiation danger of RW directed for disposal, one considers

the possibility for extraction of MA from SNF and their transmutation in nuclear energetic facilities.

Global approaches to MA transmutation consist of investigation of both critical (reactor) systems, and subcritical systems with accelerator. The majority of them suppose fabrication of fuel pellets that is technologically complicated task. Promising candidates for MA reactor-burner are molten-salt reactors (MSR), because they do not require fabricating fuel pellets out of high active MA.

Currently, the work on creating MSR are included into a program GENERATION IV [2], separate activities are going in France, Japan, India, USA and China [2, 3, 4]. Majority of these programs are planning building of Th-U molten-salt reactor with thermal spectrum based on experience obtained under the reactor MSRE. Russian specialists are investigating various salt carriers, which can be used in MSR. Special attention is paid to a salt FLiNaK with molar composition, %: 46,5LiF-11,5NaF-42K with relatively high actinide solubility [5]. The work in under way on the project of molten-salt reactor MOSART [6] with intermediate neutron spectrum based on salts FLiBe and FLiBeNa, consisting of ^{73}LiF - $^{27}\text{BeF}_2$ and ^{15}LiF - ^{58}NaF - $^{27}\text{BeF}_2$, mole % respectively.

Today, the main efforts of investigations are directed to searching for scientifically substantiated solution on realizing transmutation of MA in molten-salt reactor. For the development and building molten-salt reactor-afterburner of minor actinides and the technology of its fuel cycle closure, it is necessary to conduct complex calculation-theoretical and experimental studies.

References

1. Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.14. – Vienna : International Atomic Energy Agency, 2018.
2. Generation IV International Forum. Annual report 2008. – Paris: OECD Nuclear Energy Agency, 2008.
3. Molten-Salt Reactor Program Semiannual Progress Report. – Oak Ridge National Laboratory, ORNL-3529, 1963.
4. Chengang Yu, Xiaoxiao Li, XiangzhouCai, et al. Minor actinide incineration and Th-U breeding in a small FLiNaK Molten Salt Fast Reactor, Ann. Nucl. Energy, 2017, v. 99, p. 335–344.
5. A. M. Degtyarev, L. I. Ponomarev. Fast molten-salt reactor based on LiF-NaF-KF, AE, 112(6), (2012).
6. Advanced Reactor Technology Options for Utilization and Transmutation of Actinides in Spent Nuclear Fuel. TECDOC-1626. – Vienna, IAEA, 2009.

5-10

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ С ПОЗИЦИЙ НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕЛЯЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ

Н. Д. Дырда, У. Ф. Шереметьева,
И. Р. Макеева, В. А. Симоненко

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

E-mail: n.d.dyrda@vniitf.ru

При разработке стратегии развития ядерной энергетики России определяющими факторами являются удовлетворение прогнозной потребности в электроэнергии и наличие достаточной сырьевой базы для дальнейшего развития.

В случае открытого ядерного топливного цикла (ЯТЦ) основным сырьем является природный уран. Запасы отечественного природного урана на 2018 год оцениваются на уровне ~500 тыс. тонн. Такого количества урана хватит для достижения установленной электрической мощности ~54 ГВт в 2070 году. Для обеспечения потребностей работающих реакторов топлива хватит до ~2130 года. К моменту вывода всех реакторов из эксплуатации в хранилищах будет накоплено ~80 тыс. тонн отработанного ядерного топлива (ОЯТ), содержащего плутоний и минорные актиниды.

Для обеспечения конкурентоспособности ядерной энергетики на внутреннем и внешнем рынках, в том числе, требуется снизить ресурсную зависимость от запасов природного урана и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду в долгосрочной перспективе (количество ОЯТ, находящихся в хранилищах). Снизить ресурсную зависимость возможно путем перехода на MOX-топливо, а также ввода наряду с реакторами на тепловых нейтронах, реакторов с быстрым спектром нейтронов и повышенным коэффициентом воспроизводства топлива ($K_B \geq 1,1$), одновременно с замыканием ЯТЦ.

При таком подходе возможно достичь установленной электрической мощности ~70 ГВт к 2100 году и существенной экономии природного урана (потреблено ~150 тыс. тонн к 2100 году). Также это позволит существенно сократить объем ОЯТ на хранении (~2 тыс. тонн). В то же время, дополнительным опасным фактором является вовлечение в замкнутый ЯТЦ большого количества плутония различного изотопного состава.

В докладе рассматриваются характерные сценарии развития ядерной энергетики и приводится их сравнение с позиций нераспространения делящихся материалов и технологий обращения с ними.

**INVESTIGATION OF VARIOUS SCENARIOS
FOR THE DEVELOPMENT
OF RF NUCLEAR POWER ENGINEERING
FROM FISSILE MATERIAL
NONPROLIFERATION PERSPECTIVE**

N. D. Dyrda, U. F. Sheremetyeva,
I. R. Makeeva, V. A. Simonenko

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

E-mail: n.d.dyrda@vniitf.ru

While developing the strategy of RF nuclear power engineering development, governing factors are: meeting demands in electrical energy and the presence of sufficient raw-material base for the further progress.

In case of open nuclear fuel cycle (NFC), the main raw material is natural uranium. Natural uranium stocks in terms of year 2018, are estimated at the level of about 500 thousand tons. It is enough for achieving electrical power of about 54 GW in 2070. For providing the demands of operating reactors, we have enough fuel up to 2130. By the moment of decommissioning of all reactors in the storages, about 80 thousand tons of SNF will be accumulated. This fuel contains plutonium and minor actinides.

For providing competitiveness of nuclear power engineering at internal and external markets, it is necessary to decrease resource dependence on natural uranium stocks and to diminish negative impact on environment in long-term perspective (SNF amount that is in storages). Decreasing resource dependence can be made by switching to MOX-fuel, and by putting into operation the reactors with fast neutron spectrum and enhanced breeding ratio ($BR \geq 1,1$), at the same time with NFC closure.

With this approach, it is possible to achieve electrical power about 70 GW by 2100 and sufficient saving of natural uranium (consumption was about 150 thousand tons by 2100). This will also permit to sufficiently decrease SNF amount in storages (about 2 thousand tons). At the same time, additional dangerous factor is involvement of great amount of plutonium with various isotopic compositions into closed NFC.

The work presents the typical scenarios of nuclear power engineering development and describes their comparison from perspective of nonproliferation of fissile materials and technologies of their handling.

В данной работе методом молекулярной динамики решается часть глобальной задачи по электролитическому восстановлению ОЯТ. Исследуется катодный процесс, приводящий к восстановлению UO_2 до металлического урана. Расчеты выполнены в NPT ансамбле, количество атомов урана для всех систем одинаково ($N_U = 4000$). Взаимодействия атомов в модели описывались потенциалом COMB. За время расчета 110–130 пс обеспечивалось уравнивание зарядов на каждом временном шаге.

Детальная структура нестехиометрических фаз UO_{2-x} была проанализирована методом статистической геометрии. Структурные изменения в UO_{2-x} при последовательном увеличении x , т. е. при все большем изъятии кислорода из соединения, указывают на присутствие кристаллического состояния даже при очень низких концентрациях кислорода. Структура анализировалась с помощью построения многогранников Вороного (МВ) для атомов U. Распределения МВ по числу граней и граней по числу сторон не сильно изменяют свою форму даже при очень низких концентрациях атомов кислорода. Исключение мелких геометрических элементов в МВ, т. е. переход к усеченным многогранникам, позволил выявить доминирование четырех атомной координации во взаимном размещении атомов U. В целом для каждого состава соединения UO_{2-x} получены похожие распределения граней по числу сторон с преобладанием в них треугольных граней. При уменьшении концентрации кислорода наблюдается стабилизация распределения расстояний между ближайшими атомами U, начиная с соединения $UO_{1,5}$. Таким образом, после удаления кислорода из соединения UO_{2-x} при 923 К система не переходит в аморфное состояние ни при каком значении концентрации O.

Также, было исследовано поведение упругих постоянных C_{11} , C_{12} , C_{44} для различных фаз UO_{2-x} в приближении сохранения кубической формы и структуры для исходных нестехиометрических фаз и для металлического α -урана. Резкое уменьшение исследуемых модулей упругости начинается уже при $x = 0,25$, т. е. при выходе из соединения UO_2 1/8 части кислорода. Однако критерии механической устойчивости продолжают предсказывать наличие незначительной устойчивости кристалла UO_{2-x} даже при $x = 1,5$.

Работа выполнена при поддержке Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»: соглашение № 18 от 04.06.2018 г.

5-11

**МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ
ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ
И ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
НЕСТЕХЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФАЗ UO_{2-x}**

А. Е. Галашев, К. А. Иваничкина

Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

E-mail: ivanichkina@ihte.uran.ru

**MOLECULAR DYNAMIC STUDY
OF THE STRUCTURE AND PHYSICAL
PROPERTIES OF NONSTOICHIOMETRIC
PHASES UO_{2-x}**

A. Y. Galashev, K. A. Ivanichkina

Institute of High-Temperature Electrochemistry of the Ural
Branch of Russian Academy of Science, Yekaterinburg, Russia
E-mail: ivanichkina@ihte.uran.ru

In this paper, the task of the spent nuclear fuel electrolytic reduction as a part of a global problem is solved by the molecular dynamics method. The cathode process leading to the reduction of UO_2 to the metal uranium is investigated. The calculations are performed in the NPT ensemble, the number of uranium atoms for all systems is the same ($N_U = 4000$). The interactions of atoms in the model are described by the COMB potential. During the calculation of 110–130 ps, the charge balancing was provided at each time step.

The detailed structure of the nonstoichiometric phases UO_{2-x} was analyzed by the statistical geometry method. Structural changes in UO_{2-x} with a successive increase in x (when the number of removal oxygen from the compound increases) indicate the presence of a crystalline state even at very low oxygen concentrations. The structure was analyzed by constructing the Voronoi polyhedral (VP) for U atoms. The distribution of VP by the number of faces and faces by the number of sides change its shape insignificantly even at very low concentrations of oxygen atoms. The exception of small geometric elements in VP (the transition to truncated polyhedra) helps to reveal the dominance of four-atomic coordination in the relative arrangement of U atoms. In general, for each of UO_{2-x} compound, a similar distribution of faces by the number of sides was obtained with the predominate triangular faces. With a decrease in the oxygen concentration, a distances distribution stabilization between the nearest U atoms was observed starting with the compound $UO_{1.5}$. Thereby, after the oxygen removal from the compound UO_{2-x} at the temperature 923 K, the system does not turn into the amorphous state at any value of O concentration.

Besides, the behavior of the elastic constants C_{11} , C_{12} , C_{44} for different UO_{2-x} phases was studied in the approximation of cubic form and structure conservation for the initial non-stoichiometric phases and for metallic α -uranium. In the case when 1/8 of the oxygen leaving the UO_2 compound, a distinct decrease in the elastic constants under study starts (already at $x = 0.25$). However, the criteria of mechanical stability continue to predict the presence of insignificant stability of the UO_{2-x} crystal even at $x = 1.5$.

This work was supported by the State Atomic Energy Corporation «Rosatom»: Agreement No. 18 dated 04/06/2018.

5-12

**РАДИОНУКЛИДНЫЙ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗ
ПРИ КОНТРОЛЕ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ
И ИЗОТОПНЫХ ИСТОЧНИКОВ**

Н. В. Ивашкин

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

E-mail: n.v.ivashkin@vniitf.ru

Актуальность совершенствования технологий контроля производства и обращения ядерных материалов и изотопных источников обуславливается, в частности, усилением угрозы ядерного и радиологического терроризма в условиях развития ядерной электроэнергетики в развивающихся странах, появлением де-факто новых ядерных государств и развитием ядерной медицины во многих странах.

Цель контроля в общем виде усматривается в обеспечении ядерной, радиационной и экологической безопасности для персонала и населения, а также предотвращении распространения ядерного оружия.

В качестве составляющей технологий контроля рассматриваются системы радиационных мониторинговых измерений с целью обнаружения (поиска и идентификации) радионуклидных аномалий (РНА) – областей надфоновой и повышенной радиоактивности, обусловленных следовыми и массовыми количествами техногенных и природных радионуклидов, а также определения массовых (весовых) и изотопных характеристик ядерных материалов в подконтрольных установках, устройствах, образцах.

Эффективной формой контрольной деятельности усматривается режим инспекций на месте и вблизи подконтрольных объектов, а также прилегающих и удаленных территорий с применением методов и средств радионуклидного экспресс-анализа на месте наблюдений.

Радионуклидный экспресс-анализ характеризуется большей простотой, более низкой, стоимостью и высокой производительностью по сравнению с более сложными лабораторными методами с прецизионным оборудованием для анализа приготовленных препаратов проб. Экспресс-анализ основывается на применении специально разработанных для решения конкретных задач методов дистанционной гамма-спектрометрии, альфа-, гамма-спектрометрии и бета-радиометрии проб, радиометрии нейтронного излучения.

Рассматриваются характеристики различных видов современных детектирующих систем по чувствительности и избирательности, а также оцениваются их возможности с точки зрения обнаружения источников образования РНА с околороновыми уровнями радиоактивности.

Приводятся данные по изотопному составу контролируемых ядерных материалов и радиологически значимых источников, их радиационным характерис-

тикам и измерительным технологиям, используемым в ходе экспрессного анализа.

Представлены сферы применения и конкретные варианты реализации методов экспрессного радионуклидного анализа при контроле производства, применения и обращения ядерных материалов и радиологически значимых источников.

RADIONUCLIDE EXPRESS-ANALYSIS AT THE CONTROL OF NUCLEAR MATERIALS AND ISOTOPE SOURCES

N. V. Ivashkin

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

E-mail: n.v.ivashkin@vniitf.ru

Technologies used to control manufacture and circulation of both nuclear materials and isotope sources require improvement particularly because of escalated nuclear-and-radiological terrorism threat in the era of nuclear power engineering progress in developing countries, de facto formation of new nuclear states, and development of nuclear medicine in many countries. In general, this control is intended to ensure nuclear, radiation, and ecological safety of personnel and population, as well as to prevent proliferation of nuclear weapons.

As a constituent part, control technologies comprise monitoring systems of radiation measurements with the purpose to detect, i. e. to locate and identify radionuclide anomalies (areas with the above-background and enhanced radioactivity) induced by the trace and bulk quantities of anthropogenic and natural radionuclides, as well as to determine mass (weight) and isotopic characteristics of nuclear materials available in facilities, devices, and samples under control.

An effective form of control is the on-site inspection, as well as the off-site inspection that includes inspection of territories near objects under control and also adjacent and distant territories using methods and means of the radionuclide express-analysis as it is more simple, cost-effective and high-efficient compared to more complicated laboratory methods that require precision equipment for analyzing the prepared samples. Express-analysis uses dedicated methods of the remote gamma-ray spectrometry, as well as the alpha-, gamma-ray spectrometry and beta-radiometry of samples, and also radiometry of neutron radiation.

The paper reviews characteristics of various modern detecting systems with regard to their sensitivity and selectivity, and also estimates their capability to detect sources inducing radionuclide anomalies with near-background radioactivity levels.

The paper provides data on the isotopic composition of controlled nuclear materials and radiologically significant sources, data on their radiation characteristics and measurement technologies used during the express-analysis.

Fields of application and specific variants how radionuclide express-analysis can be implemented to control

manufacture, use, and circulation of nuclear materials and radiologically significant sources are presented.

5-13

О ВОЗМОЖНЫХ РАЗВИЛКАХ В РАЗВИТИИ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ КОМПЛЕКСА АТЭК

И. Р. Макеева, Н. Д. Дырда, У. Ф. Шереметьева,
С. В. Пчелинцева, Ю. Г. Сырцова

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

E-mail: i.r.makeyeva@vniitf.ru

Развитие ядерной энергетики в Российской Федерации должно сопровождаться выполнением ряда системных требований: гарантированной безопасности атомной генерации, промышленных объектов ядерного топливного цикла (ЯТЦ) и обращения с РАО, с минимальным экологическим воздействием на окружающую среду; возможности расширения рынков сбыта («неэлектрические» применения – теплоснабжение, опреснение воды, производство водорода и т. д.); отсутствия ограничений по сырьевой базе; гарантированной безопасности окончательной изоляции радиоактивных отходов. Кроме того, стратегическими целями Госкорпорации «Росатом» является расширение услуг на международном рынке, повышение экономической эффективности технологий и производств, развитие новых продуктов для российского и международного рынков.

Основой современной ядерной энергетики являются реакторы на тепловых нейтронах (РТН), использующие для производства энергии обогащенный уран и, в частных случаях, смешанное уран-плутониевое топливо. Развитие ядерной энергетики в Российской Федерации связывается с постепенным вводом в эксплуатацию реакторов на быстрых нейтронах (РБН), позволяющих наиболее полно использовать ресурсные возможности запасов уранового и в дальнейшем ториевого сырья. Оценки приемлемости и жизнеспособности альтернативных вариантов организации перспективной структуры ядерной энергетики в части как типов реакторных установок, так и организации замыкания ЯТЦ, является многопараметрической и многокритериальной задачей системного анализа. При этом необходимо учитывать как технико-технологические характеристики, так и экономические производств ЯТЦ.

В докладе анализируются результаты моделирования сценарных вариантов развития ЯЭ РФ с помощью программного комплекса АТЭК-ЯТЦ, основным назначением которого является моделирование ядерного энергетического комплекса, его подсистем и технологий ядерного топливного цикла. Рассматриваются различных вариантов внедрения РБН в структуру ядерной энергетики:

- постепенный ввод в эксплуатацию РБН различного типа с различным коэффициентом воспроизводства при поддерживающем вводе тепловых реакторов;
- переход на РБН после 2030 г.;
- производство топлива для РБН из различных источников делящихся материалов (рециклированное и природное сырье);
- влияние глубины выгорания на интегральные характеристики топливного цикла;
- пристанционная и централизованная организация топливного цикла.

Оцениваются ресурсные и производственные потребности, набор необходимых технологий и влияние ключевых технологических решений на ядерный топливный цикл в целом. Приводятся возможные критерии интегральных оценок развития ядерной энергетики.

Литература

1 Макеева И. Р., Симоненко В. А., Дырда Н. Д., Рыкунова А. А., Пчелинцева С. В. Задачи моделирования технологий ядерного топливного цикла. Платформа АТЭК // Сборник материалов XIII Международной конференции «Забабахинские научные чтения». – Снежинск, 2017. – С. 255.

ABOUT POSSIBLE DIRECTIONS IN THE DEVELOPMENT OF NUCLEAR POWER ENGINEERING. THE RESULTS OF MODELING WITH THE HELP OF COMPLEX ATEK

I. R. Makeyeva, N. D. Dyrda, U. F. Sheremetyeva,
S. V. Pchelintseva, Yu. G. Syrtsova

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia
E-mail: i.r.makeyeva@vniitf.ru

The development of nuclear power engineering in Russian Federation is to be accompanied by meeting several system requirements: guaranteed security of atomic generation, industrial sites of nuclear fuel cycle (NFC) and handling RW with minimum ecological impact on environment; the possibilities of expanding sales area (“nonelectrical applications” – heat supply, water distillation, hydrogen production); absence of limits on raw material base; guaranteed security of final isolation of radioactive wastes. Besides, strategic goals of State Atomic Energy Corporation “Rosatom” are: expanding the services at the international market, improving economic efficiency of technologies and productions, development of new products for Russian and international markets.

The foundation of up-to-date nuclear power engineering are reactors on thermal neutrons (RTN) that use enriched uranium for energy production and in partial cases, mixed uranium-plutonium fuel. The development of nuclear power engineering in Russian Federation is connected with gradual putting into operation of reactors on fast neutrons (RFN) permitting to most fully use the possibilities of uranium stocks and in future – raw thorium.

The assessment of acceptability and viability of alternative versions for arranging promising structure of nuclear power engineering in the terms of the types of reactor facilities and NFC closure is a multi-parameter and multi-criterion task for system analysis. At the same time, it is necessary to take into account both technical characteristics, and economical characteristics for NFC production.

The work analyses the results of modeling scenario versions for the development of RF nuclear power engineering with the help of program complex ATEK-NFC. Its main function is modeling of nuclear energetic complex, its subsystems and technologies of nuclear fuel cycle. The work considers various versions of RFN implementation into the structure of nuclear power engineering:

- gradual putting into operation of RFN of various type with different breeding factor with supporting introduction of thermal reactors;
- switching to RFN after 2030;
- fuel production for RFN from various sources of fissile materials (recycling and natural raw materials);
- influence of burning depth on integral characteristics of fuel cycle;
- in-site and centralized arrangement of fuel cycle.

Assessment is made for resource and production demands, a set of necessary technologies and the influence of key technological solutions on nuclear fuel cycle on the whole. The potential criteria of integral assessments for nuclear power engineering development are given.

References

1 I. R. Makeyeva, V. A. Simonenko, N. D. Dyrda, A. A. Rykuno-
va, S. V. Pchelintseva S. V. Pchelintseva. The problems of modeling the technologies of nuclear fuel cycle. Platform ATEK // proceeding of XIII International conference “Zababakhin scientific talks”. – Snezhinsk, 2017. – p. 255.

5-14

ЯДЕРНЫЙ МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В МОНОНИТРИДЕ УРАНА

В. В. Оглобличев¹, А. М. Потапов², С. В. Верховский¹

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

²Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

E-mail: ogloblichev@imp.uran.ru

До сих пор, применение метода ядерного магнитного резонанса (ЯМР) ограничивалось только регистрацией спектров ^{14,15}N [1, 2] без систематического исследования релаксационных характеристик ядерных моментов, содержащих сведения о низкочастотной динамике спиновых возбуждений магнитных ионов урана. Совместный анализ данных измерений сдвига линии ЯМР, скорости спин-решеточной релаксации ядерного спина ¹⁴N и магнитной восприимчивости позволил определить температурную зависи-

мость энергии спиновых флуктуаций $\Gamma(T)$ электронов $5f$ -оболочки урана: $\Gamma_{\text{ЯМР}}(T) \propto T^{0.54(4)}$. Зависимость $\Gamma_{\text{ЯМР}}(T)$ близка к зависимости $\Gamma(T) \propto T^{0.5}$, характерной для концентрированных систем Кондо выше температуры формирования когерентного состояния. Сделано предположение о флуктуирующем валентном состоянии магнитного иона урана в UN, основным состоянием которого является квантовая суперпозиция нескольких электронных конфигураций $5f$ оболочки от f^3 до, возможно, немагнитной конфигурации f^0 [3]. Антиферромагнитное упорядочение вероятно происходит в режиме зарядовых и связанных с ними магнитных флуктуаций. Более того, успешное детектирование сигнала ЯМР на ядре ^{14}N в образцах нитрида урана показало крайне высокую чувствительность метода для решения вопросов координационной химии и фазового состава. Несомненным достоинством метода является объемный характер данных о структурном состоянии UN.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-72-10022).

Литература

1. M. Kuznietz, Physical Review 180, 476 (1969).
2. M. Kuznietz and D. O. Van Ostenburg, Physical Review B 2, 3453 (1970).
3. В. В. Оглобличев и др., Письма в ЖЭТФ 108, 650 (2018).

NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE IN URANIUM MONONITRIDE

V. V. Ogloblichev¹, A. M. Potapov², S. V. Verkhovskii¹

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

²The Institute of High Temperature Electrochemistry, Ural
Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

E-mail: ogloblichev@imp.uran.ru

So far, the application of the nuclear magnetic resonance (NMR) method has been limited only to the registration of spectra $^{14,15}\text{N}$ [1, 2] without a systematic study of the relaxation characteristics of nuclear moments containing information on the low-frequency dynamics of spin excitations of uranium magnetic ions. A joint analysis of measurement data of the NMR line shift, the spin-lattice relaxation rate of the nuclear spin ^{14}N and the magnetic susceptibility allowed us to determine the temperature dependence of the energy of the spin fluctuations $\Gamma(T)$ of the $5f$ -electron shell of uranium: $\Gamma_{\text{NMR}}(T) \propto T^{0.54(4)}$. The dependence $\Gamma_{\text{NMR}}(T)$ is close to the dependence $\Gamma(T) \propto T^{0.5}$ characteristic of concentrated Kondo systems above the temperature of coherent state formation. The assumption is made about the fluctuating valence state of the magnetic uranium ion in the UN, the ground state of which is the quantum superposition of several electronic configurations of the $5f$ shell from f^3 to possibly non-magnetic configuration f^0 [3]. Antiferromagnetic ordering probably occurs in the mode of charge and associated magnetic fluctuations. Moreover, the successful detection of the NMR signal on the nucleus ^{14}N in uranium ni-

tride samples showed an extremely high sensitivity of the method for solving the problems of coordination chemistry and phase composition. The undoubted advantage of the method is the voluminous nature of the data on the structural state of UN.

This work was supported by the Russian Science Foundation (project no. 18-72-10022).

References

1. M. Kuznietz, Physical Review 180, 476 (1969).
2. M. Kuznietz and D. O. Van Ostenburg, Physical Review B 2, 3453 (1970).
3. V. V. Ogloblichev et. al., JETP Letters 108, 616 (2018).

5-15

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ TeDy. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ПРИМЕНЕНИЕ

А. Е. Паукова, И. Р. Макеева, А. А. Рыкунова,
И. В. Пешкичев, В. Ю. Пугачев, О. В. Шульц

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

Для организации замыкания ядерного топливного цикла необходимо разработать целый ряд технологий рециклирования ядерного топлива, обосновать их реализуемость и определить оптимальные технологические режимы. Полномасштабное экспериментальное обоснование затрудняется отсутствием в настоящее время образцов отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), сложностью работы с реальными высокоактивными составами и высокой стоимостью экспериментальных исследований. Одним из способов оценки характеристик технологического процесса в этих условиях является термодинамическое моделирование.

В РФЯЦ – ВНИИТФ разрабатывается программный комплекс (ПК) TeDy [1], позволяющий рассчитывать химически равновесные составы систем различной сложности. Программный комплекс предназначен для решения следующих задач:

- расчет термодинамически равновесных составов для заданных начальных условий (в диапазоне температур, в диапазоне давлений, а также при изменении количества одного из компонентов в системе);
- формирование уравнений химических реакций и расчет изменения термодинамических функций по реакциям (при заданной температуре или диапазоне ее изменения);
- работа с базой данных термодинамических свойств индивидуальных веществ (просмотр, редактирование, импорт и экспорт данных).

При расчетах используется база данных, содержащая информацию о свойствах веществ, характерных для технологий ядерного топливного цикла (ЯТЦ).

ПК TeDy предназначен для использования как в автономном режиме – в виде приложения с пользовательским интерфейсом, так и пакетном режиме в составе программных средств, предназначенных для моделирования технологических процессов или работы оборудования. Реализация комплекса на базе платформы АТЭК [2] обеспечивает его интеграцию в программные продукты, разработанные на этой же платформе, в том числе в ПК ВИЗАРТ, предназначенный для обоснования реализуемости и оптимизации параметров технологических линий замыкающей стадии ядерного топливного цикла.

Результаты связанных расчетов ПК ВИЗАРТ[3] и ПК TeDy используются разработчиками технологий переработки ОЯТ и фабрикаций ядерного топлива для анализа и оценки различных вариантов технологии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-01-00873

Литература

1. Пешкичев И. В., Куропатенко В. Ф., Макеева И. Р. [и др.] // Программный комплекс TeDy для решения задач термодинамического моделирования. Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование» (Вестник ЮУрГУ ММП). 2018. Т. 11, № 1. С. 84–94. DOI: 10.14529/mmp180108.
2. И. Р. Макеева, Вербицкая О. В., Дубосарский В. Г., Пугачев В. Ю., Пчелинцева С. В., Соколов В. П. Моделирование технологических процессов переработки ОЯТ и фабрикаций топлива на платформе АТЭК. Тезисы доклада на VIII Российской конференции по радиохимии «Радиохимия-2015», г. Железногорск, 2015
3. Шмидт О. В., Макеева И. Р., Ливенцов С. Н. Моделирование технологических переделов ЗЯТЦ, как инструмент при создании и оптимизации технологических производств. // Радиохимия, 2016, т. 58, N 4, с. 316–323.

PROGRAM COMPLEX OF THERMO-DYNAMIC MODELING TeDy. FUNCTIONAL POSSIBILITIES AND APPLICATION

A. E. Paukova, I. R. Makeyeva, A. A. Rykunova,
I. V. Peshkichev, V. Yu. Pugachev, O. V. Shults

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

For arranging nuclear fuel cycle closure, it is necessary to develop several technologies to recycle nuclear fuel, to substantiate their feasibility and to determine optimal technological regimes. Full-scale experimental substantiation is impeded by the absence of the samples of spent nuclear fuel (SNF), by complicated character of work with real high active compositions and high cost of experimental studies. One of the methods to assess characteristics of technological process in these conditions is thermo-dynamic modeling.

RFNC – VNIITF specialists are developing a program complex (PC) TeDy [1], which permits to chemically calculate equilibrium compositions for the systems with

various complexity. This program complex is for solving the following problems:

- thermo-dynamic calculation of equilibrium compositions for specified initial conditions (in the range of temperatures, pressures and under the changing the amount of one component in the system);
- formation of chemical reaction equations and calculation of the change in thermo-dynamic functions by reactions (at specified temperature or the range of its change);
- the work with data base of individual substances thermo-dynamic properties (review, editing, data import and export).

Calculations use data base, which contains information about substances properties that are typical for technologies of nuclear fuel cycle (NFC).

Program complex TeDy is for using both in stand-alone regime – in the form of application with user interface, and packet regime in software tools that model technological processes or equipment operation. Complex realization based on platform ATEK [2] provides its integration in software products that were developed on the same platform, including PC VIZART, which is for substantiation of feasibility and optimizing the parameters of technological lines of NFC closing stage.

The results of associated calculations by PC VIZART [3] and PC TeDy are used by the developers of SNF reprocessing technologies and nuclear fuel fabrication for analysis and assessment of technology versions.

Investigation was performed under RFBR financial support, in the frames of scientific project # 17-01-00873

References

1. I. V. Peshkichev, V. F. Kuropatenko, I. R. Makeyeva [et al] // Program complex TeDy for solving the problems of thermo-dynamic modeling. Herald of YuUrSU. Series “Mathematical modeling and programming” (Herald of YuUrSU). 2018. V. 11, #1. p. 84–94. DOI: 10.14529/mmp180108.
2. I. R. Makeyeva, O. V. Verbitskaya, V. G. Dubosarsky, V. Yu. Pugachev, S. V. Pchelintseva, V. P. Sokolov. Modeling technological processes for SNF reprocessing and fuel fabrication on ATEK platform. Abstract of presentation for VIII Russia conference on radiochemistry “Radiochemistry-2015”, Zheleznogorsk, 2015
3. O. V. Shmidt, I. R. Makeyeva, S. N. Liventsov. Modeling technological limits for CNFC, as the instrument under building and optimization of technological productions. // Radiochemistry, 2016, v. 58, # 4, p. 316–323.

5-16

КОРРОЗИЯ МАТЕРИАЛА ОБОЛОЧКИ ТВЭЛА НИТРИДНОГО И ОКСИДНОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

И. В. Пешкичев¹, А. А. Бочкарева¹, Н. Д. Дырда¹,
И. Р. Макеева^{1,2}, О. В. Шульц¹

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

²Южно-Уральский государственный университет
(Национальный Исследовательский Университет),
Челябинск, Россия

E-mail: i.v.peshkichev@vniitf.ru

В связи с проведением расчетно-экспериментальных исследований смешанного нитридного уран-плутониевого ядерного топлива в реакторе БН-600 [1], а также исследований смешанного оксидного уран-плутониевого топлива в реакторе БН-800 [2], являются актуальными работы по термодинамическому моделированию химического состава ОЯТ и его взаимодействия с оболочкой ТВЭЛа. Для этих целей использовались программный продукт HSC Chemistry 7.1 и программный комплекс TeDy [3]. Для проведения расчета равновесного состава нитридного и оксидного ОЯТ были использованы изотопные составы для нитридных ТВЭЛов экспериментальных ТВС БН-600 и оксидных ТВЭЛов экспериментальных ТВС БН-800, рассчитанные с помощью программ ПРИЗМА и РИСК [4, 5]. Расчет термодинамически равновесного химического состава ОЯТ проводился с учетом термодинамических свойств более чем 900 индивидуальных веществ. Полученный состав использовался для термодинамического моделирования взаимодействия нитридного и оксидного ОЯТ с материалом оболочки экспериментальных ТВЭЛов – сталью марки ЧС 68 ХД. Результаты моделирования дают представление о химическом составе ОЯТ, а также позволяют исследовать возможные причины коррозии. Так, для стали ЧС 68 ХД выявлено влияние реакций образования и диссоциации нитридов хрома на коррозию оболочки ТВЭЛа с нитридным ОЯТ, что может быть использовано при оценке поведения ТВЭЛов во время облучения в реакторной установке.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-01-00873.

Литература

1. Zabudko L. M. et al. Development of innovative fast reactor nitride fuel in Russian Federation: state-of-art. Proc. International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development 26–29 June 2017 Yekaterinburg, Russian Federation, Book of Abstracts, p. 57.
2. Kuznetsov A. BN-800 core with MOX fuel. Proc. International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development

26–29 June 2017 Yekaterinburg, Russian Federation, Book of Abstracts, p. 330.

3. Пешкичев И. В., Куропатенко В. Ф., Макеева И. Р. и др. / Программный комплекс TeDy для решения задач термодинамического моделирования / Вестник ЮУрГУ ММП. 2018. Т. 11, № 1. С. 84–94.
4. Модестов Д. Г. Программа решения задач ядерной кинетики РИСК 2014, препринт ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ», № 243, 2014.
5. Зацепин О. В. Расчеты методом Монте-Карло по программе ПРИЗМА нейтронно-физических характеристик активной зоны ВВЭР-1000 / ВАИТ, сер. «Физика ядерных реакторов». – 2011. – Вып. 4. – С. 64–74.

NITRIDE AND OXIDE NUCLEAR FUELS CLADDING CORROSION

I. V. Peshkichev¹, A. A. Bochkareva¹, N. D. Dyrda¹,
I. R. Makeyeva^{1,2}, O. V. Shults¹

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

²South Ural State University (National Research University),
Chelyabinsk, Russia

E-mail: i.v.peshkichev@vniitf.ru

In connection with the calculation-experimental study of mixed nitride uranium-plutonium nuclear fuel performance for BN-1200 and BREST-OD-300 reactors [1], as well as studies of mixed oxide uranium-plutonium fuel [2], thermodynamic modeling of the spent nuclear fuel (SNF) chemical composition and its interaction with fuel cladding became relevant. For these purposes software product HSC Chemistry 7.1 and TeDy software package [3] is used. For the calculation of the equilibrium composition of nitride and oxide SNF was used the isotopic compositions of nitride fuel elements experimental fuel assemblies of the BN-600 and oxide fuel elements experimental fuel assemblies of the BN-800, which was calculated using software PRISMA and RISK [4, 5]. Thermodynamic equilibrium chemical composition calculation was based on the thermodynamic properties of more than 900 individual substances. The resulting material composition was used for thermodynamic modeling of interaction between cladding material (CHS-68 steel) and nitride or oxide SNF. The simulation results give an idea of the chemical composition of SNF, as well as allow to investigate the possible causes of corrosion. E.g., for the CHS-68 steel the effect of chromium nitrides formation and dissociation reactions on the corrosion of nitride fuel cladding was discovered.

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 17-01-00873.

References

1. Zabudko L. M. et al. Development of innovative fast reactor nitride fuel in Russian Federation: state-of-art. Proc. International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development 26–29 June 2017 Yekaterinburg, Russian Federation, Book of Abstracts, p. 57.

2. Kuznetsov A. BN-800 core with MOX fuel. Proc. International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development 26–29 June 2017 Yekaterinburg, Russian Federation, Book of Abstracts, p. 330.
3. Peshkichev I.V. et al. / Software TEDY for thermodynamical modelling / Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software (Bulletin SUSU MMCS), 2018, vol. 11, no. 1, pp. 84–94.
4. Modestov D. G. Program for solving problems of nuclear kinetics RISK 2014, Preprint Snezhinsk: RFNC – VNIITF, № 243, 2014. (in Russian)
5. Zatsepin O. V et al. Calculations for the VVER-1000 Core by the Monte Carlo Method Implemented in the PRIZMA Code / Problems of Atomic Science and Engineering. Ser.: Physics of Nuclear Reactors. – 2011. – Issue 4. – pp. 64–74. (in Russian)

5-17

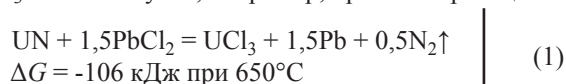
ХЛОРИРОВАНИЕ UN ХЛОРИДОМ СВИНЦА В РАСПЛАВЛЕННОЙ ЭВТЕКТИКЕ LiCl-KCl

А. М. Потапов, В. Ю. Шишкин, Ю. П. Зайков

Институт высокотемпературной электрохимии УрОРАН,
Екатеринбург, Россия

E-mail: A.Potapov_50@mail.ru

При пирохимической переработке нитридного отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) головной операцией, вероятно, будет хлорирование ОЯТ с целью его растворения в эвтектическом расплаве LiCl–KCl. В качестве хлорирующих агентов удобно использовать хлориды 3d-металлов, например, CdCl₂, PbCl₂, BiCl₃. В этом случае, например, протекает реакция:



Целью настоящей работы является экспериментальное изучение кинетики и иных особенностей протекания реакции (1) в среде расплавленной эвтектики LiCl–KCl.

Экспериментально изучена кинетика и полнота протекания реакции (1) в зависимости от температуры и концентрации хлорирующего агента. Найдено, что 100%-ная конверсия UN→UCl₃ достигается при температуре 650°C. Скорость реакции существенно зависит от концентрации хлорирующего агента. Так при 10 %-ном избытке PbCl₂ от стехиометрического, для завершения реакции требуется 15–30 часов. При двухкратном избытке PbCl₂ реакция завершается примерно за 1,5–2 часа.

Методами термодинамического моделирования в сочетании с экспериментальными данными установлены стадийность и механизм реакции (1).

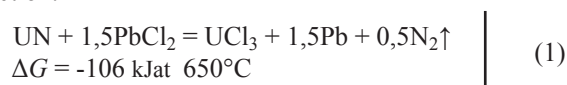
UN CHLORINATION WITH LEAD CHLORIDE IN MOLTEN LiCl-KCl EUTECTIC

A. M. Potapov, V. Yu. Shishkin, Yu. P. Zaykov

The Institute of High-Temperature Electrochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

E-mail: A.Potapov_50@mail.ru

At the pyrochemical reprocessing of nitride spent nuclear fuel (SNF), the main operation is likely to be the SNF chlorination with the aim of its dissolution in the LiCl–KCl eutectic melt. Chlorides of 3d-metals, for example, CdCl₂, PbCl₂, BiCl₃, are conveniently used as chlorinating agents. In this case, for example, proceeds the reaction:



The purpose of this work is to experimentally study the kinetics and other features of the reaction (1) in a molten LiCl–KCl eutectic.

The kinetics and completeness of the reaction (1) were studied experimentally depending on the temperature and concentration of the chlorinating agent. It was found that 100% conversion of UN → UCl₃ is achieved at 650°C. The reaction rate significantly depends on the concentration of the chlorinating agent. For instance, with a 10% excess of PbCl₂ from stoichiometric, it takes 15–30 hours to complete the reaction. With a two-fold excess of PbCl₂, the reaction is completed in about 1.5–2 hours.

With thermodynamic modeling methods in combination with experimental data the staging and mechanism of the reaction (1) were established.

5-18

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ РАСПЛАВЛЕННЫХ СМЕСЕЙ ЭВТЕКТИКИ LiCl-KCl С КОМПОНЕНТАМИ ОЯТ

А. М. Потапов, А. Б. Салюлев, В. Ю. Шишкин

Институт высокотемпературной электрохимии УрОРАН,
Екатеринбург, Россия

E-mail: A.Potapov_50@mail.ru

В процессе пирохимической переработки отработавшего нитридного ядерного топлива (ОЯТ) образуются многокомпонентные расплавленные смеси на основе эвтектики LiCl–KCl. Для дальнейшей переработки этих сложных расплавов необходимо знание их физико-химических свойств, которые пока изучены недостаточно.

Целью настоящей работы является изучение электропроводности расплавов, аналогичных образующимся при растворении реального нитридного ОЯТ в LiCl–KCl)_{эвт.}, а также разработка модели, которая позволила бы оценивать электропроводность

многокомпонентных расплавов произвольного состава на основе проводимости 2–3 компонентных смесей.

Для достижения этой цели мы измерили электропроводность расплавленных смесей $(\text{LiCl-KCl})_{\text{эвт}}$ с концентрациями от 0 до 100 мол. % CsCl , SrCl_2 , CeCl_3 или NdCl_3 и до 30 мол. % UCl_3 в широком интервале температур (350–920 °C). Кроме того была изучена электропроводность смесей более сложных композиций, таких как $(\text{LiCl-KCl})_{\text{эвт.}} - \text{CeCl}_3 + \text{NdCl}_3$ и $(\text{LiCl-KCl})_{\text{эвт.}} - \text{CeCl}_3 + \text{NdCl}_3 + \text{UCl}_3$. Результаты проанализированы и систематизированы.

Электропроводность – неаддитивное свойство, поэтому простое суммирование электропроводностей отдельных компонентов дает существенно завышенный результат. Например, отклонения электропроводности расплавленной смеси $(\text{LiCl-KCl})_{\text{эвт.}} + \text{NdCl}_3$ от аддитивных значений достигают ~ 80–90%.

Чем сильнее взаимодействие (комплексобразование) в системе, тем больше в ней отклонения от аддитивности. Системы, составленные из $(\text{LiCl-KCl})_{\text{эвт.}}$, CeCl_3 , NdCl_3 и т.д., это системы с сильным взаимодействием. Однако если для суммирования взять квазибинарные системы $((\text{LiCl-KCl})_{\text{эвт.}} + \text{CeCl}_3)$, $((\text{LiCl-KCl})_{\text{эвт.}} + \text{NdCl}_3)$, $((\text{LiCl-KCl})_{\text{эвт.}} + \text{UCl}_3)$, то это уже будут системы со слабым взаимодействием, и их аддитивная электропроводность будет мало отличаться от реальной. Например, величины аддитивных значений электропроводности сложных расплавленных смесей $(\text{LiCl-KCl})_{\text{эвт.}} - 1,51\% \text{ CeCl}_3 + 2,31\% \text{ NdCl}_3 + 2,31 \text{ мол. \% UCl}_3$, рассчитанные с использованием данных по электропроводности расплавов в системах $((\text{LiCl-KCl})_{\text{эвт.}} - \text{CeCl}_3)$, $((\text{LiCl-KCl})_{\text{эвт.}} - \text{NdCl}_3)$ и $((\text{LiCl-KCl})_{\text{эвт.}} - \text{UCl}_3)$, в пределах экспериментальных погрешностей ($\pm 1,5\%$) совпадают с измеренными значениями.

В работе рассмотрены различные подходы к расчету электропроводности сложных многокомпонентных расплавленных смесей.

ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF MOLTEN MULTICOMPONENT MIXTURES OF LiCl-KCl EUTECTIC WITH COMPONENTS OF SNF

A. M. Potapov, A. B. Salyulev, V. Yu. Shishkin

The Institute of High-Temperature Electrochemistry
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, Russia

E-mail: A.Potapov_50@mail.ru

In the course of the pyrochemical reprocessing of spent nitride nuclear fuel (SNF), multicomponent molten mixtures based on the LiCl-KCl eutectic are formed. For further processing of these complex melts, it is necessary to know their physicochemical properties, which have not yet been studied sufficiently.

The purpose of this work is to study the electrical conductivity of melts similar to that formed during the dissolution of real nitride SNF in $(\text{LiCl-KCl})_{\text{eut.}}$, and also to develop a model that would allow to evaluate the electrical conductivity of multicomponent melts

of arbitrary composition based on the conductivity of 2–3 component mixtures.

To achieve this goal, we measured the electrical conductivity of molten mixtures $(\text{LiCl-KCl})_{\text{eut}}$ with concentrations from 0 to 100 mol. % CsCl , SrCl_2 , CeCl_3 or NdCl_3 and up to 30 mol. % UCl_3 in a wide range of temperatures (350–920 °C).

To achieve this goal, we measured the conductivity of molten $(\text{LiCl-KCl})_{\text{eut}}$ mixtures with CsCl , SrCl_2 , CeCl_3 and NdCl_3 in the entire concentration range and the mixture with the UCl_3 to 30 mol. % in a wide range of temperatures (350–920 °C). In addition, the electrical conductivity of more complex mixtures, such as $(\text{LiCl-KCl})_{\text{eut.}} - \text{CeCl}_3 + \text{NdCl}_3$ and $(\text{LiCl-KCl})_{\text{eut.}} - \text{CeCl}_3 + \text{NdCl}_3 + \text{UCl}_3$, was studied. The results were analyzed and systematized.

Electrical conductivity is a non-additive property; therefore, a simple summation of the electrical conductivities of individual components gives a significantly overestimated result. For example, the conductivity deviations of the $(\text{LiCl-KCl})_{\text{eut.}} + \text{NdCl}_3$ molten mixture from additive values reach ~ 80–90%.

The stronger the interaction (complexation) in the system, the greater the deviations from additivity. Systems composed of $(\text{LiCl-KCl})_{\text{eut.}}$ and CeCl_3 , NdCl_3 , etc., are systems with strong interactions. However, if for summation we take quasi-binary systems, such as $((\text{LiCl-KCl})_{\text{eut.}} + \text{CeCl}_3)$, $((\text{LiCl-KCl})_{\text{eut.}} + \text{NdCl}_3)$, $((\text{LiCl-KCl})_{\text{eut.}} + \text{UCl}_3)$, then these will be systems with weak interaction, and their additive electrical conductivity will differ little from the real one. For example, additive conductivities of complex molten mixtures $(\text{LiCl-KCl})_{\text{eut.}} - 1.51\% \text{ CeCl}_3 + 2.31\% \text{ NdCl}_3 + 2.31 \text{ mol. \% UCl}_3$ calculated using data on the conductivity of $((\text{LiCl-KCl})_{\text{eut.}} - \text{CeCl}_3)$, $((\text{LiCl-KCl})_{\text{eut.}} - \text{NdCl}_3)$ and $((\text{LiCl-KCl})_{\text{eut.}} - \text{UCl}_3)$ melts are coincide with the measured values within of experimental errors ($\pm 1.5\%$).

The paper discusses various approaches to the calculation of the electrical conductivity of complex multicomponent molten mixtures.

5-19

ВЫБОР УЧАСТКОВ ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОДАХ

А. М. Романов

Республиканское государственное предприятие Институт геофизических исследований, Республика Казахстан

E-mail: ramix06@mail.ru

Радиоактивные вещества используются в различных областях промышленности. Критерий оптимальности использования: полученная выгода от применения радиоактивных веществ превышает вред, наносимый ими окружающей среде и населению. При обратном соотношении эти вещества должны

переводится в категорию отходы и захораниваться. Преимущественно в литосфере.

Главным требованием является обеспечение иммобилизации – минимизации поступления веществ из мест захоронения в окружающую среду. Наиболее значимой причиной миграции в литосфере является движение вод, выщелачивающих, транспортирующих и отлагающих вещества из растворов. Взаимодействие твердой и жидкой фаз литосферы определяется факторами:

- динамическим – скоростью движения вод;
- структурным – поперечным сечением потоков вод;
- вещественным – состав горных пород и вод.

Динамический и структурный фактор перестают действовать при отсутствии течения воды. Влияние вещественного фактора на перераспределение веществ между твердой и жидкой фазами также существенно зависит от скорости течения вод.

Известно предположение о барьерном ограничении миграции радионуклидов. Но барьеры, представленные горными породами с высокой адсорбционной (абсорбционной) способностью, повышенными значениями окислительно-восстановительного потенциала и повышенными концентрациями органических веществ, не могут гарантировать полного прекращения миграции за счет перевода растворенных радионуклидов в твердую фазу. Инженерные барьеры характеризуются недолговечностью. Поэтому выражается сомнение в эффективности указанных способов ограничения распространения радионуклидов в окружающей среде.

Основным способом долговременного удержания радионуклидов в месте захоронения является использование массивов горных пород с высокой изолирующей способностью. Выполнено сопоставление изолирующей способности горных пород на примере территории Семипалатинского полигона. В качестве наиболее подходящих для захоронения выбраны массивы метасоматитов – горных пород, трещины которых заполнены вторичными минералами – кварцем и карбонатами.

Метасоматиты характеризуются повышенной прочностью и низкой водопроницаемостью. Высокое удельное электрическое сопротивление позволяет выделить и оконтурить в пространстве блоки таких пород. Проведены соответствующие электроразведочные работы, позволившие сделать заключение о пригодности двух участков на территории полигона для долговременного размещения средне- и высоко-радиоактивных отходов.

Результаты представленных работ могут использоваться в предпроектных изысканиях, а также при обосновании системы эксплуатационной и постэксплуатационной стадий мониторинга пунктов размещения радиоактивных отходов.

THE SELECTION OF SITE FOR RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL IN CRYSTALLINE ROCKS

A. M. Romanov

Republican state enterprise Institute of geophysical research of the Republic of Kazakhstan

E-mail: ramix06@mail.ru

Radioactive substances are used in various industries. Optimality of use: the benefits derived from the use of radioactive substances exceed the harm cause to the environment and the public. If the ratio is reversed, these substances should be converted to waste and disposed in the repository. Mainly in the lithosphere.

The main requirement is to ensure the immobilization - minimizing the flow of substances from the landfill to the environment. The most significant cause of migration in the lithosphere is the movement of water leaching, transporting and decomposing substances from solutions. The interaction of solid and liquid phases of the lithosphere is determined by factors:

- dynamic - speed of water flows;
- structural - cross-section of water flows;
- material - composition of rocks and waters.

Dynamic and structural factors cease to operate in the case to absence of water flow. The influence of the material factor on the redistribution of substances between the solid and liquid phases also significantly depends on the water flow rate.

The assumption of a known barrier restricting the migration of radionuclides. But the barriers presented by rocks with high adsorption (absorption) capacity, high values of redox potential and high concentrations of organic substances cannot guarantee the complete cessation of migration due to the transfer of dissolved radionuclides into the solid phase. Engineering barriers are characterized by fragility. Therefore, doubts are expressed about the effectiveness of these methods to limit the spread of radionuclides in the environment.

The main method of long-term retention of radionuclides at the burial site is the use of rock massifs with high insulating capacity. A comparison of the insulating capacity of rocks on the example of the Semipalatinsk test site. As the most suitable for the disposal of selected arrays of metasomatites-rocks, cracks which are filled with secondary minerals-quartz and carbonates.

Metasomatites are characterized by high strength and low water permeability. High electrical resistivity allows you to select and contour blocks of such rocks in space. Carried out electrical work, which allowed to conclude about the suitability of the two sites at the landfill site for long-term accommodation medium - and high-level radioactive waste.

The results of the presented works can be used in pre-design studies, as well as in the justification of the system of operational and post-operational stages of monitoring of radioactive waste disposal points.

5-20

ДИСТАНЦИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПУТЕЙ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ В НЕДРАХ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

А. М. Романов

Республиканское государственное предприятие Институт
геофизических исследований, Республика Казахстан

E-mail: ramix06@mail.ru

Согласно оценке Комитета экологии РК в недрах Семипалатинского испытательного полигона сосредоточено свыше 90 % активности продуктов ядерных взрывов. Мониторинг радиационной ситуации недр включает установление местоположения потоков подземных вод и выявление связи потоков вод с очагами взрывов.

Выполнены теоретические, экспериментальные и натурные исследования. Установлено, что взаимодействие твердой и жидкой фаз литосферы определяется динамическим, структурным и вещественным факторами. Динамический фактор – скорость движение вод, структурный – поперечное сечение потоков вод, вещественный – состав горных пород и вод. Эти факторы могут влиять на межфазный переход веществ только через посредство электрического поля потенциала течения.

Динамический фактор определяется на основе данных естественного электрического поля потенциала течения поверхностными съемками (ЕП), а также каротажа скважин. Структурный фактор определяется совместными данными съемок кажущегося сопротивления (КС) и ЕП. Вещественный фактор – данные КС.

Натурные исследования выполнены на площадках Дегелен (взрывы в штольнях с выходом потоков радиоактивных вод на поверхность) и Балапан (подземные взрывы в скважинах). Отложение радионуклидов из потоков поверхностных вод в горные породы долины ручьев отмечено преимущественно в местах динамических, структурных и вещественных особенностей площадки Дегелен, отвечающих теоретическим представлениям и экспериментальным данным. Влияние этих особенностей на отложение радионуклидов доказано результатами поверхностных бета- и гамма-съемок, определяющих активности стронция-90 и цезия-137 соответственно.

Это позволило перейти к следующему этапу: доказательству возможности дистанционного определения миграции радионуклидов в недрах. По 16 независимым участкам площадки Балапан проведены электроразведочные съемки методами КС и ЕП. С их помощью выделены структуры, в которых могут быть потоки вод, в том числе содержащих радионуклиды. Определение местоположения зон с повышенной активностью радионуклидов выполнено съемкой эксхалляции трития. Связь повышенной активности газового трития с особенностями проявлений динамического,

структурного и вещественного факторов объясняется теми же причинами, что и переход веществ между твердой и жидкой фазами горных пород.

Результаты представленных работ могут использоваться при оценке радиационной безопасности недр, проектировании, эксплуатации и постэксплуатации объектов атомной промышленности, а также при инспекции на местах предполагаемых подземных ядерных взрывов.

DISTANT DETERMINATION OF MIGRATION ROUTES OF RADIONUCLIDES IN THE DEPTHS OF THE SEMIPALATINSK TEST SITE

А. М. Романов

Republican state enterprise Institute of geophysical research
of the Republic of Kazakhstan

E-mail: ramix06@mail.ru

According to the assessment of the Committee of ecology of Kazakhstan in the depths of the Semipalatinsk test site is concentrated more than 90 % of the activity of the products of nuclear explosions. Monitoring of the radiation situation of the subsoil includes the establishment of the location of groundwater flows and the identification of the connection of water flows with the places of explosions.

Theoretical, experimental and in-situ studies were carried out. It was found that the interaction of solid and liquid phases of the lithosphere is determined by dynamic, structural and material factors. Dynamic factor – speed of water movement, structural factor-cross-section of water flows, material factor – composition of rocks and waters. These factors can affect the interfacial transition of substances only through the electric field of the flow potential.

The dynamic factor is determined on the basis of the data of the natural electric field of the flow potential by surface surveys (EP), and logging. The structural factor is determined by the joint data of the special resistivity (SR) and EP surveys. The material factor is determined by the data of SR.

Full-scale studies were performed at the Degelen (explosions in tunnels with the release of radioactive water flows to the surface) and Balapan (underground explosions in wells) area. The deposition of radionuclides from surface water flows into rocks of the brook valley Degelen area was observed mainly in the places of dynamic, structural and material features that correspond to theoretical concepts and experimental data. The influence of these features on the deposition of radionuclides is proved by the results of surface beta - and gamma-surveys determining the activity of strontium-90 and cesium-137, respectively.

This allowed us to proceed to the next stage: proving the possibility of remote determination of radionuclide migration in the subsoil. On 16 independent sites of the Balapan area conducted electrical survey by SR and EP. With their help, structures in which water flows, including those containing radionuclides, can be identified. The determination of the location of zones with increased

activity of radionuclides is performed by the survey of tritium exhalation. The connection of the increase in the activity of gas tritium with the peculiarities of the manifestations of dynamic, structural and material factors is explained by the same reasons as the transition of substances between the solid and liquid phases of rocks.

The results of the presented works can be used in the assessment of radiation safety of subsoil, design, operation and post-operation of nuclear facilities, as well as in the field inspection of alleged underground nuclear explosions.

5-21

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ДОИЗВЛЕЧЕНИЯ ДЕЛЯЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ ИЗ САО С ПОМОЩЬЮ ПК ВИЗАРТ

А. А. Рыкунова¹, Ю. А. Евсюкова²,
А. Ю. Шадрин², О. В. Шмидт²

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

²Частное учреждение «Инновационно-технологический
центр проекта «Прорыв», Москва, Россия
E-mail: a.a.rykunova@vniitf.ru

Разрабатываемая в проектом направлении «Прорыв» [1] технология переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 для опытно-демонстрационного энергетического комплекса (ОДЭК) включает в себе последовательные стадии концентрирования среднеактивных (САО) и высокоактивных отходов (ВАО) с последующей передачей кубового раствора на отверждение ВАО.

Упаренные среднеактивные продукты модуля переработки (МП) поступают на концентрирование ВАО и далее выводятся вместе с кубовым остатком на отверждение. В случае если в упаренном кубе САО содержатся делющиеся материалы (ДМ), они полностью переходят в упаренный поток ВАО, что увеличивает потери ДМ (в том числе плутония) в РАО. Для снижения попадания ДМ в РАО в технологическую схему обращения с САО можно добавить стадию доизвлечения ДМ с их возвратом в голову процесса.

С помощью разрабатываемого в РФЯЦ – ВНИИТФ программного комплекса (ПК) ВИЗАРТ [2] были проведены расчеты материального баланса при различных компоновках технологических линий МП. В докладе представлен сравнительный анализ результатов расчетов материального баланса технологий с учетом влияния дополнительной стадии выделения ДМ из потока САО на объем и состав образующихся отвержденных РАО технологии переработки ОЯТ ОДЭК.

Литература

1. Адамов Е. О., Алексахин Р. М., Большов Л. А., Дедуль А. В., Орлов В. В., Першуков В. А., Рачков В. И., Толстоухов Д. А.,

Троянов В. М. Проект «Прорыв» – технологический фундамент для крупномасштабной ядерной энергетики. – Изв. РАН. Энергетика, 2015, № 1, с. 5–12.

2. Шмидт О. В., Макеева И. Р., Ливенцов С. Н. Моделирование технологических переделов ЗЯТЦ, как инструмент при создании и оптимизации технологических производств. // Радиохимия, 2016, т. 58, N 4, с. 316–323.

ESTIMATED ASSESSMENT STAGE OF SUPPLEMENTARY FISSILE MATERIALS RETRIEVAL FROM INTERMEDIATE LEVEL WASTE WITH THE AID OF SOFTWARE COMPLEX VIZART

A. A. Rykunova¹, Yu. A. Evsyukova²,
A. Yu. Shadrin², O. V. Schmidt²

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

²Innovation technological center of “PRORYV” project,
Moscow, Russia

E-mail: a.a.rykunova@vniitf.ru

Reprocessing technology of spent nuclear fuel (SNF) of the BREST-OD-300 reactor facility for the pilot demonstration energy complex (PDEC), developed in the “PRORYV” project direction [1], comprises successive concentration stages of radioactive intermediate level waste (ILW) and high-level waste (HLW) with the subsequent transfer of the evaporated bottom product to HLW-solidification stage.

Evaporated intermediate active products of the reprocessing module (RM) proceed to HLW-concentrating stage and then, together with the evaporated bottom product remainder, are passed to solidification. If fissile materials (FM) are contained in the concentrated ILW, they will be completely transferred to the concentrated HLW-flow, which will increase the loss of the FM (including plutonium) in the radioactive waste. One can add a stage of supplementary FM retrieval for the purpose of FM return to the head-process. This will reduce the ingress of FM to the radioactive waste in the technological scheme for ILW-handling.

With the aid of the software complex VIZART [2], developed in RFNC – VNIITF, material balance calculations were carried out for different technological lines arrangements of RM. This report presents a comparative analysis of material balance calculation results, taking into account the influence of additional stage of FM retrieval from the ILW-flow on the volume and composition of the solidified radioactive waste by reprocessing SNP in PDEC.

References

1. E. O. Adamov, R. M. Alexakhin, L. A. Bolshov, A. V. Dedul, V. V. Orlov, V. A. Pershukov, V. I. Rachkov, D. A. Tolstoukhov, V. M. Troyanov. Project “Proryv” – the Technological Basis for Large-scale Nuclear Power Engineering. // RAS Proceedings. Energy, 2015, t. 1, p. 5–12.
2. Schmidt O. V., Makeeva I. R., Liventzov S.N. Modelling 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.

5-22

**ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ВИЗАРТ
КАК ИНСТРУМЕНТ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИЙ ЯДЕРНОГО
ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА**

И. Р. Макеева, В. Ю. Пугачев,
В. Г. Дубосарский, А. А. Рыкунова

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

Одним из направлений по развитию ядерной энергетики является внедрение реакторов на быстрых нейтронах и организация замыкания ядерного топливного цикла. Для решения данной задачи в проектно-направлении «Прорыв» [1] предполагается создание опытно-демонстрационного энергетического комплекса, состоящего из реактора на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем БРЕСТ-ОД-300, модуля переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), модуля обращения с радиоактивными отходами (РАО) и модуля рефабрикации топлива.

В связи с недостаточной изученностью многих процессов и технических решений, сложностью экспериментального исследования новых процессов и технологий на реальных радиохимических производствах и физических моделях, при проектировании новых производств ЗЯТЦ возникают задачи расчетного исследования вариантов различной компоновки оборудования, а также анализа и оценки эффективности всего производства в целом с учётом взаимодействия между процессами. При решении данных задач целесообразно применять методы компьютерного моделирования, для чего в РФЯЦ – ВНИИТФ был разработан программный комплекс (ПК) ВИЗАРТ [2].

ПК ВИЗАРТ является специализированным программным комплексом, который позволяет рассчитывать характеристики, как отдельных операций, так и технологических линий ЗЯТЦ в целом: фабрикация ядерного топлива, переработки ОЯТ и обращения с РАО. Комплекс позволяет разрабатывать гибкие модели технологических линий и производить расчет их характеристик в стационарном и динамическом режимах, обеспечивая моделирование сложных процессов с рециркулируемыми потоками. Кроме этого с помощью ПК ВИЗАРТ можно проводить оптимизацию характеристик технологических процессов в составе технологических линий.

ПК ВИЗАРТ включает в себя:

- базу данных (БД) физико-химических свойств веществ;
- подсистему расчета технологических схем с набором алгоритмов сведения материальных балансов и оптимизации;

– библиотеку моделей для расчета отдельных технологических процессов;

– интерактивный пользовательский интерфейс, включающий в себя средства динамического построения расчетных схем, средства построения графиков и вывода отчетов.

ПК ВИЗАРТ разработан на платформе АТЭК [3] с применением современных программных средств – платформы .NET Framework и языка программирования С#. Для работы с базами данных применена технология ADO .NET Entity Framework.

Литература

1. Адамов Е. О., Алексахин Р. М., Большов Л. А. Проект «Прорыв» – технологический фундамент для крупномасштабной ядерной энергетики. – *Изв. РАН. Энергетика*, 2015, № 1, с. 5–12.
2. Шмидт О. В., Макеева И. Р., Ливенцов С. Н. Моделирование технологических переделов ЗЯТЦ, как инструмент при создании и оптимизации технологических производств. // *Радиохимия*, 2016, т. 58, N 4, с. 316–323.
3. И. Р. Макеева, Вербицкая О. В., Дубосарский В. Г., Пугачев В. Ю., Пчелинцева С. В., Соколов В. П. Моделирование технологических процессов переработки ОЯТ и фабрикация топлива на платформе АТЭК. Тезисы доклада на VIII Российской конференции по радиохимии «Радиохимия-2015», г. Железногорск, 2015.

**SOFTWARE COMPLEX VIZART
AS A TOOL FOR NUCLEAR FUEL CYCLE
TECHNOLOGIES MODELLING**

I. R. Makeyeva, V. Yu. Pugachev,
V. G. Dubosarsky, A. A. Rykunova

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

One of the directions for the development of nuclear power engineering is the implementation of fast neutron reactors and the closed nuclear fuel cycle organization. In order to solve this problem in the “PRORYV” project direction [1], is being supposed to create an pilot-demonstration energy complex consisting of a fast-neutron reactor with lead coolant BREST-OD-300, a spent nuclear fuel reprocessing module, a module for the radioactive waste management and module of fuel fabrication.

Due to the lack of investigation of many processes and technical solutions, the complexity of experimental research of new processes and technologies in real radiochemical plants and physical models, during the designing of new facilities of CNFC several problems arise, such as researching arrangement options for different equipment layouts, as well as carrying out the analysis and the effectiveness evaluation of the entire production with consideration for interaction between processes. It is reasonable to apply computer modeling methods when solving these problems, and for that purpose the software complex VIZART was developed in RFNC – VNIITF [2].

VIZART is a specialized software complex that allows to evaluate the characteristics for both individual

operations and technological lines of the CNFC as a whole: nuclear fuel fabrication, spent nuclear fuel reprocessing and radioactive waste management. The computer program allows to develop flexible models of process-lines and evaluate their characteristics in stationary and dynamic rates, providing modeling of complex processes with recycled flows. In addition, it is possible to optimize the technological processes characteristics as part of technological lines with the aid of software complex VIZART.

VIZART includes:

- database of physical and chemical substances properties;
- subsystem of technological schemes calculation with a set of algorithms for calculation of material balances and optimization;
- models library for the calculation of separate technological processes;
- interactive user interface, which includes instruments for dynamic construction of schemes, graphing tools and report output.

VIZART was developed on the ATEK platform [3] using modern software tools – the .NET Framework platform and C# programming language. ADO.NET Entity Framework technology applied to work with databases.

References

1. E. O. Adamov, R. M. Alexakhin, L. A. Bolshov, A. V. Dedul, V. V. Orlov, V. A. Pershukov, V. I. Rachkov, D. A. Tolstoukhov, V.M. Troyanov. Project “Proryv” - the Technological Basis for Large-scale Nuclear Power Engineering. // RAS Proceedings. Energy, 2015, t. 1, p. 5–12.
2. Shmidt O. V., Makeeva I. R., Liventzov S. N. Modelling 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.
3. Makeyeva I. R., Verbitskaya O. V., Dubosarsky V. G., Pugachev V. Yu., Pchelintseva S. V., Sokolov V. P. Technological processes of SNF reprocessing and fuel fabrication modeling by the ATEK platform. Heads of report on VIII Russian radiochemistry conference “Radiochemistry-2015”, Zheleznogorsk, 2015.

В рекомбинаторе при протекании через пористый катализатор происходят различные физико химические процессы, основными из которых являются экзотермическая химическая реакция окисления водорода на каталитических поверхностях рекомбинатора и конвективное течение газовой смеси через каталитический блок. Эти процессы определяют технические характеристики рекомбинатора, наиболее важной является производительность, измеряемая при заданном составе входящего газа.

Для проведения испытаний по определению диапазона концентраций водорода, в котором осуществляется режим беспламенной работы рекомбинатора при атмосферном давлении, повышенных температурах и влажностях, характерных для сценария тяжелых аварий на АЭС, используются камеры БМ-ЛР и БМ-П.

Камера БМ ЛР представляет собой внутреннюю камеру (пяти тонный железнодорожный контейнер), и внешний термос (слой минеральной ваты и стекломагнезитовая плита). Внутренняя камера обеспечивает герметичность, одна из стенок камеры для возможности видео фиксации результатов эксперимента закрыта листом поликарбоната, который вылетит при повышении давления во время воспламенения водорода и сохранит целостность металлической части камеры. Необходимая температура для проведения эксперимента поддерживается при помощи тепловых пушек.

Камера БМ П представляет собой стальной цилиндр высотой 4 м и диаметром 2 м. На стенках камеры имеются окна для возможности скоростной видеосъемки процессов конденсации и распространения пламени. Конструкция камеры позволяет сохранять герметичность при высоких давлениях, и способна выдерживать значительные взрывные нагрузки, возникающие вследствие воспламенения пароводяной смеси.

В работе представлены результаты расчетных исследований температурных полей камер БМ ЛР и БМ П при различных режимах работы рекомбинатора. Определены максимальные значения температуры, и поля скоростей газовой смеси, движущейся в камерах при работе рекомбинатора.

5-23

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ БМ П И БМ ЛР

А. А. Рякин, Е. С. Горбачева, О. В. Койнов,
М. В. Никольшин, О. С. Путилин

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

E-mail: artemryakin@mail.ru

В настоящее время в РФЯЦ – ВНИИТФ разрабатывается рекомбинатор водорода на основе высокопористых ячеистых материалов (пеноникель). Рекомбинатор служит для беспламенного сжигания водорода.

COMPUTATIONAL ANALYSIS OF THE THERMAL STATES OF “BM-P” AND “BM-LR” EXPERIMENTAL FACILITIES

A. A. Ryakin, E. S. Gorbachyova, O. V. Koynov,
M. V. Nikulshin, and O. S. Putilin

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

E-mail: artemryakin@mail.ru

Currently, RFNC – VNIITF scientists study hydrogen recombiner based on high-porosity cellular materials. The hydrogen recombiner is used for flameless hydrogen combustion. Hydrogen flowing through the porous catalyzer in the recombiner induces various physical

and chemical processes essentially including exothermal chemical reaction of hydrogen oxidation on recombiner catalyzing surfaces, and convective gas mixture flowing through the catalyzer unit. These processes determine recombiner technical characteristics among which the most important is the efficiency measured at the given input gas composition.

“BM-LR” and “BM-P” chambers are used for conducting experiments to estimate hydrogen concentration range within which the recombiner operates in a flameless mode under atmospheric pressure, high temperatures, and humidity that are characteristic for severe nuclear power station accidents [1, 2].

“BM-LR” chamber includes an internal chamber (five-tonnes railway container) and external thermally-insulated shell consisting of mineral wool layer and glass-magnesium plate. The internal chamber is air-tight, one of the walls being covered with a polycarbonate sheet to provide for video recording of experimental results. The sheet is pushed away when pressure increases during hydrogen ignition to preserve the integrity of the metal part of the chamber. Heat guns maintain the temperatures required for the experiments.

“BM-P” chamber is a steel cylinder 4 m high and 2 m in diameter. The windows on the walls of the chamber provide for high-rate video recording of condensation and flame propagation processes. The chamber is designed to keep air-tightness under high pressures and to bear substantial explosive loads produced by vapor-water mixture ignition.

The work gives the results of computational analysis of temperature fields for “BM-LR” and “BM-P” chambers under different recombiner operation modes. The maximum temperatures are identified, and velocity fields are determined for the gas mixture flowing within the chambers when the recombiner is in operation.

References

1. A. A. Ryakin, E. S. Gorbachyova, O. V. Koynov, M. V. Nikulshin, and O.S. Putilin, Computational Analysis of the Thermal States of “BM-P” and “BM-LR” Experimental Facilities, 2017, p. 1., p. 19 (Abstract, presentation for VI All-Russia Scientific and Practical Conference “Scientific Symposium of National Nuclear Research University – Moscow Engineering and Physics Institute (MEPhI), December 2017, Snezhinsk).
2. I. V. Lavrenyuk, V. A. Simonenko, and E. V. Bezgodov, Experimental Research on Stratification and Combustion of Hydrogen-Containing Vapor-Gas Mixtures, 2016, p. 1., p. 8 (Abstract, presentation for XIII Zababakhin Scientific Talks, March 2017, Snezhinsk).

5-24

РАЗРАБОТКА АБСОЛЮТНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНОСТИ ПЛОСКИХ РАДИОНУКЛИДНЫХ ИСТОЧНИКОВ БЕТА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Т. Е. Кузьмина, Е. В. Курышева, С. А. Пахомов,
В. В. Сидоров, Г. В. Шахетов

АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина»,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: vicsidorov@khlopin.ru

Задача разработки новых методов контроля характеристик промышленных радионуклидных источников актуальными и сегодня. К их числу относятся измерение активности высокоактивных поверхностных источников бета-излучения на основе ^{90}Sr и оценка однородности активного слоя. Традиционно, активность таких источников определяется по интенсивности тормозного излучения, а однородность с помощью сканирования поверхности с использованием коллимированного детектора. Однако, такие методы не обеспечивают требуемую точность, что обусловлено неопределенностью распределения активности внутри матрицы источника при ее насыщении раствором радионуклида.

Для решения этих задач в Радиевом институте были разработаны две установки: для измерения абсолютных значений их активности источника и для контроля его однородности.

Установка для измерения активности представляет собой специализированный сцинтилляционный бета-спектрометр на основе детектора с пластмассовым сцинтиллятором и длинного вакуумированного коллиматора, снабженного калиброванной диафрагмой, обеспечивающих приемлемую загрузку спектрометрического тракта (на уровне 10^3 – 10^4 имп/с) при измерении источников с активностью до 100 мКи по ^{90}Sr . На основе программы PENELOPE, позволяющая производить расчеты распространения электронов и фотонов с различных средах по методу Монте-Карло, была разработана математическая модель «эффективной толщины активного слоя». Измеренные спектры бета-частиц сравнивались с расчетными при разных параметрах модели. С помощью алгоритма многомерной оптимизации Хука-Дживса определялся оптимальный набор параметров, определялась эффективная толщина и оценивалось абсолютное значение активности.

В установке для контроля однородности реализован метод компьютерной автордиографии. Источник помещается вплотную к сцинтилляционному детектору (к пластинке йодистого цезия), которая просматривается электронно-оптической системой на основе КМОП матрицы. Полученное изображение передается в ПК и обрабатывается специальной программой. Программа производит суммирование значений яркости RGB пикселей и стоит изображение поверхности в условных цветах, отвечающих яркости

участков сцинтиллятора, соответствующей интенсивности излучения участков поверхности источника. В результате, обеспечивается возможность визуализации распределения активности по поверхности источника. Также, программа строит гистограмму частотного распределения уровней яркости и выдает числовую оценку однородности.

Применение этих установок обеспечивает десятикратное увеличение точности измерения активности, возможность массового (а не штучного) контроля однородности источников, снижение дозовой нагрузки на персонал при проведении выходного контроля.

DEVELOPMENT OF ABSOLUTE METHOD FOR MEASURING THE ACTIVITY OF FLAT BETA RADIONUCLIDE SOURCES

T. E. Kuzmina, E. V. Kuryшева, S. A. Pakhomov,
V. V. Sidorov, G. V. Chachetov

JSC "V. G. Khlopin Radium Institute", Saint-Petersburg,
Russia

E-mail: vicsidorov@khlopin.ru

The task of developing new methods for inspection the characteristics of industrial radionuclide sources is still relevant today.. These include measuring the activity of the highly active surface sources of beta radiation of ^{90}Sr and check of the homogeneity of the active layer. Traditionally, the activity of such sources is determined by the intensity of the bremsstrahlung radiation, and homogeneity by scanning the surface using a collimated detector. However, such methods do not provide the required accuracy, which is due to the uncertainty of the activity distribution inside the source matrix when it is saturated with a radionuclide solution.

To solve these problems, the Khlopin Radium Institute has developed two installations: to measure the absolute values of source activity and to control homogeneity.

The activity measurement installation is a specialized beta-scintillation spectrometer based on a detector with a polystyrene scintillator and a 2 meter vacuum collimator equipped with a calibrated diaphragm, providing an acceptable counting rate of the spectrometer (at level of 10^3 – 10^4 pulse/s) when measuring sources with activity of ^{90}Sr up to 100 mCi. The mathematical model of the "effective thickness of the active layer" on the basis of the program PENELOPE, which calculates the propagation of electrons and photons through different media by the Monte Carlo method, was developed. The measured beta-particle spectra were compared with the calculated spectra for different model parameters. The Hook-Jeeves algorithm of the multidimensional parameters optimization was used to determine the optimal set of parameters, to determine the effective thickness and to estimate the absolute value of activity.

The homogeneity check device is based on the computer radiography method. The source is placed close to the scintillation detector (to the plate of cesium iodide), which is viewed by an electron-optical system based on the CMOS matrix. The resulting image is transmitted to

the PC and processed by a special program. The program produces a summation of brightness values of the RGB pixels and calculates the surface image with gradient colors that correspond to the brightness of the scintillator corresponding to the radiation intensity of the source surface areas. As a result, providing the possibility of imaging the distribution of activity on the surface of the source. Also, the program calculates a histogram of the frequency distribution of brightness levels and provides a numerical estimation of uniformity.

The use of these installations provides a tenfold increase in the accuracy of activity measurement, the possibility of mass (not piece) check of the homogeneity of sources, reducing the dose burden on personnel during the output products control.

5-25

РЕЗУЛЬТАТЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ С ЦЕЛЬЮ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ТЯЖЕЛЫМ АВАРИЯМ НА АЭС С ВВЭР

Е. В. Безгодов, А. С. Иванов, В. М. Крюков,
В. А. Симоненко, О. В. Шульц, А. В. Павленко,
Д. В. Фролов, А. В. Ушков

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

Водород в химически чистом виде является преобладающим элементом во Вселенной, в нашей Галактике и даже в Солнечной системе. Но в естественных земных условиях он находится в связанном виде преимущественно в воде или в углеводах. В больших количествах водород образуется при тяжелых авариях (ТА) на АЭС с легководными реакторами (около 1 т на ГВт (э)). Взрывное окисление его может привести разгерметизации защитной оболочки АЭС и обусловить опасное радиоактивное заражение больших территорий. Задача предотвращения такой опасности является первостепенной на современном этапе развития ЯЭ.

Наш институт был привлечен к работам по этому направлению в 2010 г. В течение двух лет в сотрудничестве с НИЦ КИ, ИБРАЭ и ФЭИ был проанализирован уровень знаний и эффективность средств противодействия ТА у нас в стране и за рубежом и сформулированы предложения для исследований. Для параметров процессов, происходящих при ТА, было предложено провести экспериментальные исследования по определению концентрационного предела воспламенения (КПВ) водородосодержащих парогазовых составов (ВПГС) и динамические эксперименты по заполнению макетов помещений ЗО различными составами ВПГС и по горению их с целью создания матрицы верификации для перспективных CFD-кодов. Такая работа была выполнена в течение

2015–2016 гг. при взаимодействии с Московским АЭП (непосредственный заказчик), НИЦ КИ, ИБРАЭ, ОИВТАН и ИХФ. Для этого были адаптированы имеющиеся во ВНИИТФ экспериментальные установки КЭИП и МУТ и созданы новые БМ-П и БМ-Л. Первые две предназначены для исследования процессов воспламенения и горения, а третья и четвертая – для получения данных по различным режимам распространения ВПГС и горения его в таких условиях.

Для поверхности концентрационных пределов воспламенения ВПГС были получены данные для всего диапазона давлений и температур, характерных для ТА. Были получены высокоточные оптические данные о распространении волны горения в канале установки МУТ при вертикальной и горизонтальной ориентациях канала, включая эксперименты с перегородкой, для разных концентраций водорода в водородо-воздушной смеси. Получены также данные по заполнению помещений ЗО различными составами ВПГС и по развитию процессов горения в таких условиях при повышенных давлениях (БМ-П) и при атмосферном давлении (БМ-Л) (по пять серий экспериментов на каждой установке).

Результаты по КПВ используются при проектных работах. Результаты по остальным установкам используются при создании кодов нового поколения. Углубленный анализ результатов показал, что для уточнения выявленного рельефа КПВ и оценки режимов горения при учете влияния различных примесей в составе ВПГС целесообразно обеспечить более высокую точность измерений на установках КЭИП и МУТ. На установке МУТ целесообразно также обеспечить возможность работы с паром и при повышенных давлениях и температурах. Такая задача ставится в предлагаемой экспериментальной программе. Для экспериментов на установках БМ-П и БМ-Л, помимо повышения точности измерений, ставится задача получения системных данных по влиянию главных параметров, определяющих развитие процессов. Кроме того, производится доработка второй установки БМ-ЛУ, исключая образование щелей. Ставится также новая задача проверки масштабных эффектов на создаваемой установке УМ-П.

Параллельно с экспериментальными исследованиями предлагается программа работ по созданию программного комплекса для многопланового, многопроцессного математического моделирования заключительной стадии ТА с выходом, распространением и возможным горением ВПГС в помещениях ЗО. Эта работа выполняется в соответствии разрабатываемой в нашем институте идеологией создания мета-комплекса ЯРУС.

PURPOSES AND RESULTS OF THE STUDIES OF DYNAMIC PROCESSES IN HYDROGENOUS MEDIA AIMED AT SEVERE ACCIDENTS PREVENTION AT WWER-BASED NPP

E. V. Bezgodov, A. S. Ivanov, V. M. Krukov,
V. A. Simonenko, O. V. Shults, A. V. Pavlenko,
D. V. Frolov, A. V. Ushakov

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

Chemically pure hydrogen is the most widespread element in the Universe, Galaxy, and even Solar System. But in natural terrestrial environment it can be found mainly fixed in water or carbohydrates. Hydrogen is generated in large quantities in the course of the severe accidents (SA) at NPP having light-water reactors (about 1 ton per GW (e)). Hydrogen explosive oxidation can cause loss of sealing of the NPP protective shell and lead to radioactive contamination of a vast area. Mitigation of this hazard is the most urgent issue of contemporary nuclear power engineering.

Our Institute has been working on this problem since 2010. In the course of 2 years RFNC – VNIITF in cooperation with RRC “Kurchatov Institute”, Nuclear Safety Institute (Russian Academy of Sciences), and Institute of Physics and Power Engineering has analyzed available data on SA as well as the efficiency of the hazard mitigation measures in our country and in foreign states. In order to determine the parameters of the processes occurring during SA it was proposed to conduct experimental study of inflammability limit of hydrogenous gas-steam composition (HGSC) and dynamic experiments when protective shell chamber was filled with various HGSC compositions to study HGSC propagation and burning of these compositions. The main goal was to develop verification matrix for prospective CFD-codes. The work was done in 2015–2016 in cooperation with Moscow AEP (the customer), RRC “Kurchatov Institute”, Nuclear Safety Institute (RAS), OIВТАN, and N.N. Semenov Institute of Chemical Physics (RAS). CEIFES and MST facilities were redesigned for this purpose, and new facilities (BM-D and BM-L) were constructed. The first two of them are used to study ignition and burning processes, and the third and the fourth - to obtain data on various modes of HGSC propagation and its combustion under these conditions.

The data on concentration limits of HGSC ignition within the whole range of pressures and temperatures which are common for severe accidents were obtained. High-accuracy optical data were obtained. These data described combustion wave propagation in the MST channel when it was positioned vertically and horizontally, as well as experiments with the barrier; hydrogen concentration in hydrogen-air mixture was varied. We also obtained data on protective shell chamber filling with various HGS compositions and on combustion process evolution under elevated pressure (BM-D) and atmospheric pressure (BM-L) (each facility was used to conduct five series of the experiments).

The data on the inflammability limit are used in the design work. The results from the other facilities are used to design next gen codes. In-depth data analysis revealed the necessity of more accurate measurements for CEIFES and MST facilities in order to define more precisely the shape of inflammability limit and combustion modes taking into account the impact of various dopes in HGSC. It seems reasonable to allow for MST operation with steam and under elevated pressures and temperatures. The proposed experimental program is focused on the issue. Aside from the accuracy improvement BM-D and BM-L experiments are aimed at obtaining data on the effect of the main parameters which determine the process evolution. Which is more, the second facility is improved (BM-LA) and that will eliminate gaps. The new task is also considered that is to test scale effects using created RM-D.

In parallel with the experimental studies it is proposed to start the development of the code for multiaspect, multiprocessor math model of SA final stage including the outbreak, propagation, and probable burning of HGSC in the protective shell chambers. The work is done in accordance with the overall concept of the metacomplex called Yarus developed in VNIITF.

5-26

**РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ИСПЫТАНИЯ СЕРИЙНЫХ ОБРАЗЦОВ
РЕКОМБИНАТОРОВ СЖИГАНИЯ ВОДОРОДА
НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЕ
РФЯЦ – ВНИИТФ**

А. А. Тараканов, Е. В. Безгодков, Д. Л. Мошкин,
М. В. Никифоров, С. Д. Пасюков, И. А. Попов,
В. Г. Серебряк, Ю. С. Уфимцев, В. Н. Федюшкин

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

В большинстве стран, в том числе в России, принято и реализуется решение об оснащении действующих и строящихся АЭС системами аварийного беспламенного сжигания водорода – пассивными каталитическими рекомбинаторами водорода (ПКРВ), с целью предотвращения скопления водорода под защитной оболочкой реактора атомных электростанций.

До настоящего времени не существовало единых методик испытаний ПКРВ для определения и подтверждения их основных характеристик.

При разработке технологии и методик испытания был учтен опыт РФЯЦ – ВНИИТФ проведения экспериментальных программ по обоснованию водородной безопасности. Проведены испытания для подтверждения паспортных характеристик и выявления особенностей работы как опытных образцов ПКРВ, так и используемых в настоящее время на АЭС.

Для создания технологии испытания рекомбинаторов были разработаны и аттестованы методики

испытаний по определению основных характеристик ПКРВ и методики измерения:

- температуры;
- избыточного давления;
- объемной доли водяного пара;
- объемной доли водорода, кислорода и азота в непрерывном режиме;
- объемной доли водорода, кислорода и азота в дискретном режиме;
- относительной влажности водородосодержащей парогазовой смеси (ВПГС) в объеме камеры.

В результате данной работы была отработана и внедрена технология проведения испытаний серийных образцов рекомбинаторов, а также создан аттестованный испытательный стенд, позволяющий проводить эксперименты с ВПГС при температуре до 200°C и давлении до 0,5 МПа.

**THE DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION
OF A TECHNOLOGY
OF TESTING SERIAL SAMPLES
OF HYDROGEN BURNING RECOMBINERS
AT RFNC – VNIITF EXPERIMENTAL BASIS**

A. A. Tarakanov, E. V. Bezgodov, D. L. Moshkin,
M. V. Nikiforov, S. D. Pasyukov, I. A. Popov,
V. G. Serebryak, Yu. S. Ufimtsev, V. N. Fedyushkin

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

Many countries, including Russia, has adopted and are in the process of implementation of the decision to equip existing NPPs and those under construction with the systems of emergency fire-free hydrogen burning, also known as passive catalytical hydrogen recombiners (PCHR). The measure is taken to prevent hydrogen accumulation under protective reactor shell at NPPs.

Up to now there was no technique for testing PCHR in order to determine and confirm main characteristics.

In the course of recombiner testing technology development, consideration was given to RFNC – VNIITF experience in conducting hydrogen safety substantiation programs. The experiments were performed to confirm specifications and peculiar features of both PCHR test prototypes, and those that are currently used at NPPs.

In order to create the technology for recombiner testing, PCHR main parameters testing techniques were developed and certified as well as the methods of measuring:

- temperature;
- excessive pressure;
- volume fraction of water vapor;
- volume fraction of hydrogen, oxygen and nitrogen on a continuous basis;
- volume fraction of hydrogen, oxygen and nitrogen on a discrete basis;
- relative humidity of hydrogen-containing vapor-gas mixture (HVGM) in chamber volume.

As a result of this work, RFNC – VNIITF specialists developed and implemented the commercial recombiners testing technology and built certified facility that permits

to conduct experiments with HVGM when the temperature reaches up to 200°C and pressure – up to 0.5 MPa.

5-27

**ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ОПЕРАЦИИ ОБРАЩЕНИЯ С РАО НА МФР
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ОПТИМИЗАЦИОННОГО МОДУЛЯ ПК ВИЗАРТ**

Л. Р. Файрушина, А. А. Рыкунова,
И. Р. Макеева, В. Ю. Пугачёв

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

E-mail: fayrushinalr@vniitf.ru

При разработке технологий замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) возникает проблема эффективного обращения с образующимися радиоактивными отходами (РАО). Для оценки эффективности целесообразно использовать экономический критерий – стоимость передачи РАО на захоронение национальному оператору, на которую влияют класс РАО и его конечный объем. Поэтому экономически более выгодным может быть минимизация объемов конечных форм РАО в пределах установленных классов или переход к формированию РАО другого класса, но с существенным уменьшением объема образующихся отходов (если это достижимо в рамках требований безопасности производства).

Разрабатываемый в РФЯЦ – ВНИИТФ программный комплекс (ПК) ВИЗАРТ [1] предназначен для математического моделирования и оптимизации, как отдельных технологических процессов замыкающей части топливного цикла (переработка отработавшего ядерного топлива, рефабрикация топлива и обращение с РАО, включая захоронение), так и технологий ядерного топливного цикла в целом. В состав ПК ВИЗАРТ входит специализированная подсистема [2], позволяющая оптимизировать технологические параметры математическими методами. Эта подсистема в совокупности с результатами расчетов материального баланса позволяет находить наилучшее соотношение РАО разных степеней активности.

В работе представлены описание и результат оптимизационного расчета затрат на обращение с РАО от фабрикация смешанного нитридного уран-плутониевого топлива:

– без дополнительных стадий выделения трансураниевых элементов (ТУЭ) из жидких радиоактивных отходов (ЖРО),

– с учетом доизвлечения ТУЭ из ЖРО.

В качестве критерия оптимизации выбрана стоимость захоронения РАО, в качестве варьируемых параметров – концентрация плутония в исходном потоке ЖРО и степень упаривания.

Литература

1. Шмидт О. В., Макеева И. Р., Ливенцов С. Н. Моделирование технологических переделов ЗЯТЦ, как инструмент при создании и оптимизации технологических производств. // Радиохимия, 2016, т. 58, N 4, с. 316–323.
2. Makeyeva I. R., Rykunova A. A., Dubosarsky V. G., Pugachev V. Yu., Shmidt O. V., Evsyukova Yu. A. 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.

**THE CHOICE OF RADIOACTIVE WASTE
TREATMENT OPERATION TECHNOLOGICAL
PARAMETERS AT FABRICATION/
REFABRICATION MODULE WITH USING
OPTIMIZATION MODULE OF SOFTWARE
PACKAGE VIZART**

L. R. Fayrushina, A. A. Rykunova,
I. R. Makeeva, V. Yu. Pugachev

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

E-mail: fayrushinalr@vniitf.ru

Development of nuclear fuel cycle closing (NFCC) technology leads to the problem of effective radioactive waste treatment. The cost of radioactive waste transfer to national operator for disposal which depend on radioactive waste class and it finite volume is economic criterion that appropriate to use for efficiency estimating. Therefore finite forms radioactive waste volumes minimization within established classes or radioactive waste formation of another class but with essential waste volume reduction can appear economically more advantageous (if it's available within the limits of production safety).

The software package VIZART [1] developed at RFNC – VNIITF is intended for mathematical modeling and optimization of separate NFCC technological processes (spent nuclear fuel reprocessing, fuel refabrication and radioactive waste treatment including disposal) and nuclear fuel cycle technologies in whole. The software package VIZART includes the specialized subsystem [2] that allows to optimize technological parameters by means of mathematical methods. This subsystem enables to find the best correlation of radioactive waste with different degree of activity taking into account results of material balance calculation.

Description and result of optimization calculate costs of radioactive waste treatment from fabrication of mixed uranium-plutonium nitride fuel are presented in the report:

– without additional stages of transuranium elements extraction from liquid radioactive waste,

– with a glance of additional recovery of transuranium elements from liquid radioactive waste.

The cost of radioactive waste disposal was chosen as optimization criterion, while plutonium concentrations in initial flow of liquid radioactive waste and degree of evaporation were selected as varying parameters.

References

1. O. V. Schmidt, I. R. Makeyeva, S. N. Liventsov. Modeling technology stages of NFCC as a tool for creation and optimization of technology production. // *Radiochemistry*, 2016, v. 58, N 4, p. 316–323.
2. Makeyeva I. R., Rykunova A. A., Dubosarsky V. G., Pugachev V. Yu., Schmidt O. V., Evsyukova Yu. A. 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.

5-28

**ГИБРИДНАЯ РЕАКТОРНАЯ УСТАНОВКА
С Th-Pu-U ОКСИДНЫМ ТОПЛИВОМ
И ПЛАЗМЕННЫМ ИСТОЧНИКОМ
НЕЙТРОНОВ**

А. В. Аржанников¹, С. В. Беденко², А. А. Иванов¹,
Д. Г. Модестов³, В. В. Приходько¹, С. Л. Синицкий¹,
И. В. Шаманин², В. М. Шмаков³, Е. В. Серова³,
Н. В. Степанов³, А. М. Титова³

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера, СО РАН,
Москва, Россия

²Национальный исследовательский томский
политехнический университет, Томск, Россия

³Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е. И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: v.m.shmakov@vniitf.ru

Для изучения нейтронно-физических характеристик сырьевого ториевого топлива, ранее нами была предложена установка [1–4], состоящая из подкритической сборки высокотемпературного ядерного реактора и источника дополнительных нейтронов в виде плазменного столба, пронизывающего эту сборку. Дополнительные нейтроны генерируются в результате реакции D-D-синтеза в столбе высокотемпературной плазмы, которая создается и удерживается в длинной магнитной ловушке. В статье представлены результаты компьютерного моделирования эволюции ядерного топлива в предложенной установке. Моделирование проводилось для параметров плазмы, при которых реакция D-D-синтеза дает суммарный выход $N = 2 \times 10^{16}$ нейтронов в секунду из плазменного столба внутри подкритической сборки длиной 3 метра. Рассмотрены несколько вариантов состава топливной сборки, отличающиеся содержанием плутония и низкообогащенного урана в исходном ториевом топливе. Эволюция изотопного состава топлива рассчитывалась за все время эксплуатации сборки – 3000 дней. В докладе приведены результаты моделирования по комплексу программ ПРИЗМА+РИСК [4, 5] и обсуждаются различные аспекты полученных расчетных исследований.

Литература

1. I. Shamanin, S. Bedenko et al. “Gas-Cooled Thorium Reactor with Fuel Block of the Unified Design”, *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 1084, pp. 275–279 (2015).

2. A. V. Arzhannikov, A. B. Anikeev, A. D. Beklemishev et al., “Subcritical Assembly with Thermonuclear Neutron Source as Device for Studies of Neutron-physical Characteristics of Thorium Fuel”. *AIP Conference Proceedings* 1771, 090004 (2016); doi: 10.1063/1.4964246
3. Д. В. Юров, А. В. Аржанников. «Расчет параметров источника нейтронов на основе длинной магнитной ловушки для проекта стенда, предназначенного для отработки режимов рабочего цикла подкритических топливныхборок» // Отчет о проведенных расчетах с использованием ресурсов информационно-вычислительного центра НГУ, 5 стр. (2016).
4. О. В. Зацепин, Я. З. Кандиев, Е. А. Кашаева, Г. Н. Малышкин, Д. Г. Модестов. Расчеты методом Монте-Карло по программе ПРИЗМА нейтронно-физических характеристик активной зоны ВВЭР-1000 // *ВАНТ, Сер. Физика ядерных реакторов*, 2011, вып. 4, с. 64–74.
5. Д. Г. Модестов «Компьютерная программа РИСК-2014 для решения задач ядерной кинетики» Препринт РФЯЦ – ВНИИТФ № 243, Снежинск, 2014.

**A HYBRID REACTOR FACILITY
WITH Th-Pu-U-OXIDE FUEL
AND A PLASMA NEUTRON SOURCE**

A. V. Arzhannikov¹, S. V. Bedenko², A. A. Ivanov¹,
D. G. Modestov³, V. V. Prikhodko¹, E. V. Serova³,
S. L. Sinitzky¹, N. V. Stepanov³, A. M. Titova³,
I. V. Shamanin², V. M. Shmakov³

¹Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Tomsk National Polytechnic Research University,
Tomsk, Russia

³Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: v.m.shmakov@vniitf.ru

For studying neutronics of raw thorium fuel, we earlier [1–4] proposed a hybrid facility of a subcritical high-temperature reactor assembly and a plasma neutron source which strikes through the reactor and produces additional neutrons. The additional neutrons come from the D-D synthesis reaction in high-temperature plasma which is generated and contained in a lengthy magnetic trap. The paper presents calculated results on the evolution of fuel in the facility. Our calculations are done for the plasma parameters which allow getting 2×10^{16} neutrons per second in a subcritical assembly 3 m long. Concentrations of plutonium and low-enriched uranium in the initial fuel are varied. The evolution of fuel composition was calculated over the entire period of assembly operation – 3000 days. The PRIZMA+RISK [4, 5] code package was used for calculations. Different aspects of the calculations are discussed.

References

1. I. Shamanin, S. Bedenko et al, Gas-cooled thorium reactor with fuel block of the unified design. *Advances in Materials Science and Engineering*, V. 1084, P. 275–279 (2015).
2. A. V. Arzhannikov, A. B. Anikeev, A. D. Beklemishev et al, Subcritical assembly with thermonuclear neutron source as

device for studies of neutron-physical characteristics of thorium fuel. AIP Conference Proceedings 1771, 090004 (2016); doi: 10.1063/1.4964246

3. D. V. Yurov, and A. V. Arzhannikov, Calculation of parameters of a lengthy-magnetic-trap-based neutron source to be used in a prototype facility for adjusting the modes of the subcritical fuel assembly operation cycle. Report on calculations with use of computer resources available at the Novosibirsk State University's Information and Computing Center, 5 pages (2016).

4. O. V. Zatsepin, Y. Z. Kandiev, E. A. Kashayeva, G. N. Malyskin, and D. G. Modestov, Monte Carlo calculations of VVER-1000 reactor core neutronics by the code PRIZMA. J. VANT, Physics of Nuclear Reactors Series, Is. 4, P. 64–74, 2011.

5. D. G. Modestov, RISK code for nuclear kinetics calculations. RFNC – VNIITF Preprint #243, Snezhinsk, 2014.

5-29

КРИТИЧНОСТЬ СИСТЕМЫ И ЕЕ ОТДЕЛЬНЫХ ЧАСТЕЙ

В. М. Шмаков

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

E-mail: v.m.shmakov@vniitf.ru

В докладе рассмотрено несколько методов расчета интенсивности размножения нейтронов $N(t) = N_0 \exp(\lambda t)$ с временной постоянной λ для систем с неподвижной геометрией.

На примере задачи на собственные значения (СЗ) и собственные функции (СФ) для сферы с вакуумной полостью, показаны особенности подхода к расчету λ системы и ее отдельных частей. При этом использованы точные аналитические решения этой задачи, полученные в приближении вперед–назад.

Для расчета λ предложен метод баланса, в котором используются спектральные микроскопические сечения воспроизводства нейтронов из библиотек ядерных данных системы константного обеспечения КОБРА. Показано полное совпадение расчетов λ системы методом баланса с расчетами полученными методом установления (динамическая λ) и методом Келлога (статическая λ).

Для неподвижных систем показано, что λ полной системы можно получить в расчете интенсивности размножения нейтронов в отдельной части системы. Для этого надо вычислить полное число нейтронов (N), полное воспроизводство нейтронов (B), результирующий ток нейтронов (J) через поверхность этой выделенной части системы и использовать выражение $\lambda = (B - J)/N$.

Для модифицированного метода установления предложена комбинация вычисления динамической λ_1 с дополнительным «временным поглощением» λ_2/v или дополнительным «временным размножением» $-\lambda_2/v$. В результате искомая интенсивность размно-

жения нейтронов λ_0 вычисляется как сумма динамической интенсивности размножения нейтронов λ_1 и дополнительной λ_2 , то есть $\lambda_0 = \lambda_1 + \lambda_2$.

Для расчетов Монте–Карло эффективного коэффициента размножения нейтронов Кэфф методом поколений предложен подход по нормализации пакета нейтронов, который позволяет поддерживать число нейтронов каждого последующего поколения на уровне начального числа нейтронов в пакете.

Некоторые утверждения из доклада были протестированы по программам Монте–Карло. Показано полное согласие одnogрупповых расчетов λ по программам ПРИЗМА и COG с аналитическими решениями, полученными в рамках приближения вперед–назад.

Расчеты λ шаров из ^{235}U методом баланса по программе ПРИЗМА со спектральными константами БАС и ENDF/B–V показали, что использование сечений воспроизводства вполне приемлемо по точности и эффективности.

Литература

1. Dermott E. Cullen, “Static and Dynamic Criticality: Are They Different?”, UCRL-TR-201506 (November 2003).
2. Edward M. Lent, Three Analytic Benchmarks in COG, LLNL-TR-648225, 2014
3. В. М. Шмаков, Приближение вперед–назад в теории переноса нейтронов // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 2016. Вып. 4. С. 29–40.
4. V. M. Shmakov, Back-and-forth approximation as a simple neutron transport model, Proc. The International Cooperation in Nuclear Criticality Safety, ICNC-2015, Charlotte, North Carolina, USA, September 14–18, 2015, # 14607.
5. Я. З. Кандиев, Э. С. Куропатенко, Г. В. Лукин, Е. И. Черепанова, В. М. Шмаков. Библиотеки системы константного обеспечения расчетов КОБРА. Использование библиотек ENDL, ENDF. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1986. Вып. 1. С. 45–47

CRITICALITY OF A SYSTEM AND ITS COMPONENTS

V. M. Shmakov

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin Institute of
Applied Physics

E-mail: v.m.shmakov@vniitf.ru

The paper considers some methods to calculate the time constant λ (α eigenvalue) for systems with stationary geometry.

Solving as an example the eigenvalue and eigenfunction problem for a sphere with a vacuum cavity, we show philosophy of our approach to the calculation of λ for a system and its individual components using the exact analytical solutions obtained in back-and-forth approximation.

We propose a balance method which uses continuous-energy microscopic neutron reproduction cross-sections from the COBRA library of evaluated nuclear data. Results of λ calculation by the method are shown to agree

with those obtained by the relaxation (dynamic λ) and Kellog (static λ) methods.

For stationary systems, it is shown that λ for the entire system can be calculated from λ 's calculated for its individual components. For this end we need to calculate the total neutrons N , the total neutron reproduction B , the resultant neutron current J through the surface of the component, and then use the equation $\lambda = (B - J)/N$.

For a modified relaxation method, we propose a combined calculation of a dynamic λ_1 and an additional "time absorption" λ_2/ν or "time multiplication" $-\lambda_2/\nu$. Then the sought value λ_0 is found as a sum of the dynamic λ_1 and additional λ_2 , i.e., $\lambda_0 = \lambda_1 + \lambda_2$.

For the Monte Carlo calculation of the effective neutron multiplication factor K_{eff} by the method of generations, we propose a neutron batch normalization approach which helps keep the number of neutrons in each next generation close to the initial number of neutrons in the batch.

Some statements made in the paper are tested in Monte Carlo calculations. One-group λ calculations by the codes PRIZMA and COG agree well with analytical solutions in back-and-forth approximation.

Calculations of λ for spheres of ^{235}U by the balance method implemented in PRIZMA and with continuous-energy data from BAS and ENDF/B-V libraries show that the use of neutron reproduction cross-sections is quite acceptable in accuracy and efficiency.

References

1. Dermott E. Cullen, Static and Dynamic Criticality: Are They Different? UCRL-TR-201506 (November 2003).
2. Edward M. Lent, Three Analytic Benchmarks in COG, LLNL-TR-648225, 2014
3. V. M. Shmakov, Back-and-forth approximation in neutron transport theory. J. VANT, Theoretical and Applied Physics Series, 2016, Is. 4, P. 29–40.
4. V. M. Shmakov, Back-and-forth approximation as a simple neutron transport model. Proc. International Cooperation in Nuclear Criticality Safety, ICNC-2015, Charlotte, North Carolina, USA, September 14–18, 2015, # 14607.
5. Y. Z. Kandiev, E. S. Kuropatenko, G. V. Lukin, E. I. Cherepanova, and V. M. Shmakov, COBRA nuclear data library: The use of ENDL and ENDF libraries. J. Problems in Nuclear Science and Technology, Methods and Codes for Numerical Solution of Mathematical Physics Problems Series, 1986, Is. 1, P. 45–47.

5-30

ОЦЕНКА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЯТЦ

О. В. Шульц, И. Р. Макеева,
А. А. Рыкунова, И. В. Пешкичев

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

E-mail: O.V.Shults@VNIITF.ru

При моделировании технологических процессов ядерного топливного цикла часто возникает проблема недостатка данных по свойствам отдельных веществ. С другой стороны, свойства ряда похожих соединений могут быть известны. Разработана математическая модель для оценки неизвестных данных по свойствам веществ на основе корреляций с известными. В основе модели лежит подход QSPR (quantitative structure-property relationship) с использованием фрагментарных дескрипторов – переменных, обозначающих меры различных признаков соединения. В рамках модели было определено два типа дескрипторов – соответствующих, собственно, фрагментам и соседству фрагментов. Фрагменты определялись как группы связанных атомов, соответствующие подграфам, полученным удалением из исходного графа всех ребер, не связанных с концевыми вершинами. Дескрипторы соседства соответствовали парам фрагментов-соседей.

Описанная модель была использована для оценки термодинамических свойств ряда нитратов актинидов, справочные данные по которым отсутствуют. Полученные с помощью модели данные были использованы для определения температурно-временного режима процесса получения оксидов актинидов, который является одной из технологических стадий переработки ОЯТ БР. Для получения наиболее равномерного распределения малых актинидов в составе оксида процесс планируется проводить путем СВЧ-денитриации. Для математического моделирования такого процесса необходимы данные по термодинамическим свойствам всех реагентов и продуктов реакции.

С помощью модели были получены энтальпии и теплоемкости нитратов америция, кюрия и нептуния. С использованием этих оценок, а также справочных данных по остальным реагентам и продуктам процесса был определен требуемый температурно-временной режим процесса.

Модель была протестирована на большой выборке справочных данных по термодинамическим свойствам индивидуальных веществ. В работе [1] показано, что относительная ошибка получаемых с использованием модели оценок лежит в пределах 5%.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-01-00873

Литература

1. Модель для оценки термодинамических свойств соединений. О. В. Шульц. Труды конференции РКТС-15, Москва, 15–17 октября 2018 г. с. 144.

**EVALUATION OF THERMODYNAMICAL
PROPERTIES OF PURE SUBSTANCES
FOR THE NUCLEAR FUEL CYCLE
TECNOLOGICAL PROCESSES SIMULATION**

O. V. Shults, I. R. Makeyeva,
A. A. Rykunova, I. V. Peshkichev

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

E-mail: O.V.Shults@VNIITF.ru

In the course of developing technological processes of the nuclear fuel cycle simulations often appears the problem of substances properties missing data. On the other hand, a lot of alike substances properties can be well known. The mathematical model was developed for missing data evaluation using known data correlations. The model is based QSPR (Quantitative Structure-Property/Activity Relationship) approach with fragmental descriptors. Model used two types of descriptors – corresponding to molecular fragments and to fragments neighborhood. As fragments within the model, it is proposed to use groups of coupled atoms corresponding to subgraphs obtained by removing from the initial graph all edges not connected with terminal vertices. The neighborhood descriptors corresponds to the occurrence of neighbor fragments pairs.

One of the technological stages of fast reactors spent nuclear fuel reprocessing is the preparation of actinides oxides. The most uniform distribution of the minor actinides in the oxides bulk can be reached by the way of microwave denitration. The thermodynamical data about all reactants and products of the reaction are needed for the temperature-time regime determination. Since the properties of some actinides nitrides are unknown, the model was used to evaluate the missing data.

The values of enthalpies and heat capacities of americium, curium and neptunium nitrates were evaluated. The required temperature-time regime was calculated using evaluated values and reference data.

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 17-01-00873.

5-31

**МЕТОДИКИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ УЧЕТА
И КОНТРОЛЯ В РФЯЦ – ВНИИТФ**

И. И. Костенко, А. А. Юдов, Ю. А. Соколов

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

РФЯЦ – ВНИИТФ в целях учета и контроля ядерных материалов (УиК ЯМ) ведет работы по разработке и аттестации методик неразрушающего контроля делящихся материалов.

Применение измерительного оборудования для проведения подтверждающих измерений характе-

ристик делящихся материалов должно проводиться по аттестованным методикам с применением метрологически аттестованных приборов. Для аттестации методик и средств измерений необходимо проведение подтверждающих измерений с использованием стандартных образцов (СО).

В докладе рассматриваются вопросы разработки и аттестации методик неразрушающего контроля, основанных на регистрации нейтронного и гамма-излучений и предназначенных для подтверждения: вида, состава и массы делящихся материалов.

**THE TECHNIQUES OF NUCLEAR MATERIALS
NONDESTRUCTIVE CONTROL
FOR THE PURPOSES OF CONTROL
AND ACCOUNTABILITY AT RFNC – VNIITF**

I. I. Kostenko, A. A. Yudov, Yu. A. Sokolov

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

For the purposes of control and accountability of nuclear materials (C&A NM), RFNC – VNIITF performs activities on the development and certification of nondestructive control techniques for fissile materials.

Application of measuring equipment for conducting confirming measurements of characteristics of fissile materials is to be performed according to certified methods using metrologically certified devices. For certifying the techniques and means of measurements, it is necessary to conduct confirming measurements using standard samples (SS).

The presentation considers the issues of the development and certification of the techniques of nondestructive control based on registration of neutron and gamma radiation that are suitable for confirmation: type, content and mass of fissile materials.

Секция 6

**ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ,
ПРОГРАММЫ И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ**

Section 6

**NUMERICAL METHODS, ALGORITHMS,
CODES AND ACCURATE SOLUTIONS**

АДАПТАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ И ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА ЭРОЗИИ ДЛЯ ЗАДАЧ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО УДАРА

П. А. Радченко, С. П. Батуев, А. В. Радченко

Томский государственный архитектурно-строительный
университет, Томск, Россия

E-mail: radchenko@live.ru

В работе авторами предложен алгоритм, позволяющий адекватно описывать разрушение материалов и конструкций при импульсных нагрузках. Рассматривается методика перестроения конечно-элементной сетки с пересчетом сосредоточенных масс в узлах. Алгоритм в полной мере использует все возможности современных параллельных вычислений и легко масштабируется для любых возможных задач. Численная методика показывает хорошее качественное и количественное сравнение с экспериментальными данными.

MESH ADAPTATION AND APPLICATION OF EROSION ALGORITHM TO THE HIGH-SPEED IMPACT PROBLEMS

P. A. Radchenko, S. P. Batuev, A. V. Radchenko

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk,
Russia

E-mail: radchenko@live.ru

In this work, the authors propose an algorithm to adequately describe material and structural damage under the impulse loading. Remeshing procedure including recalculation of lumped masses in the nodes is considered. The algorithm takes full advantage of up-to-date parallel computations and is easily scaled to any possible problem. The procedure demonstrates good qualitative and quantitative agreement with experimental data.

ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ВОСХОДЯЩИХ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

С. П. Баутин, И. Ю. Крутова, А. Г. Обухов

Снежинский физико-технический институт НИЯУ МИФИ,
Снежинск, Россия

E-mail: sbautin@usurt.ru

Данная газодинамическая теория основана на предложенной С. П. Баутиным [1] схеме возникновения и устойчивого функционирования восходящих закрученных потоков, встречающихся в природе в виде торнадо, тропических циклонов и огненных вихрей. В докладе приведены результаты полученных теоретических [1–4] и экспериментальных [5, 6] исследований. Впер-

вые даны обоснованные ответы на самые главные вопросы, связанные с природными восходящими закрученными потоками: «Что является причиной возникновения закрутки в этих потоках? Откуда берется энергия на продолжительное самоподдерживающееся движение торнадо и тропических циклонов, приводящее к большим разрушениям и человеческим жертвам?».

В аналитическом виде и численно (включая трехмерные нестационарные расчеты) построены решения системы уравнений газовой динамики и полной системы уравнений Навье–Стокса при учете действия силы Кориолиса, моделирующие течения воздуха в восходящих закрученных потоках. Все эти решения согласуются с данными натурных наблюдений за указанными природными воздушными течениями. Доказаны математические теоремы о возникновении закрутки газа и о направлении этой закрутки в исследуемых потоках и ее отсутствие при не учете вращения Земли вокруг своей оси. В том числе доказана ошибочность предложения не учитывать влияния вращения Земли вокруг своей оси на те течения, для которых число Россби много больше единицы.

С использованием построенных решений установлено, что часть кинетической энергии вращения Земли вокруг своей оси переходит в кинетическую энергию окружного движения в исследуемых течениях. И нет другого источника энергии для создания и поддержания окружного движения в этих природных потоках. Анализ геометрических, скоростных и энергетических характеристик рассматриваемых течений показал следующее: разрушительный характер имеют те, наблюдаемые в природе торнадо, у которых кинетическая энергия окружного движения в придонной части больше кинетической энергии радиального движения воздуха в этой части потока.

Высказаны рекомендации по практическому использованию полученных результатов: по раннему обнаружению торнадо [7] и по уничтожению торнадо и тропических циклонов с разумными энергетическими затратами [7, 8], а также по созданию по созданию вихревого энергогенератора, вырабатывающего электрическую энергию за счет кинетической энергии вращения Земли вокруг своей оси [9].

Литература

1. Баутин С. П. Торнадо и сила Кориолиса. Новосибирск: Наука, 2008. 80 с.
2. Баутин С. П., Обухов А. Г. Математическое моделирование разрушительных атмосферных вихрей. – Новосибирск: Наука, 2012. 152 с.
3. Баутин С. П., Крутова И. Ю., Обухов А. Г., Баутин К. В. Разрушительные атмосферные вихри: теоремы, расчеты, эксперименты. Новосибирск: Наука, 2013. 216 с.
4. Баутин С. П., Дерябин С. Л., Крутова И. Ю., Обухов А. Г. Разрушительные атмосферные вихри и вращение Земли вокруг своей оси. Екатеринбург: УрГУПС, 2017. 336 с.
5. Баутин К. В., Баутин С. П., Макаров В. Н. Экспериментальное подтверждение возможности создания потока воздуха, закрученного силой Кориолиса // Вестник УрГУПС. 2013. № 2(18). С. 27–33.

6. Баутин С. П., Макаров В. В. Создание потока воздуха, закрученного силой Кориолиса при использовании трубы двухметрового диаметра // Вестник УрГУПС. 2016. № 4 (32). С. 39–45.
7. Баутин С. П., Крутова И. Ю., Обухов А. Г. Проблема предсказания и уничтожения смерча // Технологии гражданской безопасности. 2016. Том 13. № 1 (47). С. 70–75.
8. Баутин С. П., Баутин П. С., Баутина А. С. Способ управления восходящим закрученным потоком воздуха для прекращения его движения. Патент РФ 2407281, МПК А01G15/00. Заявка 2009114525 от 16.04.2009. Опубликовано 27.12.2010 Бюллетень № 365.
9. Баутин С. П., Макаров В. Н. Способ преобразования энергии вращения Земли в дополнительную кинетическую энергию потока сплошной среды и устройство для его осуществления. Заявка на изобретение. Бюллетень № 15. 27.05.2014.

GASDYNAMIC THEORY OF THE ASCENDING SWIRLING FLOWS AND ITS USE

S. P. Bautin, I. Yu. Krutova, A. G. Obuhov

Snezhinsk physical technical Institute MEPhI, Snezhinsk, Russia

E-mail: sbautin@usurt.ru

This gas-dynamic theory is based on the scheme proposed by S. P. Bautin [1] for the emergence and stable functioning of upward swirling flows occurring in nature in the form of tornadoes, tropical cyclones and fire vortices. The report presents the results of theoretical [1–4] and experimental [5, 6] studies. For the first time, reasonable answers to the most important questions related to natural upward swirling flows are given: “what is the cause of the twist in these flows? Where does the energy for the long-term self-sustaining movement of tornadoes and tropical cyclones, leading to great destruction and loss of human life?”.

In analytical form and numerically (including three-dimensional unsteady calculations) solutions of the system of gas dynamics equations and the complete system of Navier-Stokes equations are constructed taking into account the action of the Coriolis force, simulating air flows in upward swirling flows. All these decisions are consistent with the data of field observations of these natural air currents. Mathematical theorems on the origin of the gas twist and the direction of this twist in the studied flows and its absence in case of not taking into account the rotation of the Earth around its axis are proved. In particular, proved the fallacy of the proposal not to take into account the influence of the earth's rotation around its axis on those currents for which the Rossby number is much greater than one.

Using the constructed solutions, it was found that part of the kinetic energy of the earth's rotation around its axis passes into the kinetic energy of the circumferential motion in the studied flows. And there is no other source of energy to create and maintain circumferential motion in these natural flows. Analysis of geometric, velocity and energy characteristics of the considered flows showed the following: those observed in the nature of tornadoes have

destructive character, in which the kinetic energy of the circumferential motion in the bottom part is greater than the kinetic energy of the radial motion of air in this part of the flow.

Recommendations on the practical use of the results are made: on the early detection of tornadoes [7] and on the destruction of tornadoes and tropical cyclones with reasonable energy costs [7, 8], as well as on the creation of a vortex energy generator that produces electric energy due to the kinetic energy of the earth's rotation around its axis [9].

References

1. Bautin S. P., the Tornado and the Coriolis force. Novosibirsk: Science, 2008. 80 p.
2. Bautin, S. P., Obuhov, A. G. Mathematical modeling of destructive atmospheric vortices. – Novosibirsk: Science, 2012. 152 p.
3. Bautin S. P., Krutova I. Yu., Obuhov A. G., Bautin K. V. Destructive atmospheric vortices: theorems, calculations, experiments. Novosibirsk: Science, 2013. 216 p.
4. Bautin S. P., Deryabin S. L., Krutova I. Yu., Obuhov A. G. Destructive atmospheric vortices and the rotation of the Earth around its axis. Ekaterinburg USURT, 2017. 336 p.
5. K. V. Bautin, Bautin S. P., Makarov V. N. Experimental confirmation of the possibility of creating air flow, swirling the Coriolis force // Vestnik URGUPS. 2013. № 2 (18). P. 27–33.
6. Bautin S. P., Makarov V. V. Creation of air flow twisted by the Coriolis force when using a two-meter diameter pipe. Vestnik URGUPS. 2016. № 4 (32). P. 39–45.
7. Bautin, S. p., Krutova, I. Yu., Obuhov, A. G. the problem of predicting the destruction of tornado // Technologies of civil security. 2016. Volume 13. No. 1 (47). P. 70–75.
8. Bautin S. P., S. P. Bautin, Bautin A. S. control Method upward swirling flow of air to stop his movements. RF patent 2407281, IPC A01G15 / 00. Bid 2009114525 from 16.04.2009. Published 27.12.2010 Bulletin № 365.
9. Bautin S. P., Makarov V. N. A method of converting the energy of the earth's rotation into additional kinetic energy of the continuous medium flow and a device for its implementation. Application for invention. Bulletin No. 15. 27.05.2014.

6-3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ В ВОСХОДЯЩИХ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛНОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА

С. П. Баутин¹, С. Н. Кононов^{1,2}, Э. С. Левунина^{1,3}

¹СФТИ НИЯУ МИФИ, Снежинск, Россия

²Южно-Уральский государственный университет, Озёрск, Россия

³ФГУП «ПО «Маяк», Озёрск, Россия

E-mail: SBautin@usurt.ru

Рассматривается полная система уравнений Навье-Стокса в цилиндрических координатах. Решение системы пяти уравнений описывает возникновение

и функционирование восходящих закрученных потоков с учетом сил тяжести и Кориолиса [1], а так же свойства вязкости и теплопроводности газа. Рассматриваются уравнение неразрывности для сжимаемого газа, три скалярных уравнения для составляющих скорости воздуха и уравнение энергии. Давление выражено через плотность и температуру, что позволило исключить уравнение состояния из системы. Движение воздуха в предложенной модели находится численными методами. Используется явная разностная схема. Поскольку предполагалось большое количество узлов сетки для реализации численного метода, использовалось распараллеливание вычислительного процесса для расчета на распределенной системе. Счет для следующего временного слоя велся одновременно в нескольких частях моделируемого объема воздуха. Обмен состояниями на границах рассматриваемых объемов осуществлялся по стандартам MPI. Проверка правильности реализации схемы производилась расчетами для состояния покоя, для которого известно точное решение системы. Результаты счета показали удовлетворительное совпадение с теоретическими выкладками. Данная числовая схема может быть использована в дальнейшем для моделирования восходящих закрученных потоков.

Литература

1. Разрушительные атмосферные вихри и вращение Земли вокруг своей оси: монография / С. П. Баутин, С. Л. Дербин, И. Ю. Крутова, А. Г. Обухов. – Екатеринбург: УрГУПС, 2017.

NUMERICAL MODELING OF FLOWS IN RISING SWIRLING FLOWS USING THE FULL SYSTEM OF NAVIER-STOKES EQUATIONS

S. P. Bautin¹, S. N. Kononov^{1,2}, E. C. Levunina^{1,3}

¹MEPhI, Snezhinsk, Russia

²SUSU, Ozersk, Russia

³FSUE «РО «Mayak», Ozersk, Russia

E-mail: SBautin@usurt.ru

The complete system of Navier-Stokes equations in cylindrical coordinates is considered. The solution of the system of five equations describes the origin and functioning of rising swirling flows taking into account gravity and Coriolis forces [1], as well as the properties of viscosity and thermal conductivity of the gas. The continuity equation for the compressible gas, three scalar equations for components of the air flow velocity and the energy equation are considered. The pressure is expressed in terms of density and temperature, thus eliminating the general gas equation from the system. The air movement in the suggested model is found by numerical analysis. An explicit method is used. Since a large number of mesh nodes were assumed to implement the numerical analysis, multithreading of the calculation was used on a distributed system. The computation for the next value of time was conducted simultaneously in several parts of the simulated 3-D model of air. The boundary conditions was

carried out according to MPI standards. Checking the admissibility of the computation was carried out by the calculations of immovability, for which we know the exact solution of the system. The results showed good agreement with the theoretical calculations. This finite difference scheme can be used in the future to simulate rising swirling flows.

References

1. Destructive atmospheric vortices and the Earth's rotation around its axis: a monograph / S. P. Bautin, S. L. Deryabin, I. Y. Krutova, A. G. Obukhov. – Ekaterinburg: USURT, 2017.

6-4

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ РАЗРУШИТЕЛЬНЫХ ВИХРЕЙ ДЛЯ РОССИИ

А. А. Бугаенко^{1,2}, И. Ю. Крутова²

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

²СФТИ НИЯУ МИФИ, Снежинск, Россия

E-mail: bugaenkoanya@yandex.ru

В природе довольно часто встречается интересное атмосферное явление – восходящие закрученные потоки воздуха, которые в обиходной речи называют вихрями. В качестве примеров таких потоков можно привести многочисленные смерчи и периодически возникающие тропические циклоны.

Ранее считалось, что разрушительные вихри – довольно редкое природное явление в России. По статистике, вероятность возникновения таких вихревых образований в средней полосе оценивается на уровне 10–14%. Но теперь стихия зачистила на территорию страны.

На основе данных очевидцев в докладе представлены:

- несколько наблюдений очевидцев разрушительных вихрей, подтвержденных фото- и видео-фиксацией;
- частота появления разрушительных вихрей на территории России за последние 5 лет;
- карта России, где отмечено в каких регионах проявлялись разрушительные вихри за последние 5 лет;
- характерная скорость ветра, сопровождающая разрушительные вихри на территории России.

Также в докладе говорится о новом способе обнаружения смерчей, который разработали российские ученые из Пермского государственного национального исследовательского университета.

STATISTICS DESTRUCTIVE WHIRLWINDS FOR RUSSIA

A. A. Bugaenko^{1,2}, I. Yu. Krutova²

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

²Siberian physical-technical Institute NRNU MEPhI, Snezhinsk, Russia

E-mail: bugaenkoanya@yandex.ru

In nature, quite often there is an interesting atmospheric phenomenon – ascending swirling air flows, which in everyday speech are called vortices. Numerous tornadoes and intermittent tropical cyclones can be cited as examples of such flows.

Previously, it was believed that destructive whirlwinds – a rare natural phenomenon in Russia. According to statistics, the probability of occurrence of such vortex formations in the middle band is estimated at 10–14%. But now the element is often on the territory of the country.

Based on eyewitness data, the report presents:

- several observations of eyewitnesses of destructive whirlwinds, confirmed by photo and video fixation;
- frequency of occurrence of destructive whirlwinds in the territory of Russia for the last 5 years;
- map of Russia, which marked in some regions manifested destructive whirlwinds for the last 5 years;
- characteristic wind speed accompanying destructive whirlwinds on the territory of Russia.

The report also talks about a new method of detection of tornadoes, which was developed by Russian scientists from the Perm state national research University.

6-5

АЛГОРИТМЫ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ МЕТОДИКИ ТИМ-3D

A. A. Voropinov, I. G. Novikov

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

E-mail: AAVoropinov@vniief.ru, IGINovikov@vniief.ru

Методика ТИМ-3D [1] предназначена для решения задач механики сплошной среды на неструктурированных многогранных лагранжевых сетках произвольной структуры. Для методики используется метод трехуровневого распараллеливания в смешанной модели памяти. На первых двух уровнях используется принцип декомпозиции по пространству в модели распределенной памяти с использованием интерфейса передачи сообщений MPI. На первом уровне осуществляется распараллеливание счета по фрагментам задачи (математическим областям). На втором уровне производится распараллеливание счета в математической области с разделением на параобласти. На третьем уровне осуществляется распараллеливание итераций счетных циклов в модели общей памяти с использованием интерфейса OpenMP.

В докладе рассматриваются алгоритмы мелкозернистого распараллеливания (второй уровень). Эти алгоритмы дополняют распараллеливание в модели общей памяти с использованием OpenMP, реализованные ранее [2]. Мелкозернистое распараллеливание может осуществляться как с использованием наложения в один слой ячеек между параобластями, так и без использования наложения. Приводится сравнение этих подходов по эффективности распараллеливания на одном из тестовых расчетов. Для 800 ядер эффективность составила 47% для мелкозернистого распараллеливания с наложением и 55% для режима без наложения.

Литература

- 1 Соколов С. С., Панов А. И., Воропинов А. А., и др. Методика ТИМ расчета трехмерных задач механики сплошных сред на неструктурированных многогранных лагранжевых сетках // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2005. – Вып. 3. – С. 37–52.
2. Воропинов А. А., Новиков И. Г., Соболев И. В., Соколов С. С. Распараллеливание методики «ТИМ» в модели общей памяти с использованием интерфейса OpenMP // Вычислительные методы и программирование. – 2007. – Том 8, № 1. – С. 134–141.

FINE-GRAINED PARALLEL ALGORITHMS IN THE TIM-3D CODE

A. A. Voropinov, I. G. Novikov

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

E-mail: AAVoropinov@vniief.ru, IGINovikov@vniief.ru

TIM-3D [1] is a continuum mechanics simulation code, which uses arbitrary-shape unstructured polyhedral Lagrangian meshes. Parallelism in TIM-3D is provided at three levels in the mixed memory model. The first two levels use space decomposition in the MPI-based distributed-memory model. At the first level, calculations are parallelized in task fragments (domains). At the second level, calculations within one domain are parallelized in para-domains. At the third level, iterations of calculation loops are parallelized in the OpenMP-based shared-memory model.

The paper considers the fine-grained paralleling algorithms (second level). These algorithms are complementary to the OpenMP shared-memory parallelism implemented earlier [2], The fine-grained paralleling can be done both with overlapping in one row of para-domain interface cells and without overlapping. These approaches are compared in their parallel efficiency using one of test simulations.

References

1. Sokolov S. S., Panov A. I., Voropinov A. A., et al: The code TIM for three-dimensional continuum mechanics simulations on unstructured polyhedral Lagrangian meshes // Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser. Matematicheskoe modelirovanie

fizicheskikh protsessov. – 2005. – Issue 3. – P. 37–52 [in Russian].

2. Voropinov A. A., Novikov I. G., Sobolev I. V., Sokolov S. S. Paralleling of the code TIM in the shared-memory model using the OpenMP interface // Vychislitel'nye metody i programmirovaniye. 2007. – Vol. 8, No. 1. – P. 134–141 [in Russian].

6-6

РАЗНОСТНЫЕ СХЕМЫ ПОВЫШЕННОГО ПОРЯДКА АППРОКСИМАЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ПЕРЕНОСА ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А. Д. Гаджиев, В. В. Завьялов,
Д. А. Кошутин, А. А. Шестаков

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

Проблеме построения разностных схем повышенного порядка (выше первого) для уравнения переноса излучения посвящено огромное число работ. Отдельным классом среди них выделяются схемы для решения системы уравнений переноса теплового излучения, которая дополнительно включает в себя уравнение для внутренней энергии среды с учетом обменных процессов взаимодействия излучения с веществом. Из-за существенной нелинейности эти процессы делают задачу переноса теплового излучения очень требовательной к качеству выбираемых разностных схем.

В докладе проведены исследования трех неявных безусловно монотонных разностных схем повышенного порядка аппроксимации для задач переноса теплового излучения. Все схемы построены с использованием TVD-реконструкции и названы TVDR-схемами (Total Variation Diminishing Reconstruction).

DIFFERENCE SCHEMES OF HIGHER ORDER OF APPROXIMATION FOR HEAT TRANSFER EQUATIONS

A. D. Gadzhiev, V. V. Zavialov,
D. A. Koshutin, and A. A. Shestakov

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

There are very many papers devoted to the construction of difference schemes of higher (higher than one) order for the heat transfer equation. A separate class of the schemes unites those devised for a system of heat transfer equations which includes an equation for material internal energy with allowance for the exchange processes in the interaction between thermal radiation and matter. These processes are essentially nonlinear which makes the heat transfer problem very sensitive to the quality of difference schemes being used.

The paper considers three implicit, unconditionally monotone difference schemes of higher order of approximation for heat transfer problems. They all are constructed with use of TVD reconstruction and are referred to as TVDR (Total Variation Diminishing Reconstruction) schemes.

6-7

РЕЗОНАНСЫ ДЛЯ ОДНОМЕРНОГО ОПЕРАТОРА ШРЕДИНГЕРА: АНАЛИТИЧЕСКИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ АСПЕКТЫ

В. Л. Гейнц

Российский Университет Дружбы Народов,
Москва, Россия

E-mail: valgeynts@gmail.com

Нестационарное уравнение Шредингера и акустическое уравнение в ограниченной области могут быть решены методом Фурье разделения переменных. В случае неограниченной области справедливо аналогичное представление, в котором множество собственных значений дополняется резонансами – полюсами мероморфного продолжения резольвенты соответствующих операторов.

В данной работе исследуются методы вычисления резонансов оператора Шредингера на оси и полуоси (прямая задача), а также методы и аналитические оценки точности восстановления оператора по набору резонансов и собственных значений (обратная задача).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (-DFG) 15-51-12389_НННО.

RESONANCES FOR THE ONE-DIMENSIONAL SCHROEDINGER OPERATOR: ANALYTICAL AND NUMERICAL ASPECTS

V. L. Geiynts

Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

E-mail: valgeynts@gmail.com

The nonstationary Schroedinger and acoustic equation in a bounded domain can be solved using Fourier method of separation of variables. In the case of an unbounded domain there is a similar representation using a set of eigenvalues complemented by a set of resonances which are defined as poles of the meromorphic continuation of resolvents for corresponding operators.

In this work we study methods of computing of resonances for the Schroedinger operator on the line and half-line (direct problem) and methods with analytical estimates of reconstruction of the operator from a finite set of eigenvalues and resonances (inverse problem).

This work is supported by the Russian Foundation for Basic Research and DFG (project 15-51-12389).

6-8

**ВЕКТОРИЗОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ
ДЛЯ ОДНОЙ РАЗНОСТНОЙ СХЕМЫ
ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ
НА НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ
МНОГОГРАННЫХ СЕТКАХ
В ЛАГРАНЖЕВОЙ МЕТОДИКЕ ТИМ-3D**

Ф. О. Голомидов, А. А. Воропинов

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

Методика ТИМ-3D [1] предназначена для расчета нестационарных трехмерных задач механики сплошной среды на неструктурированных многогранных лагранжевых сетках.

В ходе проведения работ по тестированию и разработке алгоритмов OpenMP распараллеливания методики ТИМ-3D [2] на вычислительной системе «Каскад» [3], стало очевидно, что добиться высоких значений ускорения алгоритмов без использования такого ресурса, как векторизация, затруднительно. Это связано с тем, что в состав вычислительной системы «Каскад» входят сопроцессоры Intel Xeon Phi [4], которые ориентированы на работу с векторными инструкциями шириной 512-бит.

За основу была взята неконсервативная газодинамическая разностная схема методики ТМК-УП, описанная в работе [5]. Данная схема реализована и для методики ТИМ-3D, где обобщена на случай произвольных сеток.

В методике ТИМ-3D используется подход, в котором для одного узла или ячейки рассчитываются все уравнения. Для векторизации этот подход плохо подходит. Поэтому было решено перейти от обсчета всех уравнений для одного узла или ячейки к расчету одного уравнения для всех узлов или ячеек соответственно.

Основная идея векторизованных алгоритмов заключается во введении явного тетраэдрального представления сетки и работе с ним. При этом сама расчетная сетка остается произвольной, однако вместо неявной триангуляции граней и тетраэдрализации ячеек, используется заранее подготовленная информация.

Все тестовые расчеты были проведены на вычислительной системе «Каскад» [3]. В качестве тестовой задачи была выбрана задача о распространении плоской волны. Число ячеек составляло один миллион, использовалась шестигранная сетка. Во втором тестовом расчете использовалась восьмигранная сетка, число ячеек составляло 500 тысяч. Для получения временных замеров и коэффициентов ускорения от векторизации замерялось время счета 10 шагов.

Для тестового расчета на шестигранной сетке коэффициент ускорения от векторизации составил ~2,6 раза на сопроцессорах, и ~1,1 раза для универсальных процессоров. Результаты расчетов на сетке из восьмигранных призм показали, что ускорение от

векторизации составляет ~2,5 раза для сопроцессоров и 1,1 раза для универсального процессора.

Литература

1. Соколов С. С., Панов А. И., Воропинов А. А., и др.: Методика ТИМ расчета трехмерных задач механики сплошных сред на неструктурированных многогранных сетках // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2005. – Вып. 3. – С. 37–52.
2. Голомидов Ф. О., Воропинов А. А., Новиков И. Г.: Развитие OpenMP распараллеливания в методике ТИМ // Супервычисления и математическое моделирование. Труды XVI Международной конференции. – 2017. – С. 100–102.
3. «Центр компетенция и обучения», Вычислительная система «Каскад» [Электронный ресурс]: Режим доступа к ресурсу: <http://www.compcenter.org>
4. Intel Xeon Phi coprocessor [Electronic resource]: Mode of access: <http://www.intel.com>
5. Соколов С. С.: Методика решения нестационарных упругопластических задач на нерегулярных многогранных лагранжевых сетках // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2002. – Вып. 4. – С. 23–26.

**VECTORIZED ALGORITHMS
FOR ONE DIFFERENCE GAS DYNAMICS
SCHEME USED ON NON-STRUCTURED
POLYHEDRAL GRIDS
IN THE LAGRANGIAN TIM-3D METHOD**

F. O. Golomidov, A. A. Voropinov

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

The TIM-3D method [1] is designed to solve nonstationary 3D problems of continuum mechanics using non-structured arbitrary-shaped polyhedral grids.

Testing and adaptation of OpenMP parallelization algorithms of the TIM-3D method [2] on the «Cascade» computing system [3] revealed that it is difficult to achieve high speedup values without implementation of such asset as vectorization. This is because the «Cascade» computing system includes Intel Xeon Phi coprocessors [4] aimed at the manipulation with 512-bit wide vector instructions.

A non-conservative gas-dynamic difference scheme of the ТМК-UP method described in [5] is taken in this work as the basic one. This scheme was also realized for the TIM-3D, where it was generalized for the case of arbitrary-shaped grids.

In the TIM-3D method used approach in which all equations are solved for one grid node, or a cell. Such approach does not suit very well for vectorization. So the decision was made to change the philosophy of algorithms and turn from the solution of all equations for one node or cell to the solution of one equation for all nodes or cells, respectively.

The main idea of the vectorized algorithms in this work lies in the introduction of the explicit tetrahedral grid representation and manipulation with such grid. But

the computational grid itself remains arbitrary-shaped. However, previously prepared information is used instead of the implicit triangulation of the faces of the grid and tetrahedron-like division of cells.

All test computations were performed on the «Cascade» computing system [3]. The problem of the plane wave propagation was taken as a benchmark. The number of cells was 1 million, and a hexahedral mesh was used in the computations. The second test computation used an octahedral computational grid with 500 thousand cells. To obtain data on times and speedup values due to vectorization the runtime measurements were performed every 10 steps.

In the test computation using hexahedral grid, ~2.6 times speedup was achieved due to vectorization on coprocessor. On octahedral grid ~2.5 times speedup was achieved due to vectorization on coprocessor.

References

1. Sokolov S. S., Panov A. I., Voropinov A. A., et al.: TIM method for solving 3D continuum mechanics problems on unstructured polyhedral grids // *Voprosy Atomnoy Nauki I Tekhniki. Ser. Math. Model. Phys. Process.* – 2005. – Issue 3. – P. 37–52.
2. Golomidov F. O., Voropinov A. A., Novikov I. G.: The OpenMP parallelization development in TIM method. // *Supercomputing and Mathematical Modeling. Proceedings of XVI International Conference.* – 2017. – P. 100–102.
3. «Competence and Training Center», Computing system «Cascade» [Electronic resource]: Mode of access: <http://www.compcenter.org>
4. Intel Xeon Phi coprocessor [Electronic resource]: Mode of access: <http://www.intel.com>
5. Sokolov S.S.: A method for solving nonstationary-state elastoplastic problems on irregular polyhedral Lagrangian grids. // *Voprosy Atomnoy Nauki I Tekhniki. Ser. Math. Model. Phys. Process.* – 2002. – Issue. 4. – P. 23–26.

6-9

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЗАДАЧ ПЕРЕНОСА ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А. С. Вершинская, С. А. Грабовенская, В. В. Завьялов,
Д. А. Кошутин, А. В. Уракова,
И. С. Чубарешко, А. А. Шестаков

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

В связи с использованием для моделирования уравнения переноса различных упрощающих приближений возникают вопросы соответствия получаемых приближенных решений решению кинетического уравнения. Часть этих приближений не использует решение кинетического уравнения, а часть использует решение кинетического уравнения для получения вспомогательных коэффициентов. В приближениях, которые используют кинетическое уравнение, решение разбивается на два этапа. На первом этапе

решается кинетическое уравнение для получения вспомогательных коэффициентов. В докладе рассматриваются вопросы влияния лучевого эффекта на вспомогательные коэффициенты и необходимость введения ограничений на эти коэффициенты.

На втором этапе решаются диффузионные или квазидиффузионные уравнения для получения основных величин: температуры, плотности и потока излучения. При этом вся тяжесть итерационных процессов переносится на диффузионный этап, который считается с поправочными коэффициентами, а кинетическое уравнение решается один раз на шаге. В отличие от двухэтапных итерационных методов типа DSA, где требуется согласованность схем на этапах, и второй этап используется для ускорения итераций, для рассмотренных в докладе приближениях не требуется согласованность схем на этапах.

В оптически плотных средах согласованность приближенных решений решению кинетического уравнения следует из асимптотического анализа. В оптически прозрачных средах – только в приближениях, для которых выполняются условия эквивалентности, рассмотренные в докладе.

STUDY OF DIFFERENT APPROXIMATIONS FOR SOLVING HEAT TRANSFER

A. S. Vershinskaya, S. A. Grabovenskaya, V. V. Zavialov,
D. A. Koshutin, A. V. Urakova,
I. S. Chubareshko, and A. A. Shestakov

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

The heat transfer equation is solved in different simplifying approximations and there rise questions on whether the approximated solutions agree with the solution of the kinetic equation. Some of the approximations do not use the solution of the kinetic equation, the others use it to calculate auxiliary coefficients. In the latter case, the solution is broken into two phases. The first solves the kinetic equation to calculate the auxiliary coefficients. The paper considers the issues related to the ray effect on the auxiliary coefficients and the necessity of introducing limits for the coefficients.

The second phase solves diffusion and quasi-diffusion equations for getting the basic quantities: temperatures, densities and fluxes. Here all the burden of the iterative processes lies on the diffusion stage which is calculated with correction factors and the kinetic equation is solved once per timestep. Unlike the two-phase iteration methods of type DSA where the schemes used in the phases need to be consistent and the second phase is used to speed-up iterations, the approximations we are considering in the paper do not require consistency of schemes in the phases.

For optically thick media, the agreement between the approximated solutions and the solution of the kinetic equation follows from asymptotic analysis. For optically thin media, it only holds in the approximations which satisfy the equivalence conditions provided in the paper.

6-10

**УСТОЙЧИВОСТЬ СТАЦИОНАРНОГО
КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ
В ВЕРТИКАЛЬНОМ СЛОЕ
С ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННЫМИ ГРАНИЦАМИ**

О. Н. Дементьев

Челябинский государственный университет,
Челябинск, Россия

E-mail: dement@csu.ru

Приводятся результаты решения задачи об устойчивости стационарного конвективного течения в вертикальном слое с теплоизолированными границами и сопоставление с противоположным предельным случаем идеально теплопроводящих границ.

Если теплопроводности жидкости и граничащих с ней твердых массивов соизмеримы, то температурные возмущения проникают в массив. При этом возникает вопрос, влияет ли относительная теплопроводность границ на устойчивость конвективного течения. Заранее ясно, что гидродинамический механизм неустойчивости должен быть мало чувствителен к тепловым свойствам массивов. Что же касается волновой неустойчивости, то, поскольку она связана с нарастающими температурными волнами, можно было бы ожидать значительного влияния свойств массивов на на критические параметры этой неустойчивости. Для выяснения роли проникновения тепловых возмущений на устойчивость рассмотрен предельный случай, когда теплопроводность жидкости гораздо больше теплопроводности границ.

Приводимые результаты показывают, однако, что проникновение температурных возмущений в окружающие массивы оказывает слабое влияние на условия возникновения неустойчивости как гидродинамического, так и волнового типов.

**THE STABILITY OF STEADY CONVECTIVE
FLOW IN A VERTICAL LAYER WITH
THERMALLY INSULATED BOUNDARIES**

O. N. Dementev

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: dement@csu.ru

The results of a solution of problem of stability convective flow in vertical layer with thermally insulated boundaries and a comparison with opposite limiting case of ideally thermally conducting boundaries are presented.

If the thermal conductivity of the liquid and the solid masses bordering on it are comparable then temperature disturbances penetrate into the solid masses. Then the question arises of whether the relative thermal conductivity of the boundaries affects the stability of the convective flow. It is clear in advance that the hydrodynamic mechanism of the instability must be little sensitive to the thermal properties of the solid masses. As for a wave instability, since it is connected with growing temperature

wave it could be expected, generally speaking, that the properties of a solid masses have a considerable effect on the critical parameters of this instability. To clarify the role of the penetration of the thermal disturbances on the stability it is obviously sufficient to consider the limiting case opposite to that which one usually has in made, namely when the thermal conductivity of the boundaries.

The results presented below show, however, that the penetration on temperature disturbances into the surrounding solid masses has a weak effect on the conditions of formation of instabilities of both the hydrodynamic and the wave types.

6-11

**ПОСТРОЕНИЕ ДВУМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЙ,
ВОЗНИКАЮЩИХ ПОСЛЕ РАСПАДА
СПЕЦИАЛЬНОГО РАЗРЫВА
В ФИЗИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

С. Л. Дерябин, А. С. Кирьянова

Уральский государственный университет путей сообщения,
Екатеринбург, Россия

E-mail: SDeryabin@usurt.ru, ASKiryanova@usurt.ru

В работе рассматриваются двумерные изэнтропические течения политропного газа, возникающие после мгновенного разрушения непроницаемой стенки в начальный момент времени, отделяющей неоднородный покоящийся газ от вакуума при учете силы тяжести. В качестве математической модели используется система уравнений газовой динамики. В системе уравнений газовой динамики вводятся нестационарные автомодельные переменные и для полученной системы ставится задача Коши с данными на звуковой характеристике. Из необходимых условий разрешимости находятся начальные условия. Для полученной начально-краевой задачи доказывается теорема существования и единственности. Далее решение начально-краевой задачи строится в виде степенного ряда. Коэффициенты ряда находятся при интегрировании обыкновенных дифференциальных уравнений.

**CONSTRUCTION OF TWO-DIMENSIONAL
FLOWS ARISING AFTER THE COLLAPSE OF A
SPECIAL DISCONTINUITY IN PHYSICAL SPACE**

S. L. Deryabin, A. S. Kiryanova

Ural State University of Railway Transport,
Ekaterinburg, Russia

E-mail: SDeryabin@usurt.ru, ASKiryanova@usurt.ru

The paper discusses two-dimensional isentropic flows of a polytropic gas arising after the instantaneous destruction of an impenetrable wall at the initial moment of time separating a non-uniform gas at rest from a vacuum, taking into account gravity. The system of equations of gas dynamics is used as a mathematical model. In the system of equations of gas dynamics, nonstationary self-similar

variables are introduced, and the Cauchy problem is posed for the obtained system with the data on the sound characteristic. Of the necessary conditions for solvability are the initial conditions. For the initial boundary-value problem obtained, the existence and uniqueness theorem is proved. Further, the solution of the initial-boundary value problem is constructed as a power series. The coefficients of the series are found when integrating ordinary differential equations.

6-12

**ПРЯМОЕ РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОДВОДНОЙ
УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА ОБЪЕКТ**

Е. Ю. Емельянова, В. В. Титов, В. В. Доценко,
М. В. Никульшин, О. С. Путилин

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

E-mail: emeljanova.elena@rambler.ru

В работе представлено прямое расчетное исследование воздействия подводной ударной волны (ПУВ) на объект. Подводное взрывное нагружение происходит в результате детонации шарового заряда массой 50 кг ТЭ. В качестве объекта нагружения используется модель цилиндрического корпуса изделия.

Расчеты выполняются методом связывания независимых эйлеровой (текучая среда) и лагранжевой (структура) сеток. Текучая среда представлена в многокомпонентной формулировке: ВВ, продукты взрыва и вода. В связи с тем, что расстояние от центра заряда до объекта составляет 22,2 м, задача решается поэтапно с поступательным увеличением габаритных размеров расчетной сетки. На этапе детонации заряда и распространения ПУВ решение осуществляется в эйлеровой многокомпонентной формулировке на осесимметричных 2D-сетках с возрастающим размером ячейки от 1 до 5 мм. Осесимметричное решение сферической ПУВ переносится на объемную 3D-сетку с изделием. Нагружаемый объект цилиндрической формы моделируется лагранжевой сеткой и имеет упругопластические характеристики материала.

Верификация расчетов осуществляется на основании аналитических и экспериментальных данных. Получена приемлемая точность результатов расчетов. Определено напряженно-деформированное состояние нагружаемого объекта.

**DIRECT SIMULATION OF THE UNDERWATER
SHOCKWAVE EFFECT ON THE OBJECT**

E. Yu. Emeljanova, V. V. Titov, V. V. Dotsenko,
M. V. Nikulshin, O. S. Putilin

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

E-mail: emeljanova.elena@rambler.ru

The work presents direct theoretical study of the underwater shockwave effect on the object. The underwater explosive loading is induced by a spherical charge equivalent to 50 kg of TNT. The model of the item cylindrical case serves as the loaded object.

The analysis is made involving coupling of independent Eulerian (fluid medium) and Lagrangian (structure) grids. The fluid medium is made available in a multicomponent definition: high explosive, explosion products, and water. In view of the fact that the distance from the charge center to the object makes 22.2 m the problem has a step-by-step solution with progressively increasing overall size of the grid. When the charge is detonated and the underwater shockwave is propagated, the solution is made possible in Eulerian multicomponent definition using the axisymmetric 2D grids having the cell size increasing from 1 to 5 mm. The axisymmetric solution of the spherical underwater shockwave is transferred to a volumetric 3D grid with the item. The loaded cylindrical object is simulated using Lagrangian grid and is characterized by the elastoplastic properties of the material.

The computation is verified based on the analytical and experimental data. The accuracy of the obtained results is acceptable. The stress-strain behavior of the loaded object is determined.

6-13

МГД В ТРЕХМЕРНОЙ ПРОГРАММЕ ФОКУС

А. В. Ершова, Н. А. Михайлов,
К. С. Назаров, И. В. Глазырин

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

E-mail: ershovaav@vniitf.ru

Для исследования развития неустойчивостей при сжатии вещества магнитным полем разрабатывается трехмерная программа Фокус [1, 2]. Программа использует метод конечных объемов. В рамках программы реализовано решение уравнений идеальной магнитной газодинамики в консервативной постановке. Для аппроксимации потоков в центрах граней ячеек используется схема HLL [3]. Для получения выражения численного потока на гранях ячеек рассматривается одномерная задача Римана. Решение по времени проводится по двухстадийной схеме Рунге-Кутты. Для очистки магнитного заряда был выбран метод, использующий искусственный скалярный потенциал [4, 5].

Проведено тестирование программы по решению идеальной МГД на одномерных, двумерных и трехмерных задачах. Сравнение проводилось с решениями, полученными по программе FLASH [6], показано хорошее соответствие результатов. Показано, что использование очистки магнитного заряда дает более точный результат.

В качестве примера практической задачи рассмотрели сжатие вещества в сильноточных установках Z-пинч с развитием магнитогазодинамических неустойчивостей, которые препятствуют высокой степени сжатия пинча [7], в результате не позволяя достичь термоядерных температур. Проведены расчеты в одномерной и двумерной постановках в цилиндрических координатах для однородного сплошного и однокаскадного лайнеров. Для одномерной постановки получена сходимости решения для набора разностных сеток. В двумерной постановке с заданными начальными возмущениями получили так называемые «перетяжки» в лайнере. Сравнение этих постановок позволило определить роль развития неустойчивостей, препятствующих достижению зажигания.

Литература

1. Ershova A. V., Glazyrin I. V., Mikhailov N. A. Accounting of spontaneous magnetic fields in Focus 3D code // *Journal of Physics: Conference Series*, 1103, 2018.
2. Михайлов Н. А., Глазырин И. В., Ершова А. В. и др. Особенности многокомпонентного Эйлера подхода в расчетах сжатия лазерных мишеней // *Забабахинские научные чтения: сборник материалов XII Международной конференции 2–6 июня 2014.* – Снежинск: Издательство РФЯЦ – ВНИИТФ, 2014. – С. 310.
3. Toro E. F. Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics: a practical introduction. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, third edition, 2009.
4. Куликовский А. Г., Погорелов Н. В., Семенов А. Ю. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2001.
5. Toth G. The $\nabla b = 0$ constraint in shock-capturing magnetohydrodynamics codes // *J. Comp. Phys.* – 2000. – Vol. 161. – P. 605–652.
6. www.flash.uchicago.edu.
7. Haines M. G. A review of the dense Z-pinch // *Plasma Phys. Control. Fusion* 53, 2011.

MHD IN 3D FOCUS CODE

A. V. Ershova, N. A. Mikhailov,
K. S. Nazarov, I. V. Glazyrin

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

To study the evolution of instabilities under magnetic field compression of matter, 3D FOCUS code is developed [1, 2]. This code is based on a finite-volume method. The code is implemented to solve equations of ideal magnetohydrodynamics (MHD) in a conservative formulation. HLL scheme is used to approximate the fluxes at the centers of cell faces [3]. To express a numerical flow on the cell faces, one-dimensional Riemann problem is considered. Two-stage Runge-Kutta scheme is used to obtain a solution over time. The method utilizing an artificial scalar potential was chosen to clean the magnetic charge [4, 5].

The code intended to solve equations of ideal magnetohydrodynamics was tested on one-dimensional, two-di-

mensional, and three-dimensional problems. Comparison of these solutions to those obtained using FLASH code [6] revealed a good agreement. The application of magnetic charge cleaning was shown to give a more accurate result.

As an example of practical problem, we considered compression of matter in the high-current Z-pinch generators in conditions of evolving magnetohydrodynamic instabilities which hinder intensive compression of pinch [7] and thus, thermonuclear temperatures fail to be reached. 1D and 2D computations were performed in cylindrical coordinates for the homogeneous solid and one-cascade liners. For 1D case, we obtained convergence of solution for a set of difference grids. For the case of 2D computations with the given initial perturbations, we observed the so-called “necks” in the liner. Comparison of these results allowed us to determine the role of evolving instabilities preventing the ignition.

References

1. Ershova A. V., Glazyrin I. V., Mikhailov N. A. Accounting of spontaneous magnetic fields in Focus 3D code // *Journal of Physics: Conference Series*, 1103, 2018.
2. Mikhaylov N. A., Glazyrin I. V., Ershova A. V., etc. Numerical details of multicomponent Eulerian approach in the simulation of laser targets compression // *Zababakhin Scientific Talks: XII International Conference, June 2–6, 2014.* – Snezhinsk: RFNC – VNIITF, 2014. – P. 310.
3. Toro E. F. Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics: a practical introduction. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, third edition, 2009.
4. Kulikovskii A. G., Pogorelov N. V., Semenov A. Yu. Mathematical problems of numerical solution of hyperbolic systems. – Moscow: Physics and mathematics publishers, 2001.
5. Toth G. The $\nabla b = 0$ constraint in shock-capturing magnetohydrodynamics codes // *J. Comp. Phys.* – 2000. – Vol. 161. – P. 605–652.
6. www.flash.uchicago.edu.
7. Haines M. G. A review of the dense Z-pinch // *Plasma Phys. Control. Fusion* 53, 2011.

6-14

О ДВУХ ПОДХОДАХ ЭФФЕКТИВНОГО ПОНИЖЕНИЯ РАЗМЕРНОСТИ ДЛЯ ЗАДАЧ ПЕРЕНОСА ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МНОГОМЕРНОЙ ГЕОМЕТРИИ

А. С. Вершинская, С. А. Грабовенская,
В. В. Завьялов, А. А. Шестаков

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

В связи с вычислительной трудоемкостью моделирования задач переноса теплового излучения в кинетической постановке актуальным является вопрос о применении более простых моделей. В 1964 году В. Я. Гольдиным был предложен метод квазидиф-

фузии. За прошедшее время метод развивался и хорошо зарекомендовал себя на практике. В 2010 году М. Ю. Козмановым и Н. Г. Карлыхановым был применен другой подход учета кинетических эффектов. В обоих подходах происходит понижение размерности решаемой задачи за счет снятия зависимости от направлений полета частиц, что в общем случае уменьшает временные затраты.

В докладе концептивно рассматриваются оба подхода в многомерном случае. Отмечается, что система уравнений квазидиффузии имеет более сложный вид и создание численных методик с положительными качествами представляет значительные трудности. Изложенные подходы реализованы на основе неявных конечно-разностных схем и итерационных методов, разработанных в РФЯЦ – ВНИИТФ. Приводятся результаты численных расчетов двух тестовых задач для нестационарной системы уравнений переноса теплового излучения в двумерной осесимметричной геометрии.

TWO METHODS TO EFFECTIVELY REDUCE DIMENSION FOR HEAT TRANSFER PROBLEMS IN MULTIDIMENSIONAL GEOMETRY

A. S. Vershinskaya, S. A. Grabovenskaya,
V. V. Zaviyalov, and A. A. Shestakov

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

Kinetic heat transfer simulation is extremely compute intensive and the use of simpler models is the order of the day. In 1964 V. Y. Goldin proposed a method of quasi-diffusion. Since then the method has been further developed and performed well in practical problems. In 2010 M. Y. Kozmanov and N. G. Karlykhanov used another method of accounting for the kinetic effects. Both the methods reduce the dimension of the problem being solved by removing the dependence on particle direction which generally reduces calculation time.

The paper briefly describes the two methods in the multidimensional case. It shows that the system of quasi-diffusion equations is more complicated which makes it very difficult to develop numerical methods of good quality. The methods are implemented with use of the implicit finite-difference schemes and iterative methods developed at RFNC – VNIITF. Provided are results of two test problems for nonstationary heat transfer equations in 2D axially symmetric geometry.

6-15

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО КАНАЛЬНО-УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ МЕДНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ФИКСИРОВАННОМ ДАВЛЕНИИ

С. А. Зелепугин^{1,2}, Д. В. Янов^{1,2},
А. С. Бодров², Н. В. Пахнутава²

¹Томский научный центр СО РАН, Томск, Россия

²Томский государственный университет, Томск, Россия

E-mail: szel@yandex.ru

Одной из актуальных задач в области материаловедения является получение металлов и сплавов с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой. Металл с УМЗ структурой характеризуется улучшенными физико-механическими свойствами, такими как повышенная прочность, хладноломкость, радиационная стойкость [1]. В данной работе рассматривается метод динамического канально-углового прессования (ДКУП), с помощью которого можно получать УМЗ структуру [2]. Целью работы является численное моделирование процесса ДКУП медного образца при условиях нагружения, реализуемых в экспериментах. В результате анализа экспериментальных данных, представленных в научной литературе [3], выбраны следующие начальные условия: начальное давление, действующее на тыльную часть образца $P_0 = 310$ МПа, начальная скорость образца может варьироваться в широких пределах. Численное моделирование проводилось с помощью модифицированного метода конечных элементов в рамках упругопластической модели повреждаемой среды [4]. В результате проведенных численных расчетов показано, что образец из меди успешно проходит процесс ДКУП при начальных параметрах $v_0 = 170$ м/с и $P_0 = 310$ МПа. При этом равномерным интенсивным пластическим деформациям подвергается почти весь образец, кроме передней и тыльной частей. Также происходит незначительное удлинение образца в направлении продольной оси и повышение температуры до 600 К в области контакта образца со стенками горизонтальной части канала.

Литература

1. Valiev R. Z., Islamgaliev R. K., Alexandrov I. V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation // *Progress in Materials Science*, 2000, vol. 45, issue 2, pp. 103–189.
2. Столбовский А. В., Попов В. В., Попова Е. Н., Фалахудинов Р. М., Шорохов Е. В. Особенности деформационного поведения бронз при динамическом канально-угловом прессовании // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, 2016. № 11-5. С. 858–863.
3. Русяк И. Г., Ермолаев М. А. Анализ влияния различных факторов на характеристики артиллерийского выстрела // *Вестник ИжГТУ*, 2014. № 4(64). С. 162–165.
4. Зелепугин С. А., Бодров А. С., Пахнутава Н. В. Диаграмма процесса динамического канально-углового прессования титановых образцов // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, 2017. № 11-1. с. 28–31.

**NUMERICAL SIMULATION
OF DYNAMIC CHANNEL-ANGULAR PRESSING
OF COPPER SPECIMENS
UNDER CONSTANT PRESSURE**

S. A. Zelepugin^{1,2}, D. V. Yanov^{1,2},
A. S. Bodrov², N. V. Pakhnutova²

¹Tomsk Scientific Center SB RAS, Tomsk, Russia

²Tomsk State University, Tomsk, Russia

E-mail: szel@yandex.ru

One of the urgent problems in the field of materials science is the production of metals and alloys with an ultrafine-grained (UFG) structure. Metals with a UFG structure are characterized by improved physical and mechanical properties, such as increased strength, cold brittleness, and radiation resistance [1]. This paper considers the method of dynamic channel-angular pressing (DCAP) which is used to obtain the UFG structure [2]. The goal of this work is the numerical simulation of the DCAP process of a copper sample using experimental data of loading. Experimental data available in the scientific literature [3] were analyzed to choose the initial conditions as follows: the initial pressure acting on the rear part of the sample is $P_0 = 310$ MPa and the initial velocity of the sample can be varied in the wide range. Numerical simulation was performed using a modified finite element method within the framework of an elastoplastic model of a damaged medium [4]. The numerical computations have shown that the copper sample successfully undergoes the DCAP process with the initial parameters of $v_0 = 170$ m/s and $P_0 = 310$ MPa. The sample is subjected to uniform intense plastic deformations, except for the front and rear parts. Also, there is a slight elongation of the sample along the longitudinal axis and the temperature increases up to 600 K at the place of contact between the sample and the walls of the horizontal part of the channel.

References

1. Valiev R. Z., Islamgaliev R. K., Alexandrov I. V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation // *Progress in Materials Science*, 2000, vol. 45, issue 2, pp. 103–189.
2. Stolbovsky A. V., Popov V. V., Popova E. N., Falahutdinov R. M., Shorohov E. V. Specific features of strain behavior of bronzes under dynamic channel-angular pressing. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2016, no. 11-5, pp. 858–863.
3. Rusyak I. G., Ermolaev M. A. Wavelet-analysis application in problems about work of the regulated propulsion system. *Bulletin of Kalashnikov ISTU*, 2014, no. 4(64), pp. 162–165.
4. Zelepugin S. A., Bodrov A. S., Pakhnutova N. V. The diagram of the dynamic channel-angular pressing of titanium specimen // *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2017, no. 11-1, pp. 28–31.

6-16

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИ
СОГЛАСОВАННЫЕ ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ
ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО
ТЕПЛОВОГО ПРОЦЕССА
В ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ**

М. Я. Иванов, В. К. Мамаев

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

Представлены термодинамически согласованные законы сохранения массы, импульса и энергии, описывающие движение теплопроводного газа в высокотемпературных воздушно-реактивных двигателях (ВРД). В работе реализован расширенный вариант односкоростной двухкомпонентной математической модели сплошной сжимаемой среды с газовой и радиационной составляющими [1–3]. Предложенный вариант математической модели позволяет аккуратно учитывать тепловые потери и, прежде всего, потери полного давления реализуемого высокоинтенсивного рабочего процесса во всем тракте ВРД. Исследование опирается на известные опытные данные по разработке ВРД и некоторые экспериментальные результаты современной физики.

В плане разработки ВРД следует отметить отсутствие в настоящее время достаточно надежных способов предварительного проектировочного расчета рабочего процесса, которые позволяли бы на начальном этапе удовлетворительно согласовывать узлы двигателей и обеспечивать в дальнейшем получение требуемых характеристик новых изделий. Заданные проектные параметры вновь создаваемых двигателей существенно отличаются от регистрируемых экспериментально параметров на первых опытных экземплярах двигателей. К тому же в результате эксплуатации выявляются серьезные принципиальные недоработки [4, 5]. Эти обстоятельства требуют длительной последующей доводки высокотемпературных двигателей (с дополнительными финансовыми и временными затратами). В то же время применение корректной термодинамической теории и, прежде всего, аккуратное согласование горячих узлов ВРД позволили бы заметно сократить время создания новых изделий, избежать ошибок проектирования и уменьшить соответствующие финансовые издержки. В плане экспериментальных результатов работа опирается на опытные данные по зарегистрированным тепловым потерям в высокоскоростных потоках.

В работе представлены иллюстрации моделирования термогазодинамического процесса, реализующегося в полном тракте высокотемпературного авиационного газотурбинного двигателя.

Литература

1. Забродин А. В., Прокопов Г. П. Методика численного моделирования двумерных нестационарных течений теплопроводного газа в трехтемпературном приближении // *ВАНТ*, – 1998, вып. 3, стр. 3–16.

2. Методика численного моделирования двумерных нестационарных течений теплопроводного газа в трехтемпературном приближении в областях сложной формы с подвижными частицами (НЗТ) // М. : Ин-т Прикл. Матем РАН, 2008.
3. Иванов М. Я. Термодинамически согласованные законы сохранения в модели излучающего теплопроводного газа // ЖВММФ. – 2011. – т. 51, № 1, с. 142–151.
4. Guy Norris. F-35 Fire: In Search of A Solution. Aviation Week & Space Technology. Mon, 2014, 09-08.
5. TRENT 1000 problems. Flight International, 2018, 2-8/X, Vol. 194, No. 5656, p. 15.

THERMODYNAMICALLY CORRELATED LAWS OF CONSERVATION OF HIGH-INTENSITY THERMAL PROCESS IN AIR-JET ENGINES

M. Ya. Ivanov, V. K. Mamayev

Baranov Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russia

Thermally correlated laws of conservation of mass, momentum, and energy are presented describing the motion of heat-conducting gas in high-temperature air-jet engines (AJE). The work presents the extended version of one-velocity two-component mathematical model of continuous compressible medium including gas and radiation components [1–3]. The suggested mathematical model enables to accurately consider thermal losses and, above all, the losses of total pressure during high-intensity operation process in the whole AJE cycle. The study is based on the reported data on AJE R&D and some experimental results in up-to-date physics.

As for the current AJE R&D, one should note the lack of sufficiently reliable methods of preliminary design calculations of the operation process which would allow correlating the engine assemblies at the initial step and then providing required characteristics of new products. The defined design parameters of newly developed engines substantially differ from the ones experimentally measured using the first engine prototypes. Besides, during operation critical shortcomings are revealed [4, 5]. All this requires further long-term refining of high-temperature engines (including additional financial costs and time expenditures). At the same time, the use of consistent thermodynamic theory and, above all, accurate correlation of AJE hot assemblies would significantly reduce the time required for creating new products, avoid design errors, and cut down expenses. The work employs the experimental data reported on thermal losses in high-velocity flows.

The work also gives the pictures showing the simulation of gas-dynamic process occurring in the whole cycle of high-temperature aviation gas-turbine engine.

References

1. A. V. Zabrodin, G. P. Prokopov, Numerical Modeling of Two-Dimensional Non-Steady-State Flows of Heat-Conducting Gas in Three-Temperature Approximation, VANT, 1998, issue 3, pp. 3–16.
2. Numerical Simulation Method for Two-Dimensional Non-Steady-State Flows of Heat-Conducting Gas in the Three-

Temperature Approximation in the Shaped-Form Regions with Moveable Particles M.: Ин-т Прикл. Матем РАН, 2008.

3. M. Ya. Ivanov, Thermodynamically Correlated Conservation Laws in the Model of Radiating Heat-Conducting Gas, Journal of Advanced Mathematics and Mathematical Physics, 2011, volume 51, № 1, pp. 142–151.
4. Guy Norris, F-35 Fire: In Search of a Solution, Aviation Week & Space Technology, Mon, 2014, 09-08.
5. TRENT 1000 problems. Flight International, 2018, 2-8/X, Vol. 194, No. 5656, p. 15.

6-17

ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИИ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

С. П. Баутин, А. И. Коваленко

Снежинский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Снежинск, Россия

E-mail: anast4ver2@gmail.com

Предметом исследования в работе являются решения нелинейного дифференциального уравнения параболического типа, описывающие процесс фильтрации газа в пористом грунте, а также процесс нелинейной теплопроводности в случае степенной зависимости коэффициента теплопроводности от температуры [1]:

$$u_t = u\Delta u + \frac{1}{\sigma}(\nabla u)^2. \quad (1)$$

Для получения решений данного уравнения используется метод разделения переменных. Рассматриваются нестационарный и стационарный случаи при произвольном конечном числе независимых пространственных переменных.

Искомая функция в нестационарном случае выражается в виде бесконечно сходящегося ряда в окрестности точки $x = 0$ с нулевой температурой в начале координат:

$$u(t, x) = \frac{1}{(1-t)} \left\{ \left[\frac{(1+\sigma)}{\sigma} x \right]^{\frac{\sigma}{(1+\sigma)}} + \dots \right\}. \quad (2)$$

Другое точное решение для данного случая имеет вид:

$$u(t, x) = \frac{\sigma}{2(n\sigma + 2)} \frac{1}{(1-t)} \sum_{i=1}^n x_i^2. \quad (3)$$

В случае одной пространственной переменной одно точное решение совпало с полученным ранее [2]:

$$u(t, x) = \frac{\sigma}{2(\sigma + 2)} \frac{x^2}{(1-t)}. \quad (4)$$

Это решение описывает стоящий на месте фронт фильтрации при неограниченном росте давления в пласте по одну сторону от него.

В стационарном случае одно точное решение представляется следующим образом:

$$u = \left(\frac{\sigma+1}{\sigma}\right)^n \prod_{i=1}^n x_i^{\frac{\sigma}{\sigma+1}}. \quad (5)$$

Другие точные решения выписаны в квадратурах, поскольку исходная задача сведена к решению дифференциального уравнения первого порядка.

Все построенные решения можно использовать как тесты при численном решении рассматриваемого нелинейного уравнения (1).

Литература

1. Баутин С. П. Аналитическая тепловая волна. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
2. Самарский А. А., Галактионов В. А., Курдюмов С. П., Михайлов А. П. Режимы с обострением в задачах для параболических уравнений. М.: Наука, 1987.

EXACT SOLUTIONS OF THE NONLINEAR EQUATION FOR FILTERING AND THERMAL CONDUCTIVITY

S. P. Bautin, A. I. Kovalenko

Snezhinsk Physicotechnical Institute of National Research
Nuclear University MePhi
(Moscow Engineering Physics Institute), Snezhinsk, Russia
E-mail: anast4ver2@gmail.com

The subject of study in the present paper are solutions of the nonlinear parabolic differential equations describing gas filtering in a porous soil and nonlinear thermal conductivity in case of the power dependence of the thermal conductivity coefficient on temperature [1]:

$$u_t = u\Delta u + \frac{1}{\sigma}(\nabla u)^2. \quad (1)$$

The solutions of this equation are found by separation of variables. We consider non-stationary and stationary cases with an arbitrary finite number of independent spatial variables.

The required function in the nonstationary case is expressed as an infinitely convergent series at a point $x = 0$ at zero temperature in the origin of coordinates:

$$u(t, x) = \frac{1}{(1-t)} \left\{ \left[\frac{(1+\sigma)}{\sigma} x \right]^{\frac{\sigma}{1+\sigma}} + \dots \right\}. \quad (2)$$

An alternate exact solution for this case is given by:

$$u(t, x) = \frac{\sigma}{2(n\sigma+2)} \frac{1}{(1-t)} \sum_{i=1}^n x_i^2. \quad (3)$$

In case of one spatial variable, one exact solution was in close agreement with the previously found [2]:

$$u(t, x) = \frac{\sigma}{2(\sigma+2)} \frac{x^2}{(1-t)}. \quad (4)$$

This solution describes the stationary filtering front under an unlimited buildup of pressure in the stratum on the same side of it.

In the stationary case, one exact solution is given by:

$$u = \left(\frac{\sigma+1}{\sigma}\right)^n \prod_{i=1}^n x_i^{\frac{\sigma}{\sigma+1}}. \quad (5)$$

Other exact solutions are put down in quadratures because the original problem reduces to the first-order differential equation.

All the derived solutions might be used as tests in obtaining a numerical solution of the nonlinear equation being considered (1).

References

1. Bautin S. P. Analytical heat wave. Moscow: Fizmat, 2003.
2. Samarsky A. A., Galaktionov V. A., Kurdyumov S. P., Mikhailov A. P. The escalation modes in the problems for parabolic equations. M: Nauka, 1987.

6-18

СРАВНЕНИЕ ST, DDAD И ATVDR СХЕМ В ПРИБЛИЖЕНИИ КВАЗИПЕРЕНОСА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Д. А. Кошутин, А. В. Уракова, А. А. Шестаков

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

Система уравнений переноса излучения и уравнения энергии представляет собой сложную, нелинейную систему, поэтому ее часто решают в более простом приближении. Одним из применяемых упрощений является приближение квазипереноса, предложенное М. Ю. Козмановым в 2010 году. На первом этапе решается кинетическое уравнение для вычисления квазикинетических коэффициентов. На втором этапе приближение квазипереноса приводит к параболической системе уравнений, которая решается с учетом квазикинетических коэффициентов монотонной схемой Ромб второго порядка аппроксимации по пространству.

На первом этапе для решения кинетического уравнения можно использовать линейную St схему или линейную DDAD схему. Схема St – монотонна, но имеет первый порядок аппроксимации. Схема DDAD имеет второй порядок аппроксимации по пространству, но немонотонна.

Одним из путей к построению монотонной схемы второго порядка для гиперболического уравнения переноса является использование TVDR-схем. Однако, во-первых, они нелинейные, т.е. более сложные в реализации и менее экономичные, чем линейные схемы. Во-вторых, они требуют специальных видоизменений для счета односторонних производных у границ. Наконец, реализация этих схем чрезвычайно сложна

для многомерных геометрий и неструктурированных сеток.

В докладе приведено сравнение трех схем для вычисления квазикинетических коэффициентов при решении переноса теплового излучения методом квазипереноса.

COMPARISON OF ST, DDAD, AND TVDR SCHEMES IN QUASI-TRANSPORT APPROXIMATION FOR HEAT TRANSFER PROBLEMS

D. A. Koshutin, A. V. Urakova, and A. A. Shestakov

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

The system of heat transfer equations and the energy equation is a complicated nonlinear system which is then often solved in simpler approximations. One of them is a quasi-transport approximation proposed in 2010 by M. Y. Kozmanov. Its first phase involves the solution of the kinetic equation to calculate quasi-kinetic coefficients. In the second phase the quasi-transport approximation gives parabolic equations which are solved with the quasi-kinetic coefficients using the monotone scheme ROMB of the second order of approximation in space.

For solving the kinetic equation in the first phase, one can use either the linear St scheme, or the linear DDAD scheme. The St scheme is monotone, but the order of approximation is one. The DDAD has the second order of approximation, but it is not monotone.

One of the ways to construct a second order monotone scheme for the hyperbolic transport equation is to use the TVDR schemes. But, firstly, they are nonlinear and then more difficult to implement and provide economic work compared to the linear schemes. Secondly, they require special modifications to calculate one-sided derivatives near the boundaries. Finally, these schemes are very difficult to implement for multidimensional geometries and unstructured meshes.

The paper compares three schemes for calculating quasi-kinetic coefficients when heat transfer is solved with quasi-transport.

6-19

МЕТОД РАСЧЕТА ДВИЖЕНИЯ АБСОЛЮТНО ТВЕРДОГО ТЕЛА В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ СРЕДЕ НА НЕПОДВИЖНОЙ СЧЕТНОЙ СЕТКЕ

A. A. Краюхин, А. Л. Стадник, Ю. В. Янилкин

Российский федеральный ядерный центр – ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

E-mail: krayukhin@list.ru

Предложен метод BODY-3D расчета пространственного движения абсолютно твердого тела в упругопластической среде с учетом силы трения на неподвижной счетной сетке. В этом подходе численное

моделирование течения вещества преграды проводится в неинерциальной системе отсчета, относительно которой проникающее тело неподвижно. Описана реализация метода BODY-3D в методике ЭГАК, приведены результаты тестовых расчетов на неподвижной счетной сетке. Тестирование осуществлялось на модельных задачах и опытах, связанных с движением малодеформируемых тел в различных упругопластических средах. В расчетах получено хорошее согласие с экспериментальными данными.

A METHOD FOR CALCULATING THE MOTION OF A RIGID BODY IN AN ELASTOPLASTIC MEDIUM ON A FIXED MESH

A. A. Krayukhin, A. L. Stadnik, Yu. V. Yanilin

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

E-mail: krayukhin@list.ru

We propose a method BODY-3D for calculating the spatial motion of a rigid body in an elastoplastic medium with friction on a fixed mesh. In this approach, the flow of matter in the target is numerically simulated in a noninertial reference frame, in which the penetrating body is motionless. We describe the implementation of the BODY-3D method in the EGAK code and present results of test computations on a fixed mesh. The tests included benchmark problems and experiments involving the motion of hard-to-deform bodies in various elastoplastic media. The computations closely match the experimental data.

6-20

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

A. A. Кулешов, Е. Е. Мышецкая

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

E-mail: andrew_kuleshov@mail.ru

Для прогнозирования распространения фронта лесных пожаров в реальном времени, для получения экспертных оценок развития чрезвычайных ситуаций, связанных с лесными пожарами, и оценки ущерба от пожаров целесообразно использовать двумерные математические модели, допускающие эффективную численную реализацию на высокопроизводительных вычислительных системах. В ранних работах авторов [1, 2] была разработана физически обоснованная двумерная двухфазная модель распространения лесных пожаров. Модель основана на математическом описании лесного пожара как двухфазной реагирующей среды, а уравнения модели получены осреднением исходных трехмерных уравнений по высоте слоя лесных горючих материалов. В настоящей работе

представлена модифицированная двумерная модель лесных пожаров. Приведенные результаты демонстрационных расчетов показывают, что предложенная модель дает качественно правильную картину образования и распространения фронта пожара в условиях неоднородного распределения запасов лесных горючих материалов, наличия препятствий для распространения огня и влияния ветра.

Литература

1. Кулешов А. А., Мышецкая Е. Е. Математическое моделирование лесных пожаров с применением многопроцессорных ЭВМ // Матем. моделирование, 2008. – Т. 20. – № 11. – С. 28–34.
2. Kuleshov A. A., Chetverushkin B. N., Myshetskaya E. E. Parallel computing in forest fire two-dimension modeling // Computers and Fluids. – 2013. – Vol. 80. – PP. 202–206.

NUMERICAL SIMULATION OF FOREST FIRE PROPAGATION

A. A. Kuleshov, E. E. Myshetskaya

Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Science, Moscow, Russia

E-mail: andrew_kuleshov@mail.ru

To predict the propagation of forest fires in real time, to obtain expert assessments of the development of emergency situations associated with forest fires, and to assess fire damage, it is advisable to use two-dimensional mathematical models that allow efficient numerical implementation on high-performance computing systems. A physics-based two-dimensional two-phase model of the forest fires was developed in the early studies of the authors [1, 2]. This model based on the mathematical description of the forest fire as a two-phase reacting medium, and the equations of the model are obtained by averaging the original three-dimensional equations with respect to the height of the forest fuel layer. A modified two-dimensional two-phase mathematical model of forest fires propagation is considered currently. The results of computations show that the developed model can serve to carry out numerical simulation of the fire front propagation in conditions of non-homogeneous forest fuel distribution, obstacles and the effects of wind.

References

1. Kuleshov A. A., Myshetskaya E. E. Mathematical simulation of forest fires using multiprocessor computers // Mathematical Models and Computer Simulations, 2009. – Vol. 1. – No. 4. – PP. 629–634.
2. Kuleshov A. A., Chetverushkin B. N., Myshetskaya E. E. Parallel computing in forest fire two-dimension modeling // Computers and Fluids. – 2013. – Vol. 80. – PP. 202–206.

6-21

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНТЕНСИВНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ С ВЕЩЕСТВОМ

А. Я. Лейви, А. П. Яловец

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», Челябинск, Россия

E-mail: leiviai@susu.ru

Задача взаимодействия интенсивных плазменных потоков с веществом тесно связана с двумя фундаментальными задачами: модификация материала [1], радиационная стойкость стенки термоядерного реактора в экспериментах по управляемому термоядерному синтезу [2]. Несмотря на то, что к настоящему времени накоплен огромный эмпирический материал по данной проблеме, описать динамические явления, наблюдаемые в веществе при взаимодействии интенсивных плазменных потоков только экспериментально, весьма затруднительно. В связи с этим, очевидна необходимость в разработке теоретических моделей, описывающих воздействие интенсивных потоков энергии на вещество, в построении эффективных алгоритмов решения уравнений и проведении численных исследований.

В данной работе представлена математическая модель, описывающая взаимодействие интенсивных плазменных потоков с веществом.

Двухмерная осесимметричная математическая модель включает в себя одножидкостные, двухтемпературные уравнения газовой динамики и уравнение переноса излучения, а также систему уравнений механики сплошной среды, описывающую упругопластические течения в мишени. Математическая модель реализована в виде программного комплекса PLATAIN, моделирующего взаимодействие КПП с веществом в рамках одножидкостной двухтемпературной модели с учетом радиационного переноса энергии и упругопластических течений в облучаемой мишени. Для описания пластических течений использовалась модель Прандтля-Рейса. Неравновесные напряжения учтены в шаровой и девиаторной части тензора напряжения.

Проведенные численные исследования показали, что передача энергии от плазменного потока твердому телу носит не монотонный характер с максимальным значением доли переданной энергии $\sim 0,25$. Доля переданной мишени энергии за счет радиационного механизма существенно (в 2–3 раза) превышает долю переданной энергии за счет теплопроводности.

Литература

1. Углов В. В., Черенда Н. Н., Анищик В. М. и др. // Минск: БГУ, 2013. – С. 248.
2. И. М. Позняк, Н. С. Климов, В. Л. Подковыров и др. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2012. – Вып. 4. – С. 23–33.

MATHEMATICAL MODELING OF THE INTERACTION OF INTENSE PLASMA FLOWS ON A SUBSTANCE

A. Ya. Leyvi, A. P. Yalovets

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «South Ural State University (national research university)», Chelyabinsk, Russia

E-mail: leiviai@susu.ru

The problem of interaction of intense plasma flows with matter is closely related to two fundamental tasks: material modification [1], radiation resistance of a fusion reactor wall in controlled thermonuclear fusion experiments [2]. Despite the fact that a great amount of empirical material on this problem has been accumulated so far, it is very difficult to describe the dynamic phenomena observed in a substance during the interaction of intense plasma flows only experimentally. In this regard, there is an obvious need to develop theoretical models that describe the effect of intense energy flux on a substance, to build effective algorithms for solving equations, and to conduct numerical studies.

This paper presents a mathematical model that describes the interaction of intense plasma flows with matter.

The two-dimensional axisymmetric mathematical model includes single-fluid, two-temperature equations of gas dynamics and the radiation transfer equation, as well as a system of equations of continuum mechanics, describing elastoplastic flows in a target. The mathematical model is implemented in the form of the PLATAIN software package, which simulates the interaction of a checkpoint with a substance within the framework of a one-fluid two-temperature model taking into account radiative energy transfer and elastoplastic flows in an irradiated target. For the description of plastic flows, the Prandly-Reuss model was used. Nonequilibrium voltages are counted in the ball and deviator parts of the stress tensor.

The conducted numerical studies have shown that the transfer of energy from the plasma flow to a solid body is not monotonic with the maximum value of the transmitted energy of ~ 0.25 . The fraction of the energy transferred to the target due to the radiation mechanism significantly (by a factor of 2–3) exceeds the fraction of the transmitted energy due to thermal diffusivity.

The research was supported in part by the Ministry of Education and Science of the

Russian Federation (2017122-GZ) for support of research at the South Ural State University).

The work was supported by Act 211 Government of the Russian Federation, contract № 02.A03.21.0011

References

1. Uglov V. V., Cherenda N. N., Anishik V. M. et al. // Minsk: BGU, 2013. – P. 248.
2. Poznyak I. M., Klimov N. S., Pogkovirov V. L. and etc. // VANT ser. Termoyaderniy sintez. – 2012. – V. 4. – P. 23–33.

6-22

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГРАНИЦЫ «ГАЗ–ВАКУУМ» ВОСХОДЯЩЕГО ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ВНЕШНЕЙ СИЛЫ

А. В. Мезенцев

Уральский государственный университет путей сообщения,
Екатеринбург, Россия

E-mail: AMezentsev@usurt.ru

В данной работе рассматриваются трехмерные течения идеального политропного газа, примыкающие к вакууму в условиях действия сил тяготения, Кориолиса и горизонтальной внешней силы. В работе [1] исследуется закон движения свободной поверхности – границы «газ–вакуум» и поведение газодинамических параметров на ней для течений газа, в начальный момент закрученных как твердое тело, имеющее цилиндрическую или коническую форму. Продолжая исследования [1], в данной работе дополнительно учитывается действие горизонтальной внешней силы.

Предполагается, что с одной стороны от цилиндрической поверхности находится газ, а по другую от нее сторону – вакуум. Моделируется поведение вертикальной части восходящего закрученного потока типа торнадо под действием ветровой нагрузки.

В качестве математической модели используются системы уравнений газовой динамики в декартовой и цилиндрической системе координат. С помощью масштабных значений скорости, времени, расстояния в системах уравнений газовой динамики вводятся безразмерные переменные. Масштабные значения скорости и расстояния соответствуют классам торнадо и циклонов из шкалы Фудзиты. Решается задача о непрерывном примыкании газа к вакууму.

Для определения закона движения границы «газ–вакуум» и газодинамических параметров на ней записываются квазилинейные системы уравнений в частных производных. Полученные системы с помощью характеристического параметра сводятся к системам обыкновенных дифференциальных уравнений. Решения соответствующих систем обыкновенных дифференциальных уравнений в декартовой системе координат получается в виде формул, в цилиндрической системе координат интегрируются численными методами.

Движение границы «газ–вакуум» строится численно. Из отдельных траекторий удалось «собрать» свободную поверхность в целом.

Литература

1. Дерябин С. Л., Мезенцев А. В. Численно-аналитическое моделирование газовых течений, примыкающих к вакууму в условиях действия сил тяготения и Кориолиса // Вычислительные технологии. – 2010. – Т. 15. – № 5. – С. 51–71.

**MATHEMATICAL MODELING OF THE
MOVEMENT OF THE BORDER “GAS–VACUUM”
OF THE UPWARD SWIRLING FLOW
UNDER THE ACTION OF HORIZONTAL
EXTERNAL FORCES**

A. V. Mezentsev

Ural State University of Railway Transport,
Ekaterinburg, Russia

E-mail: AMezentsev@usurt.ru

This paper discusses the three-dimensional flow of an ideal polytropic gas, adjacent to the vacuum under the action of gravity, Coriolis and the horizontal external force. In [1], the law of motion of a free surface is investigated – the gas–vacuum boundary and the behavior of gas-dynamic parameters on it for gas flows at the initial moment twisted like a solid body having cylindrical or conical shapes. Continuing the research [1], in this work the effect of the horizontal external force is additionally taken into account.

It is assumed that on one side of the cylindrical surface there is a gas, and on the other side of it there is a vacuum. The behavior of the vertical part of the ascending swirling flow like a tornado under the action of wind load is simulated.

As a mathematical model, systems of equations of gas dynamics in the Cartesian and cylindrical coordinate systems are used. With the help of scale values of speed, time, distance in the systems of equations of gas dynamics, dimensionless variables are introduced. The scale values of speed and distance correspond to the classes of tornado and cyclones from the Fujita scale. The problem of continuous gas adjoining to a vacuum is solved.

To determine the law of motion of the “gas–vacuum” boundary and the gas-dynamic parameters, quasilinear systems of partial differential equations are written on it. The systems obtained using the characteristic parameter are reduced to systems of ordinary differential equations. Solutions of the corresponding systems of ordinary differential equations in the Cartesian coordinate system are obtained in the form of formulas, in the cylindrical coordinate system is integrated by numerical methods.

The motion of the gas–vacuum boundary is constructed numerically. From individual trajectories it was possible to “collect” the free surface as a whole.

References

1. Deryabin S. L., Mezentsev A. V. Numerical and analytical modeling of gas flows adjacent to the vacuum under the action of gravity and Coriolis // Computational Technologies. – 2010. – Vol. 15. – № 5. – Pp. 51–71. (in Russian).

6-23

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ
ИСКРОВОГО ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ
ВЗВЕСИ ПОРОШКА АЛЮМИНИЯ В ВОЗДУХЕ**

К. М. Моисеева, А. Ю. Крайнов

Томский государственный университет, Томск, Россия

E-mail: Moiseeva_KM@t-sk.ru

В докладе представлены результаты по численному моделированию искрового зажигания взвеси порошка алюминия в воздухе и последующему распространению пламени по аэровзвеси. Целью численного исследования являлось определение критических условий искрового зажигания порошка алюминия и последующий расчет скорости распространения волны горения.

Физико-математическая постановка задачи основывается на подходах механики двухфазных реагирующих сред и учитывает тепловое, динамическое и химическое взаимодействие между газом и частицами. Постановка задачи определяется уравнениями сохранения массы, импульса и энергии газа и частиц с замыкающими соотношениями. Метод решения основан на алгоритме распада произвольного разрыва С. К. Годунова для газа и алгоритме распада разрыва в среде, лишенной собственного давления, для частиц.

Расчет задачи искрового зажигания монодисперсной взвеси порошка алюминия показал, что для частиц радиуса меньше 0,6 мкм минимальная энергия искрового зажигания стремится к одному и тому же значению при стремлении коэффициента избытка окислителя к единице (стехиометрическая смесь, $\rho_{kb} \approx 0,274$ кг/м³). Для крупных частиц наблюдается существенная зависимость минимальной энергии искрового зажигания от массовой концентрации частиц.

Расчет задачи искрового зажигания бидисперсной аэровзвеси частиц алюминия показал, что присутствие мелкодисперсной фракции частиц существенным образом сказывается на минимальной энергии искрового зажигания с выходом горения на устойчивый режим. В присутствии мелкодисперсной фракции частиц минимальная энергия искрового зажигания бидисперсной аэровзвеси порошка алюминия значительно уменьшается по сравнению с минимальной энергией искрового зажигания монодисперсной аэровзвеси крупных частиц.

Из расчетов скорости распространения пламени по аэровзвеси порошка алюминия определено, что массовая концентрация и размер частиц алюминия влияют на видимую скорость распространения фронта горения. Увеличение размера частиц приводит к уменьшению видимой скорости распространения фронта горения, при этом скорость горения стремится к одному и тому же значению, не зависящему от размера частиц.

Полученные результаты качественно соответствуют результатам, описанным в монографии [1]. Предложенные физико-математические модели, а также алгоритмы и программы численной реализации

предложенных алгоритмов позволяют с удовлетворительной точностью решать задачи воспламенения и горения двухфазных сред.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-20011).

Литература

1. Ягодников Д. А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов / М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 432 с.

SOLVING PROBLEMS OF SPARK IGNITION AND BURNING OF ALUMINUM POWDER SUSPENSION IN THE AIR

K. M. Moiseeva, A. Yu. Krainov

Tomsk State University, Tomsk, Russia

E-mail: Moiseeva_KM@t-sk.ru

The report presents the results of numerical simulation of the spark ignition of aluminum powder suspension in the air and the subsequent spread of the flame through the aerospace. The purpose of the numerical study was to determine the critical conditions for the spark ignition of aluminum powder and the subsequent calculation of the velocity of propagation of the combustion wave.

The physico-mathematical formulation of the problem is based on the approaches of the mechanics of two-phase reactive media and takes into account the thermal, dynamic and chemical interaction between gas and particles. The statement of the problem is determined by the equations of conservation of mass, momentum and energy of gas and particles with closing ratios. The solution method is based on the S. K. Godunov decomposition algorithm for a gas and the discontinuity decay algorithm in a medium without its own pressure for particles.

The calculation of the spark ignition problem for a monodisperse suspension of aluminum powder showed that for particles with a radius of less than 0.6 microns the minimum spark ignition energy tends to the same value as the oxidizer excess coefficient tends to unity (stoichiometric mixture, $\rho_{kb} \approx 0.274 \text{ kg/m}^3$). For large particles, there is a significant dependence of the minimum spark ignition energy on the mass concentration of particles.

The calculation of the spark ignition problem for a bidispersed air suspension of aluminum particles showed that the presence of a fine fraction of particles significantly affects the minimum spark ignition energy with a steady-state burning output. In the presence of a fine particle fraction, the minimum spark ignition energy of a bidisperse air suspension of aluminum powder is significantly reduced as compared with the minimum spark ignition energy of a monodisperse air suspension of large particles.

From calculations of the flame propagation velocity over the suspension of aluminum powder, it was determined that the mass concentration and the size of aluminum particles affect the apparent propagation velocity of the combustion front. An increase in particle size leads to a decrease in the apparent propagation velocity of the

combustion front, while the burning rate tends to the same value, independent of the particle size.

The results obtained qualitatively correspond to the results described in the monograph [1]. The proposed physical and mathematical models, as well as algorithms and programs for the numerical implementation of the proposed algorithms, allow satisfying the problems of ignition and combustion of two-phase media with satisfactory accuracy.

The research was carried out by financial support the Russian Science Foundation (project No. 17-79-20011).

References

1. Yagodnikov D. A. 2009 Ignition and combustion of powdered metals (Moscow: MGTU im. N. E. Bauman)

6-24

РАСЧЕТЫ СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЧЕНИЙ ГАЗА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ОГНЕННЫХ ВИХРЕЙ

А. Г. Обухов

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

E-mail: agobukhov@inbox.ru

В работе [1] продемонстрирована возможность физически смоделировать свободные огненные вихри в условиях лаборатории без использования специальных закручивающих устройств. Задачей данной работы является численное моделирование генерации свободных огненных вихрей в лабораторных условиях.

В модели сжимаемой сплошной среды для полной системы уравнений Навье-Стокса предложена начально-краевая задача, описывающая сложные трехмерные нестационарные течения вязкого сжимаемого теплопроводного газа в восходящих закрученных тепловых потоках, которые инициируются нагревом подстилающей поверхности девятнадцатью источниками. С помощью явных разностных схем и предложенных начально-краевых условий построены приближенные решения полной системы уравнений Навье-Стокса [2] и определены скоростные характеристики трехмерных нестационарных течений газа.

В качестве начальных условий при описании соответствующих течений сжимаемого вязкого теплопроводного газа в случае постоянных значений коэффициентов вязкости и теплопроводности взяты функции, задающие точное решение [3] полной системы уравнений Навье-Стокса. Граничные условия и способы вычисления газодинамических характеристик на границах расчетной области подробно описаны в [4].

Нагрев девятнадцати областей нижней поверхности до температуры 300°C моделируется функцией координат и времени

$$T(x, y, t) = 1 + T^* (1 - e^{-10t}) \sum_{l=1}^{19} e^{-\frac{(x-x_l)^2 + (y-y_l)^2}{r_0^2}},$$

где $T^* = 0,99$ – коэффициент, определяющий добавку к значению температуры, $r_0 = 0,02$ (0,02 м) – безразмерные значения радиусов нагрева, $x_l, y_l, l = 1 \div 19$ – координаты центров источников нагрева нижней плоскости расчетной области, расположенных в центре нижней грани расчетной области внутри круга радиуса $R = 0,15$ (0,15 м).

Рассчитанные три компоненты скорости течения газа характеризуют следующие последовательные фазы появления тепловых вихрей. Первая фаза характеризуется появлением девятнадцати потоков газа, расходящихся от областей нагрева. Эти потоки газа имеют отрицательное направление закрутки. Вторая фаза характеризуется появлением вокруг каждой области нагрева локальных вихрей с противоположной направленностью вращения. Как следует из проведенных расчетов, с наступлением третьей фазы возникает общее встречное движение газовых потоков от периферии к центру. Это радиальное движение под действием силы Кориолиса имеет положительную закрутку. Результатом взаимодействия тепловых потоков является появление общего огненного вихря больших размеров и интенсивности.

Исследования поддержаны Министерством образования и науки РФ (проект №1.4539.2017/8.9).

Литература

1. Вараксин А. Ю., Ромаш М. Э., Копейцев В. Н., Горбачев М. А. О возможной генерации огненных вихрей без использования принудительной закрутки // Доклады Академии наук. – 2014. – Т. 456, № 2. – С. 159–161.
2. Баутин С. П., Дерябин С. Л., Крутова И. Ю., Обухов А. Г. Разрушительные атмосферные вихри и вращение Земли вокруг своей оси. – 2017. – Екатеринбург: УрГУПС. – 336 с.
3. Баутин С. П., Обухов А. Г. Одно точное стационарное решение системы уравнений газовой динамики // Известия вузов. Нефть и газ. – 2013. – № 4. – С. 81–86.
4. Баутин С. П., Обухов А. Г. Об одном виде краевых условий при расчете трехмерных нестационарных течений сжимаемого вязкого теплопроводного газа // Известия вузов. Нефть и газ. – 2013. – № 5. – С. 55–63.

CALCULATIONS OF HIGH SPEED CHARACTERISTICS GAS FLOWS IN MODELING CONCENTRATED FIRE VORTEX

A. G. Obukhov

Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

E-mail: agobukhov@inbox.ru

In [1], the ability to physically model free fire vortices in the laboratory without the use of special twisting devices was demonstrated. The objective of this work is the numerical simulation of the generation of free fire vortices in the laboratory.

In the compressible continuum model for the complete Navier-Stokes system of equations, an initial-boundary value problem is proposed that describes complex three-dimensional unsteady flows of a viscous compressible heat-conducting gas in ascending swirling heat flows,

which are initiated by heating the underlying surface by nineteen sources. Using explicit difference schemes and the proposed initial-boundary conditions, approximate solutions of the complete system of Navier – Stokes equations [2] are constructed and the velocity characteristics of three-dimensional unsteady gas flows are determined.

As the initial conditions for describing the corresponding flows of a compressible viscous heat-conducting gas in the case of constant values of the viscosity and thermal conductivity coefficients, the functions defining the exact solution [3] of the complete Navier-Stokes system of equations are taken. The boundary conditions and methods for calculating the gas-dynamic characteristics on the faces of the computational domain are described in detail in [4].

Heating of nineteen areas of the bottom surface to a temperature of 300°C is modeled by the function of coordinates and time

$$T(x, y, t) = 1 + T^* (1 - e^{-10t}) \sum_{l=1}^{19} e^{-\frac{(x-x_l)^2 + (y-y_l)^2}{r_0^2}},$$

where $T^* = 0.99$ is the coefficient determining the additive to the temperature value, $r_0 = 0.02$ (0.02 m) are the dimensionless values of the heating radii, $x_l, y_l, l = 1 \div 19$ coordinates of the centers of the sources of heating of the lower plane of the computational domain located in the center of the lower edge of the computational domain within a circle of radius $R = 0.15$ (0.15 m).

The calculated three components of the gas flow rate characterize the following successive phases of the appearance of thermal vortices. The first phase is characterized by the appearance of nineteen gas streams diverging from the heating regions. These gas flows have a negative spin direction. The second phase is characterized by the appearance of local vortices with the opposite direction of rotation around each heating region. As follows from the calculations carried out, with the onset of the third phase, a general counter-movement of gas flows from the periphery to the center occurs. This radial motion by the Coriolis force has a positive twist. The result of the interaction of heat flows is the emergence of a common fire vortex of large size and intensity.

The research was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project No. 1.3339.2017 / 8.9).

References

1. Varaksin A. Yu., Romash M. E., Kopeytshev V. N., Gorbachev M. A. On the possible generation of fire vortices without using forced spin // Reports of the Academy of Sciences. – 2014. – V. 456, № 2. – P. 159–161.
2. Bautin S. P., Deryabin S. L., Krutova I. Yu., Obukhov A. G. Destructive atmospheric whirlwinds and the Earth's rotation around its axis. – 2017. – Ekaterinburg: USURT. – P. 336.
3. Bautin S. P., Obukhov A. G. One exact stationary solution of the system of equations of gas dynamics // Izvestiya Vuzov. Oil and gas. – 2013. – № 4. – P. 81–86.
4. Bautin S. P., Obukhov A. G. On one type of boundary conditions when calculating three-dimensional unsteady flows of

compressible viscous heat-conducting gas // *Izvestiya Vuzov. Oil and gas.* – 2013. – № 5. – Pp. 55–63.

6-25

РАСЧЕТ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТРЕХМЕРНЫХ СТАЦИОНАРНЫХ ПОТОКОВ В ПРИДОННОЙ ЧАСТИ ТОРНАДО

И. Ю. Крутова¹, О. В. Опрышко^{1,2}

¹Снежинский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Снежинск, Россия

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

Восходящие закрученные потоки воздуха, такие как: вихри, смерчи, торнадо возникают из обычного, поднимающегося вверх течения воздуха, прогретого солнцем. Потоки представляют собой семейство интересных природных явлений, которые имеют характерные особенности: закрутка воздуха и высокие скорости потока. Для существования такой системы необходим постоянный приток энергии, который обеспечивает сила, постоянно присутствующая и обладающая вращательным моментом – сила Кориолиса [1–3].

В работе представлена система уравнений газовой динамики в условиях действия сил тяжести и Кориолиса. Рассматривается одна конкретная характеристическая задача Коши с начальными данными на горизонтальной плоскости $z = 0$, являющейся контактной характеристикой кратности два [1–3].

Для того, чтобы в рамках предложенной С. П. Баутиным схемы математически смоделировать течение газа в придонной части торнадо, в качестве данных натурных наблюдений за торнадо используются шкала Фудзиты, где указана ширина полосы разрушения и максимальной скорости ветра для различных классов торнадо. С помощью метода Рунге–Кутты четвертого порядка точности при решении системы обыкновенных дифференциальных уравнений находятся газодинамические параметры потока. Произведены расчеты плотности газа, окружной, радиальной и вертикальной составляющих вектора скорости ветра.

В работе представлен метод приближенного численно-аналитического расчета кинетической энергии, которая образуется в результате образования восходящего закрученного потока. Представлены расчеты кинетической энергии с учетом различных значений высот.

Литература

1. Баутин С. П. Торнадо и сила Кориолиса / Новосибирск: Наука, 2008. – 96 с.
2. Баутин С. П., Обухов А. Г. Математическое моделирование разрушительных атмосферных вихрей / Новосибирск: Наука, 2012. – 152 с.

3. Баутин С. П., Дерябин С. Л., Крутова И. Ю., Обухов А. Г. Разрушительные атмосферные вихри и вращение Земли вокруг своей оси / Екатеринбург: УрГУПС, 2017. – 355 с.

CALCULATION OF GAS-DYNAMIC PARAMETERS AND KINETIC ENERGY OF SPECIAL THREE-DIMENSIONAL STATIONARY FLOWS OF BOTTOM PARTS OF TORNADES

I. Yu. Krutova¹, O. V. Opryshko^{1,2}

¹Snezhinsk Physicotechnical Institute NRSU MEFPI, Snezhinsk, Russia

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

Ascending swirling flows of air in particular vortexes, whirlwinds, and tornadoes appear as a result of rising flows of warm air heated by the sun. Flows are a group of interesting natural phenomena characterized by air twist and high flow rates. Such system requires a constant flow of energy, which can be provided by the Coriolis force [1–3] that is constantly present and has a torque.

The paper presents a set of gas-dynamic equations under the gravitational force and the Coriolis force. 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 [1–3].

To make a mathematical model of gas flow in the bottom part of a tornado according to the scheme by S.P. Bautin the Fujita scale is used. It includes the data of in situ observations of tornado of various intensity, namely, values of the width of damage path and maximum wind speed. The gas-dynamic parameters are found using the fourth-order Runge-Kutta method. Calculations of gas density, circumferential, radial and vertical components of the velocity vector have been made.

The paper presents a method of approximate analytical and numerical calculation of kinetic energy, which is formed as a result of the formation of an ascending swirling flow. The calculations of the kinetic energy are given taking into account various values of heights.

References

1. Bautin S. P. Tornado and Coriolis force / *Nauka, Novosibirsk*, 2008. – 96 p.
2. Bautin S. P., Obuhov A. G. Mathematical modeling of destructive atmospheric vortices / *Novosibirsk, Nauka*, 2012. – 152 p.
3. Bautin S. P., Deryabin S. L., Krutova I. Yu., Obuhov A. G. Destructive atmospheric vortices and Earth's rotation around its axis / *Yekaterinburg, USURT*, 2017. – 355 p.

6-26

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕННОГО ШАГА
В НЕЯВНОЙ РАЗНОСТНОЙ СХЕМЕ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НА ТРЕХМЕРНОЙ
НЕСТРУКТУРИРОВАННОЙ СЕТКЕ**

М. А. Писклова, И. В. Глазырин, Н. А. Михайлов

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

E-mail: n.a.mikhaylov@vniitf.ru

Рассматривается вопрос определения временного шага в неявной разностной схеме градиентного типа для решения трехмерного уравнения нелинейной теплопроводности на неструктурированной сетке из произвольных многогранников в программе Фокус [1].

Обычно в разностных схемах для уравнения теплопроводности при неявной аппроксимации коэффициента теплопроводности применяется метод простой итерации:

$$\rho \frac{e^{v+1} - e^v}{\Delta t} = \nabla \cdot (\chi(\rho, T^v) \nabla T^{v+1}), \quad (1)$$

где $\rho(\vec{r})$ – плотность, $e(\rho, T)$ – удельная внутренняя энергия, $\chi(\rho, T)$ – коэффициент теплопроводности,

$T(t, \vec{r})$ – температура. На каждой итерации (1) решается система линейных алгебраических уравнений.

В одномерном случае линейный анализ устойчивости такой схемы дает условие на шаг по времени, обеспечивающее сходимость итерационного метода [2]. Данное условие связывает число Куранта переноса тепла $K_T \sim \Delta t/h$ с обычным теплопроводным числом Куранта $K_0 \sim \Delta t/h^2$

$$(K_T)^2 < CK_0, \quad (2)$$

где $C(\rho, T, h)$ зависит от решения на предыдущем временном слое.

Соотношение типа (2) применяется для получения условия на временной шаг в трехмерной схеме на неструктурированной сетке в программе Фокус. Для каждой ячейки соотношение (2) дает требуемый временной шаг, и в качестве используемого временного шага берется минимальный по всем ячейкам. Эффективность предложенного алгоритма выбора временного шага показывается на задаче о распространении тепловой волны в трехслойной системе [3].

Литература

1. Н. А. Михайлов, И. В. Глазырин, Метод укрупнения контактных границ для моделирования трехмерных многофазных сжимаемых течений в эйлеровых переменных. Забабахинские научные чтения: сборник тезисов XIII Международной конференции 20–24 марта 2017. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ – ВНИТФ, с. 326, 2017.

2. Ю. А. Бондаренко, А. А. Горбунов. Практические условия устойчивости для счета тепловых волн в неявных разностных схемах // ВАИТ, сер. ММФП. – 2008. – Т. 4. – с. 3–12.

3. Ю. А. Бондаренко, Б. Л. Воронин, В. В. Горев и др. Описание набора тестов для методик и программ, предназначенных для решения двумерных задач теплопроводности // ВАИТ, сер. ММФП. – 1992. – Т. 2. – с. 14–20.

**THE DETERMINATION OF TIME STEP
IN AN IMPLICIT DIFFERENCE SCHEME
FOR THE SOLUTION OF THE NONLINEAR
HEAT CONDUCTION EQUATION ON
UNSTRUCTURED THREE-DIMENSIONAL MESH**

M. A. Pisklova, I. V. Glazyrin, and N. A. Mikhaylov

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

E-mail: n.a.mikhaylov@vniitf.ru

The problem of the time step determination in an implicit gradient-type difference scheme for solving the 3D nonlinear heat conductivity equation on an unstructured grid of arbitrary polyhedra in the Focus code [1] is considered.

Typically, the simple iteration method is applied to difference schemes with an implicit approximation of the thermal conductivity coefficient

$$\rho \frac{e^{v+1} - e^v}{\Delta t} = \nabla \cdot (\chi(\rho, T^v) \nabla T^{v+1}), \quad (1)$$

where $\rho(\vec{r})$ is density, $e(\rho, T)$ is specific internal energy, $\chi(\rho, T)$ is heat conduction coefficient, and $T(t, \vec{r})$ is temperature. At each iteration the system (1) of linear algebraic equations is solved.

In the 1D case, the linear stability analysis of such a scheme gives a time step condition providing the convergence of the iterative method [2]. This condition relates the heat transfer Courant number $K_T \sim \Delta t/h$ to the conventional heat-conducting Courant number $K_0 \sim \Delta t/h^2$:

$$(K_T)^2 < CK_0, \quad (2)$$

where $C(\rho, T, h)$ depends on the solution at the previous time layer.

The type ratio (2) is used to obtain a time step condition in 3D scheme on an unstructured mesh in the Focus code. For each cell, the ratio (2) gives the required time step, and it is the minimum time step for all cells. The efficiency of the proposed algorithm for the choice of time step is shown for the problem of the thermal waves propagation in a three-layer system [3].

References

1. N. A. Mikhaylov, I. V. Glazyrin, Method of steeping contact boundary for modeling three-dimensional multiphase compressible flows in Eulerian variables. ZST: collection of thesis XIII international conference 20–24 March 2017. – Snezhinsk: FSUE «RFNC – VNIITF named after Academ. E. I. Zababakhin» – P. 326.

2. Y. A. Bondarenko, and A. A. Gorbunov, Practical stability condition for heatwave calculation with implicit difference schemes. J. VANT, MMFP Series, – 2008. – V. 4. – P. 3–12.
3. Y. A. Bondarenko, B. L. Voronin, V. V. Gorev et al., Description of tests for methods and codes developed for 2D heat conduction problems. J. VANT, MMFP Series, – 1992. – V. 2. – P. 14–20.

6-27

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЗАЩИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ НАГРУЗКАХ**

П. А. Радченко, С. П. Батуев, А. В. Радченко

Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия
E-mail: radchenko@live.ru

В работе представлены результаты численного моделирования разрушения защитной оболочкой атомной станции при импульсном воздействии. Оболочка представляет собой сложную многослойную сотовую структуру, состоящую из слоев бетона и фибробетона, скрепленных со стальными фермами. Численное моделирование проводилось в трехмерной динамической постановке с использованием авторского алгоритма и программного комплекса, в котором реализованы алгоритмы построения сетки сложных геометрических объектов и параллельных вычислений. Исследована динамика напряженно-деформированного состояния и разрушения конструкции.

**NUMERICAL SIMULATION
OF CONTAINMENT STRUCTURES
UNDER THE IMPULSE LOADING**

P. A. Radchenko, S. P. Batuev, A. V. Radchenko

Tomsk State University of Architecture and Building,
Tomsk, Russia
E-mail: radchenko@live.ru

The authors numerically simulated how the containment envelope of nuclear power plant is fractured under the impulse loading. Simulation results are given in the paper. The envelope is a complex cellular multilayer structure composed of the concrete and fibrous concrete layers fastened to the steel trusses. 3D dynamic numerical simulation was performed using the authors' algorithm and the software complex that implements the algorithms to generate the mesh of complex geometrical objects and carry out the parallel computations. Dynamics of envelope stress-strain behavior and fracture was studied.

6-28

**ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД КОНЕЧНОГО ОБЪЕМА
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ
НЕКОНСЕРВАТИВНЫХ СИСТЕМ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ**

А. А. Серёжкин

Всероссийский научно-исследовательский институт
автоматики им. Н. Л. Духова, Москва, Россия
E-mail: aaserezhkin@gmail.com

В докладе рассматривается задача численного решения гиперболических неконсервативных систем дифференциальных уравнений общего вида методами конечного объема. Как известно, для определения численного потока между ячейками используется решение задачи Римана (точное или приближенное). Предлагается принципиально новая итерационная схема решения задачи Римана для гиперболических систем дифференциальных уравнений. Предлагаемая новая методика решения задачи Римана внедрена в расчетный код ТИС. В качестве верификационных тестов рассматриваются задачи численного моделирования динамики распространения волн в сплошных средах в гидродинамическом и упругопластическом приближении.

**FINITE VOLUME METHOD
FOR NON-CONSERVATIVE HYPERBOLIC
SYSTEMS OF DIFFERENTIAL EQUATIONS**

A. A. Serezhkin

All-Russia Research Institute of Automatics
named after N. L. Dukhov, Moscow, Russia
E-mail: aaserezhkin@gmail.com

The problem of numerical solution of hyperbolic non-conservative system of differential equations with using finite volume methods is considered. As it is known, numerical flux between numerical cells defines with using solution of the Riemann Problem (exact or approximate). New iterative scheme for Riemann Problem solution is proposed. This scheme is used in the complex of applied problems "TIS" to solve verification tests. As test problems numerical simulation of wave propagation in hydrodynamic and elastoplastic continuum is considered.

6-29

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КВАРЦЕВОЙ
ЧАСТИЦЫ В ЦЕЛЯХ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ
ДАТИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД**

В. С. Шейнкман, О. А. Симонов

ТюмНЦ СО РАН, Тюменский индустриальный университет,
Тюмень, Россия

E-mail: s_o_a@rambler.ru

Одним из способов определения возраста горных пород и древних артефактов является анализ термолюминесценции кристаллов кварца. Накопленный за время существования радиационный след местности захоронения образца может дать достоверную информацию об его возрасте. Но для корректного проведения ТЛ-датирования важно построить достоверную модель термолюминесцентного процесса. В докладе представлены результаты численного моделирования термолюминесценции круглой кварцевой песчинки. Проведен анализ влияния размеров образца, а также скорости нагрева на кривую свечения. Показано, что размеры частицы, ее теплофизические параметры и скорость нагрева в значительной мере определяют форму кривой термовысвечивания, что необходимо учитывать при разработке методик датирования образцов.

**NUMERICAL SIMULATION OF QUARTZ
PARTICLE THERMOLUMINESCENCE
FOR THE PROBLEM DATING**

V. S. Sheinkman, O. A. Simonov

Tyumen scientific center SB RAS, Tyumen industrial
University, Tyumen, Russia

E-mail: s_o_a@rambler.ru

Determining the age of rocks and ancient artifacts is possible in the analysis of thermoluminescence of quartz crystals. The sample accumulates radiation information in the course of its existence, which can reliably determine its age. For correct TL-Dating it is important to build a reliable model of thermoluminescent process. The report presents the results of numerical simulation of thermoluminescence of round quartz sand. The influence of sample size and heating rate on the glow curve is analyzed. It is shown that the particle size, their thermophysical parameters and the heating rate largely determine the shape of the glow curve, which should be taken into account when developing methods for dating.

6-30

**РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ
ПЕРЕНОСА ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
В РАЗЛИЧНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЯХ**

А. В. Уракова, И. С. Чубарешко, А. А. Шестаков

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

E-mail: i.s.chubareshko@mail.ru

При моделировании физических процессов важную роль играет решение задач с учетом высокотемпературных явлений. В области высоких температур и скоростей поток излучения становится определяющим, поэтому важно учитывать взаимное влияние излучения, температуры и газодинамического движения вещества. Это приводит к необходимости решать совместную систему радиационной газовой динамики, которая состоит из уравнений газовой динамики, спектрального уравнения переноса теплового излучения и уравнения для внутренней энергии вещества. Самым сложным среди них является решение уравнения переноса теплового излучения, главным образом из-за большой размерности фазового пространства. Для упрощения этого уравнения применяются различные приближения: многогрупповое приближение, метод сферических гармоник, SP_n -метод, квазидиффузионное приближение, диффузионное приближение, приближение квазипереноса, приближение чистой теплопроводности и другие.

В работе рассмотрено применение диффузионного, P_1 , $P_{1/3}$ и M_1 -приближений и исследовано поведение решений при расчете ряда модельных задач переноса теплового излучения.

**SOLUTION OF RADIATIVE HEAT TRANSFER
EQUATIONS IN DIFFERENT APPROXIMATIONS**

A. V. Urakova, I. S. Chubareshko, A. A. Shestakov

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

E-mail: i.s.chubareshko@mail.ru

In the modeling of physical processes it is important to solve problems with account for high-temperature phenomena. At high temperatures and velocities the radiant flux becomes dominating and it is then important to consider the mutual influence of radiation, temperature, and hydrodynamic material flow. As a result, we have to solve a radiation hydrodynamics system which includes hydrodynamics equations, the radiative heat transfer equation is most difficult to solve mainly because of the large phase space dimension. Different approximations are used. These include multigroup approximation, spherical harmonics, SP_n approximation, quasi-diffusion and diffusion approximations, quasi-transfer, radiative heat conductivity and other.

The paper focuses on the diffusion, P_1 , $P_{1/3}$, and M_1 approximations and investigates the behavior of solutions for some model problems.

6-31

ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ СЕТОК В ОБЪЕМАХ, ОБРАЗОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯМИ ВРАЩЕНИЯ

А. И. Анучина¹, Н. А. Артемова²,
В. А. Гордейчук¹, О. В. Ушакова^{2,3}

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

²Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского
УрО РАН, Екатеринбург, Россия

³Уральский федеральный университет имени Первого
президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

E-mail: a.i.anuchina@vniitf.ru, ana@imm.uran.ru,
gordeychuk.v.a@vniitf.ru, uov@imm.uran.ru

Описывается технология построения структурированных сеток в объемах, образованных поверхностями вращения. Технология разработана для численного моделирования процессов многокомпонентной гидродинамики [1]. Технология включает в себя несколько видов алгоритмов, различающихся по своему функциональному назначению, и созданных для различных видов конструкций. Основопологающей конструкцией является объем вращения, получаемый вращением на 180° вокруг оси плоской кривой, состоящей из отрезков прямых, дуг окружностей и эллипсов. Рассматриваются обобщения объемов вращения (объемы, образованные поверхностями вращения с параллельными осями вращения), а также конструкции, представляющие собой объемы вращения, деформированные другими объемами вращения или их обобщениями. По своему функциональному назначению алгоритмы делятся на средства для задания геометрий и конфигураций областей [1], построения начальных сеток [2]; коррекции сеток к границам областей [3–6]; деформации сеток и областей [7]; оптимизации сеток [8], а также тестирования сеток [9–11]. Алгоритмы и программы (на языке C++) могут использоваться самостоятельно либо для конструирования более сложных видов алгоритмов, в частности, нестационарного алгоритма построения сеток [12] в деформированных объемах вращения, выполняющего на каждом шаге деформацию и оптимизацию сеток. Этот алгоритм реализован для случаев деформации конусом, цилиндром и сферой, поверхности вращения которых являются базовыми составляющими объема вращения более сложного вида и его обобщения. Алгоритмы созданы в рамках вариационного подхода к построению оптимальных сеток [8], удовлетворяющих заданным критериям качества: невырожденности [13, 14], близости сеток к равномерным и ортогональным, адаптации (сгущения) сетки, применяемой для дополнительного управления качеством

ячеек. Приводятся примеры сеток и результаты их тестирования согласно критериям [9–11].

Работа выполнена при финансовой поддержке УрО РАН (проект 18-1-1-8).

Литература

1. Anuchina N. N., Volkov V. I., Gordeychuk V. A., Es'kov N. S., Plyutina O. S., and Kozyrev O. M. Numerical simulation of 3D multi-component vortex flows by MAH-3 code // *Advances in Grid Generation*. ed by Ushakova O. V. Novascience Publishers. 2007.
2. Бронина Т. Н. Алгоритмы построения начальных трехмерных структурированных сеток для областей вращения // *Труды института математики и механики*. – 2008. – Т. 14. – 1. – С. 3–10.
3. Ушакова О. В. Алгоритм коррекции сетки к области вращения // *Вопр. атомной науки и техники. Сер. Мат. моделирование физ. процессов*. – 2016. – Вып. 1. – С. 16–27.
4. Ушакова О. В. Применение алгоритма коррекции сетки к области вращения // *Вопр. атом. науки и техники. Сер. Мат. моделирование физ. процессов*. – 2016. – Вып. 2. – С. 31–37.
5. Ушакова О. В. Алгоритм коррекции сетки к деформированной области вращения // *ВАНТ, сер. Мат. моделирование физ. процессов*. – 2017. – Вып. 2. – С. 53–65.
6. Ушакова О. В. Алгоритм коррекции сетки к области, образованной поверхностями вращения с параллельными осями вращения // *ВАНТ, сер. Мат. моделирование физ. процессов*. – 2018. – Вып. 1. – С. 30–41.
7. Ушакова О. В., Артемова Н. А., Бронина Т. Н., Анучина А. И., Гордейчук В. А. Построение сеток в деформированных объемах вращения // *Актуальные пробл. вычисл. и прикл. математики (AMCA-2015): Междунар. конф. (19–23 окт. 2015, Академгородок, Новосибирск, Россия), посв. 90-летию со дня рожд. акад. Г. И. Марчука: тезисы*. Новосибирск : Академиздат, 2015. – С. 162–163.
8. Ушакова О. В. Алгоритмы оптимизации трехмерных сеток для областей вращения // *Труды института математики и механики*. – 2008. – Т. 14. – 1. – С. 150–180.
9. Khairullina O. B., Sidorov A. F., and Ushakova O. V. Variational methods of construction of optimal grids // *Handbook of Grid Generation*. Thompson J. F., Soni B. K., and Weatherill N. P., eds. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 1999. – P. 36–1–36–25.
10. Ушакова О. В. Классификация шестигранных ячеек // *Журнал выч. матем. физики*. – Т. 48. – 8. – С. 1426–1428.
11. Ushakova O. V. Criteria for hexahedral cell classification // *Applied Numer. Math.* 127(2018)18–39.
12. Артемова Н. А. Нестационарный алгоритм построения структурированных сеток в деформированных областях // *Вопр. атомной науки и техники. Сер. Мат. моделирование физ. процессов*. – 2018. – Вып. 4. – С. 76–86.
13. Прохорова М. Ф. Проблемы гомеоморфизма, возникающие в теории построения сеток // *Труды института математики и механики*. – 2008. – Т. 14. – 1. – С. 112–129.
14. Ushakova O. V. Nondegeneracy tests for hexahedral cells // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 200 (2011). – 1649–1658.

GRID GENERATION TECHNOLOGY FOR VOLUMES FORMED BY THE SURFACES OF ROTATION

A. I. Anuchina¹, N. A. Artemova²,
V. A. Gordeychuk¹, O. V. Ushakova^{2,3}

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

²IMM UrO RAN, Ekaterinburg, Russia

³UrFU, Ekaterinburg, Russia

E-mail: a.i.anuchina@vniitf.ru, ana@imm.uran.ru,
gordeychuk.v.a@vniitf.ru, uov@imm.uran.ru

The structured grid generation technology for volumes formed by the surfaces of rotation is presented. The technology has been elaborated for numerical modelling the processes of multicomponent hydrodynamics [1]. It includes several types of algorithms differed by their functional aims and developed for various types of constructions. The basic construction is the volume of rotation formed by the rotation through 180° about the axis of the planar curve composed of straight line segments, arcs of circles and ellipses. The generalizations of the volume of rotation (formed by the surfaces of rotations with parallel axes of rotation) and constructions which are the volumes of rotation deformed by the other volumes of rotation or their generalizations are considered. By their functional aims, the algorithms are divided into tools for description of the geometry and configuration of the domains [1], generation of the initial grids [2], correction of grids to the boundary of the domains [3–6], deformation of grids and domains [7], optimization of grids [8], and testing of grids [9–11]. Algorithms and computer programs (in C++ language) can be used independently or for constructing more complicated forms of algorithms in particular the non-stationary grid generation algorithm [12] for the deformed volume of rotation performing at each stage the deformation and optimization of grids. This algorithm is realized for the cases of deformation by a conus, a cylinder and a sphere surfaces of rotation of which are the basic surfaces for the volumes of rotation of a more complicated form and their generalizations. The algorithms are developed within the variational approach for construction of optimal grids [8] satisfying the given optimality criteria: nondegeneracy [13, 14], closeness of grids to uniform and orthogonal ones, adaptation (condensing) of grids applied for additional control of cell quality. Examples of grids and their testing according to criteria [9–11] are given.

This work was supported by the Ural Branch of RAS (18-1-1-8).

References

1. Anuchina N. N., Volkov V. I., Gordeychuk V. A., Es'kov N. S., Ilyutina O. S., and Kozyrev O. M. Numerical simulation of 3D multi-component vortex flows by MAH-3 code // *Advances in Grid Generation*. ed by Ushakova O. V. Novascience Publishers. – 2007.
2. Bronina T. N. Algorithm for constructing initial three-dimensional structured grids for the domains of revolution // *Proc. Steklov Inst. Math. Suppl.* 1. 2008. – S. 36–S43.

3. Ushakova O. V. An algorithm of correcting a grid with respect to the surface of revolution // *Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki*, series Mathematical Modeling of Physical Processes, 1, 16–27.
4. Ushakova O. V. Application of correcting a grid with respect to the surface of revolution // *Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki*, series Mathematical Modeling of Physical Processes, 2, 31–37.
5. Ushakova O. V. An algorithm of correcting a grid with respect to a deformed domain of revolution // *Vopr. At. Nauki Tekh. Mat. Model. Fiz. Protsessov*, 2 (2017) 53–65.
6. Ushakova O. V. An algorithm of correcting a grid for a region formed by surfaces of revolution with parallel axes of revolution // *Vopr. At. Nauki Tekh. Mat. Model. Fiz. Protsessov*, 1 (2018) 30–41.
7. Anuchina A. I., Artemova N. A., Bronina T. N., Gordeychuk V. A., Ushakova O. V. Grid generation in deformed volumes of revolution // «Advanced Mathematics, Computations and Applications 2015» (AMCA-2015), dedicated to the 90th anniversary of the birthday of Academician G. I. Marchuk, Novosibirsk. P. 782–788.
8. Ushakova O. V. Optimization algorithms for three-dimensional grids in domains of rotations // *Proc. Steklov Inst. Math. Suppl.* 1. 2008. S. 228–S259.
9. Khairullina O. B., Sidorov A. F., and Ushakova O. V. Variational methods of construction of optimal grids // *Handbook of Grid Generation*. Thompson J. F., Soni B. K., and Weatherill N. P., eds. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 1999. – P. 36–1–36–25.
10. Ushakova O. V. Classification of hexahedral cells // *Comput. Math. Math. Phys.* 48 (8). 1327–1348.
11. Ushakova O. V. Criteria for hexahedral cell classification // *Applied Numer. Math.* 127(2018)18–39.
12. Artemova N. A. A nonstationary algorithm of constructing structured grids in deformed regions // *Vopr. At. Nauki Tekh. Mat. Model. Fiz. Protsessov*, 4 (2018) 76–86.
13. Prohorova M. P. Problems of homeomorphism arising in the theory of grid generation // *Proc. Steklov Inst. Math. Suppl.* 1. 2008. S165–S182.
14. Ushakova O. V. Nondegeneracy tests for hexahedral cells // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 200. 2011. 1649–1658.

6-32

ОПЫТ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АЭРОГАЗОГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В РАБОТАХ ГОСУДАРСТВЕННОГО РАКЕТНОГО ЦЕНТРА

В. И. Хлыбов, А. Д. Чешко

Акционерное общество «Государственный ракетный центр
имени академика В. П. Макеева», Миасс, Россия

E-mail: src@makeyev.ru

Развитие ракетно-космической техники в значительной степени стимулировало прогресс в области вычислительной техники и математического моде-

лирования процессов аэрогазгидродинамики и теплообмена, что позволило разрабатывать все более детальные и адекватные имитационные модели.

В области аэрогазгидродинамики и теплообмена математические и имитационные модели строятся на основе программных средств, реализующих решение уравнений Навье-Стокса для движения в сплошной среде (CFD-пакеты), или использующих прямое статистическое моделирование для решения уравнений Больцмана при движении в разреженной среде, как коммерческих (в т. ч. российской разработки), так и открыто распространяемых.

В докладе рассмотрен опыт применения суперкомпьютерного имитационного моделирования аэрогазгидродинамики и теплообмена при решении ряда задач проектирования изделий ракетно-космической техники. Обзор охватывает вопросы численного моделирования процессов:

- при старте, включая воздушный старт ракетоносителей (РН) с самолета-носителя; вертикальный и горизонтальный подводный старт; расчетно-экспериментальные исследования газодинамики блочных струй продуктов сгорания и процессов эжекции в проеме пускового стола; ударно-волнового воздействия на стартовые сооружения при авариях РН;

- в полете, включая полет в сплошной среде на до- и сверхзвуковых скоростях до высот 70–80 км и разделение ступеней РН; расчетно-экспериментальное исследование картины течения в донной области сверхзвукового летательного аппарата при полете на сверхзвуковой скорости;

- при атмосферном спуске, с учетом процессов диссоциации и ионизации внешней среды, в том числе и с использованием прямого статистического моделирования;

- взаимодействия ударных волн с летательным аппаратом при сверхзвуковом обтекании;

- аэрогазодинамики аппаратов с прямоточными воздушно-реактивными двигателями на жидком топливе, в том числе с учетом уравнений химической кинетики.

Приводятся примеры валидации вышеперечисленных имитационных моделей.

Созданные математические имитационные модели позволяют получить с проектной точностью не только интегральные и распределенные характеристики взаимодействия с внешней средой, но и исследовать физические процессы вне и внутри сложных компонентов, а также провести При Необходимости Оптимизацию Конструкции И Режимов Работы Систем.

**EXPERIENCE ON SUPERCOMPUTER
SIMULATION MODELING
OF AEROGASHYDRODYNAMICS AND HEAT
EXCHANGE IN THE WORKS OF MAKEYEV SRC**

V. I. Khlybov, A. D. Cheshko

Joint Stock Company “Academician V. P. Makeyev State
Rocket Centre”, Miass, Russia

E-mail: src@makeyev.ru

The advancement in space rocketry stimulated the progress of computational methods and math modelling of aerogashydrodynamic and heat exchange processes to a large extent that allows to develop more detailed and adequate simulation models.

In the field of aerogashydrodynamics and heat exchange math and simulation models are based on software with Navier-Stokes equations describing the movement in continua (CFD packages) or direct statistic modelling to solve Boltzmann equations for movement in rarefied medium, both commercial (including developed in Russia) and on open access.

The paper considers experience in using supercomputer simulation modeling of aerogashydrodynamics and heat exchange, when designing items of space rocketry. The paper covers issues of numerical simulation of processes:

- at launch, including air launch of a Launch Vehicle (LV) from a carrier aircraft; vertical and horizontal underwater launch; design and experimental study of gasdynamics of exhaust streams from a cluster of nozzles and processes of ejection in gaps of a launcher; shock actions on launching facilities in case of LV's failure;

- in flight, including flight in continua at sub- and supersonic velocities up to 70–80 km and separation of LV stages; design and experimental study of a flow pattern at the bottom of a supersonic LV flying at a supersonic velocity;

- at reentry, taking into account dissociation and ionization processes of external environment using among others direct statistical modeling;

- interaction of shock waves with an LV flown at an altitude at a supersonic velocity.

- aerogas dynamics of vehicles with liquid-fuel ramjets, including among others chemical kinetics equations.

The article includes examples of validation of the mentioned simulation models.

The created math simulation models allow getting not only integral and distributed parameters of interaction with environment at a design accuracy and studying physical processes outside and inside complicated configurations but also optimizing the system configuration and operation modes, if needed.

6-33

**СХЕМА УРАЛ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА
ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
В P₁-ПРИБЛИЖЕНИИ**

И. С. Чубарешко, А. А. Шестаков

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

E-mail: i.s.chubaresko@mail.ru

В докладе предложен новый вариант схемы Ромб, улучшающий монотонность разностной аппроксимации гиперболических уравнений. Для этого используется методология построения диссипативных схем

для системы P_1 -уравнений в инвариантах Римана. Новая схема названа схемой УРАЛ (Усовершенствованный Ромбовый Алгоритм). Особенностью новой схемы является учет функции Планка в соотношениях, связывающих интегральные средние величины с величинами в узлах разностных интервалов.

URAL SCHEME FOR SOLVING THE HEAT TRANSFER EQUATION IN P_1 APPROXIMATION

I. S. Chubareshko, A. A. Shestakov

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

E-mail: i.s.chubareshko@mail.ru

The paper proposes a new version of the ROMB scheme which improves monotonicity of the difference approximation of hyperbolic equations. Dissipative schemes for the system of P_1 equations in Riemann invariants are constructed for this purpose. The new scheme is called URAL. It is specific in the presence of Planck function in relations for integral average values versus values in difference nodes.

6-34

ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАЗРЫВОВ В РЕШЕНИИ

Д. А. Варфоломеев, Е. А. Шаталова

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

E-mail: d.a.varfolomeev@mail.ru, elena_s_11@mail.ru

В комплексе программ «ВОЛНА» имеется возможность выделять в решении «точные» фронты ударных волн (УВ), которые порождаются решением задачи о распаде произвольного разрыва. Известно, что при пересечении характеристик одного семейства непрерывное решение становится разрывным. Чтобы точно определять такой момент необходимо отслеживать все характеристики, что не предусмотрено используемым методом.

Предлагается приближенный метод восстановления разрывного решения из непрерывного. Очевидно, что можно внедрить УВ малой интенсивности в середину интервала с максимальной вязкостью. Используя такой простой способ, место восстановления УВ выбирается с недостаточной точностью и в решении формируются энтропийные следы. Предлагается заменять «мазаную» УВ стационарной УВ. Для этого в некоторый момент времени анализируется весь профиль системы. Непрерывная последовательность ячеек с ненулевой математической вязкостью определяет область восстановления. Чтобы различать волны в непрерывной области их взаимодействия и восстанавливать каждую волну в отдельности, производится анализ максимумов вязкости для уточнения границ

области восстановления. Вся область восстановления удаляется из решения, а на ее место «вшивается», с сохранением масс интервалов, стационарная УВ с выделенным фронтом. Параметры УВ определяются из условий Гюгонио по разности скоростей на концах области восстановления. Положение фронта определяется из закона сохранения массы области восстановления по известным плотностям за и перед фронтом, учитывая, что новые распределения величин постоянны. Такой подход позволяет формировать требуемое разрывное решение сразу в момент восстановления УВ. В профилях плотности и энергии отсутствуют энтропийные следы.

При восстановлении нестационарных УВ предложен алгоритм локализации фронта «мазаной» УВ. В таких случаях вязкость может присутствовать не только во фронте «мазаной» УВ, но и, например, в области непрерывного сжатия в окрестности УВ. Из-за этого область восстановления выбирается больше области локализации «мазаной» УВ. Поэтому количество интервалов в области восстановления корректируется в зависимости от интенсивности «мазаной» УВ по отношению к звуковой.

Предлагаемый алгоритм восстановления ударных волн позволяет повысить информативность и точность расчетов.

AN APPROXIMATE METHOD OF RECONSTRUCTING DISCONTINUITIES IN SOLUTION

D. A. Varfolomeyev, E. A. Shatalova

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

E-mail: d.a.varfolomeev@mail.ru, elena_s_11@mail.ru

The VOLNA code is capable of capturing the “exact” shock fronts from solutions to Riemann’s problems. The continuous solution is known to become discontinuous when the characteristics of a family intersect. In order to determine the time of intersection, it is necessary to track all characteristics which is not provided for in the method we use.

Here we propose an approximate method to reconstruct the discontinuous solution from the continuous one. It is clear that we can introduce a low-intensity shock in the center of the interval with maximal viscosity. In such a simple way the region of shock reconstruction is chosen with insufficient accuracy, forming entropy traces in the solution. We propose that the smeared shock should be replaced by a stationary shock. For this end we analyze the entire system profile at some time. The discontinuous sequence of cells where the mathematical viscosity is not zero defines the region of reconstruction. In order to discriminate waves in the discontinuous region of their interaction and to reconstruct each of them individually, we analyze viscosity maxima and determine boundaries of the reconstruction region. The entire region is removed from the solution and replaced by a stationary shock with a captured front, keeping the interval masses the

same. Parameters of the stationary shock are determined from the difference of velocities at the boundaries of the reconstruction region with the Hugoniot conditions. The position of its front is determined from the known densities before and behind the front on the basis of mass conservation in the reconstruction region with account that the new distributions of the quantities are constant. With this approach we can form the required discontinuous solution just at the moment of shock reconstruction without entropy traces in the density and energy profiles.

For the reconstruction of non-stationary shocks, we propose an algorithm for smeared shock localization. In these cases, viscosity may be present not only in the front of the smeared shock, but also, for example, in the region of continuous compression near the shock. Then the chosen reconstruction region is larger than the region of the smeared shock. That is why the number of intervals in the reconstruction region is corrected with respect to the intensity of the smeared shock relative to the acoustic one.

The proposed method of shock reconstruction helps increase the information content and accuracy of calculations.

6-35

ЧИСЛЕННЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПЕРЕНОСА ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А. А. Шестаков

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

При численном моделировании уравнений математической физики возникают численные эффекты, не связанные с физикой описываемых процессов и мешающие правильному пониманию этих явлений. Самыми распространенными среди них являются сеточные эффекты, связанные с дискретизацией рассматриваемого пространства разностной сеткой. Хотя большинство сеточных эффектов при использовании устойчивых и сходящихся разностных схем исчезают при уменьшении размеров ячеек дискретной сетки, в каждой задаче необходима оценка влияния этой погрешности на расчет.

В докладе приведено описание численных эффектов и примеры модельных задач, в которых наиболее наглядно проявляются эти эффекты. Для рассмотренных эффектов дается объяснение их возникновений и возможные способы устранения.

NUMERICAL EFFECTS IN HEAT TRANSFER SIMULATIONS

А. А. Shestakov

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

The numerical simulation of mathematical physics equations often produces numerical effects which do not relate to the physics of processes being described and make it difficult to understand the phenomena properly. Most often are faced the mesh effects from space discretization by a difference mesh. For robust and convergent difference schemes, most of them disappear when the cell size decreases, but the effect of this error on calculated results needs to be evaluated for each particular problem.

The paper described numerical effects and provides example of model problems where the effects manifest themselves most vividly. It is explained why the effects occur and how they can be removed.

6-36

ВОССТАНОВЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ПО НЕЛОКАЛЬНЫМ ДАННЫМ

М. А. Шишленин

Институт вычислительной математики и математической
геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия
Институт математики им. С. Л. Соболева,
Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный университет,
Новосибирск, Россия
E-mail: mshishlenin@ngs.ru

В настоящее время опубликовано много работ, посвященных задаче нахождения коэффициентов параболических уравнений в случае, когда данные обратной задачи задаются в виде нелокальной информации (интеграл по времени или по пространству) [1–4]. Обратные задачи с нелокальными условиями возникают в теплопередаче, термоэластичности, неразрушающем контроле, химической кинетике, медицине, социологии и т.д.

В данной работе предложены алгоритмы решения коэффициентных обратных задач параболических уравнений по нелокальной дополнительной информации интегрального типа.

Обратная задача заключается в определении коэффициента по нелокальной дополнительной информации, задаваемой в виде интеграла по области, либо в виде данных, заданных в дискретном числе точек по времени [6].

Нелинейная обратная задача формулируется в виде задачи минимизации целевого функционала [5]. Для минимизации функционала применяется градиентный метод. Получены формулы градиента функционала с использованием решения соответствующих сопряженных задач. Представлены результаты численных расчетов и проведена апробация разработанных алгоритмов на реальных данных.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 18-01-00865, 17-51-540004, 19-01-00694).

Литература

1. Cannon J. R., Rundell W. Recovering a Time Dependent Coefficient in a Parabolic Differential Equation // *J. Math. Anal. Appl.* – 1991. – V. 160. – P. 572–582.
2. Ivanchov N.I. On the Determination of the Time-Dependent Leading Coefficient in a Parabolic Equation // *Siberian Mathematical Journal.* – 1998. – V. 39(3). – P. 465–475.
3. Liao W., Dehghan M., Mohebbi A. Direct Numerical Method for an Inverse Problem of a Parabolic Partial Differential Equation // *Journal of Computational Applied Mathematics.* 2009. – V. 232. – P. 351–360.
4. Vilar G., Tulla-Puche J., Albericio F. Polymers and drug delivery systems // *Current Drug Delivery.* – 2012. – V. 9 (4). – P. 367–394.
5. Kabanikhin S. I., Shishlenin M. A. Quasi-solution in inverse coefficient problems // *Journal of Inverse and Ill-Posed Problems.* – 2008. – V. 16 (7). – P. 705–713.
6. Kabanikhin, S. I., Shishlenin, M. A. Recovering a Time-Dependent Diffusion Coefficient from Nonlocal Data. 2018. *Numerical Analysis and Applications*, 11(1). – P. 38–44.

**RECOVERING THE COEFFICIENTS
OF THE PARABOLIC EQUATIONS
BY NON-LOCAL DATA**

M. A. Shishlenin

Institute of Computational Mathematics and Mathematical
Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia
Sobolev Institute of Mathematics SB RAS,
Novosibirsk, Russia
Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia
E-mail: mshishlenin@ngs.ru

Many papers have been published devoted to the problem of the recovering the coefficients of parabolic equations in the case when the data of the inverse problem are specified as nonlocal information (integral over time or space) [1–4]. Inverse problems with non-local conditions arise in heat transfer, thermoelasticity, non-destructive testing, chemical kinetics, medicine, sociology, etc.

In this paper, we propose algorithms for solving the coefficient inverse problems of parabolic equations by nonlocal additional information of integral type.

In inverse problem it is required to determine the coefficient on non-local additional information, given as an integral by a region or time, or as data specified in a discrete number of points over time [6].

The nonlinear inverse problem is formulated as the problem of minimizing the misfit functional [5]. The gradient method is applied to minimize the functional.

Formulas for the gradient of the functional are obtained using the solution of the corresponding adjoint problems. The results of numerical calculations are presented and the developed algorithms are tested on real data.

The work was supported by RFBR (grants 18-01-00865, 17-51-540004, 19-01-00694).

References

1. Cannon J. R., Rundell W. Recovering a Time Dependent Coefficient in a Parabolic Differential Equation // *J. Math. Anal. Appl.* – 1991. – V. 160. – P. 572–582.
2. Ivanchov N. I. On the Determination of the Time-Dependent Leading Coefficient in a Parabolic Equation // *Siberian Mathematical Journal.* – 1998. – V. 39(3). – P. 465–475.
3. Liao W., Dehghan M., Mohebbi A. Direct Numerical Method for an Inverse Problem of a Parabolic Partial Differential Equation // *Journal of Computational Applied Mathematics.* – 2009. – V. 232. – P. 351–360.
4. Vilar G., Tulla-Puche J., Albericio F. Polymers and drug delivery systems // *Current Drug Delivery.* – 2012. – V. 9 (4). – P. 367–394.
5. Kabanikhin S.I., Shishlenin M.A. Quasi-solution in inverse coefficient problems // *Journal of Inverse and Ill-Posed Problems.* – 2008. – V. 16 (7). – P. 705–713.
6. Kabanikhin, S. I., Shishlenin, M. A. Recovering a Time-Dependent Diffusion Coefficient from Nonlocal Data. 2018. *Numerical Analysis and Applications*, 11(1). – P. 38–44.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Абдуллина Д. Н. 120, 159
Аганин А. А. 6
Агафонцев М. В. 69
Агранат М. Б. 114
Адуев Б. П. 67, 68, 71
Акашев Л. А. 133
Акопян Т. К. 145
Акулинина Е. Ю. 104
Алексеев В. В. 129
Андреев А. М. 41
Андреев С. Г. 128
Аникин Н. Б. 37, 142, 162
Анисичкин В. Ф. 11, 48
Антипова Т. В. 50, 70, 81
Антонюк Л. К. 132
Анучина А. И. 227
Аржанников А. В. 196
Аристова А. Ю. 35
Артемова Н. А. 227
Астафурова М. В. 12, 85
Астафуров В. И. 85
Астафьев В. В. 18
Афанасьева С. А. 13
Ахлюстин И. А. 49, 56, 73
Ашитков С. И. 114

Б

Бабань С. А. 16
Бадретдинова Л. Х. 49, 72, 122
Базанов А. А. 97
Базотов В. Я. 76
Базотов В. Я. 28, 49, 55, 66, 72
Байдин В. Г. 33
Бакиров А. Р. 50
Бакуркина Е. С. 102
Баранов В. К. 130
Барахвостов С. В. 87
Баренбаум А. А. 13, 14
Баталова И. А. 50
Батуев С. П. 203, 225
Батьков М. Ю. 132
Баутин С. П. 203, 204, 215
Беденко С. В. 196
Безгодов Е. В. 168, 192, 194
Бекетов А. П. 121
Беленовский Ю. А. 49, 54, 56, 73
Белов А. С. 15
Белов И. А. 35
Белов Н. А. 145
Белов Н. Н. 13
Белокуров Г. М. 71
Белоногова Е. А. 171, 173
Белоногов М. Н. 170, 175
Беляев Г. Е. 138

Бережнов А. Н. 28
Березовская М. Е. 104
Бесов С. С. 172
Бирюкова М. А. 122
Богданов А. В. 96
Богданов А. Н. 51
Боднарюк А. Д. 57
Бодров А. С. 213
Бойко М. М. 128
Болдырев М. И. 16
Борисёнок В. А. 32
Борцов А. А. 146
Бочкарева А. А. 171, 173, 183
Бочков Е. И. 97
Брагин А. М. 133
Брагов А. М. 150
Брагунцов Е. Я. 17, 52
Брантов А. В. 88
Бричиков С. А. 143
Бродова И. Г. 18, 145
Бугаенко А. А. 205
Бугаенко И. Л. 37
Буйко А. М. 19, 86, 98
Бурдонский И. Н. 42
Буркин В. В. 13
Буянов А. Б. 41
Быченков В. Ю. 5, 88

В

Вавилова И. Г. 174
Валеев М. Ф. 20
Валиев Х. Ф. 62
Варфоломеев Д. А. 61, 230
Васильева А. А. 53
Величко А. М. 138
Верховский С. В. 180
Вершинская А. С. 209, 212
Власов А. Н. 36
Вовченко Е. Д. 86
Воеводин С. В. 41
Волков И. А. 170, 175
Волков Н. Б. 87, 122
Воробьев А. В. 79
Воробьева М. А. 107, 150
Воронин Д. С. 123
Воропинов А. А. 206, 208
Высикайло Ф. И. 21
Вэнь Вэнь 47

Г

Гаан К. В. 61, 148, 158
Гаврилин Р. О. 96
Гаврилов Д. С. 112
Гаврилов П. М. 21
Гагаркин Д. М. 54

Гаджиев А. Д. 207
 Гайдамака С. Н. 25
 Галашев А. Е. 177
 Галиуллин И. Г. 54
 Гаранин Р. В. 35
 Гаранин С. Г. 92
 Гаранин С. Ф. 19, 98
 Гарифуллина Г. Д. 55
 Гарифуллин Р. Ш. 76
 Гаркушин Г. В. 120
 Гармашев А. Ю. 50, 54, 78, 81, 122, 135, 146, 152, 161
 Гашков М. А. 22
 Гейнц В. Л. 207
 Георгиевский П. Ю. 78
 Гилев С. Д. 125
 Гильмутдинов Д. К. 56, 73
 Глазырин В. П. 71
 Глазырин И. В. 16, 26, 103, 211, 224
 Глазырин С. И. 88
 Глухов Р. Д. 138
 Глыбин А. М. 130
 Гнутов И. С. 132
 Голомидов Ф. О. 208
 Горбачева Е. С. 190
 Гордейчук В. А. 227
 Горохов С. А. 112
 Грабовенская С. А. 209, 212
 Грачёва Н. А. 126
 Гребёнкин К. Ф. 5, 26
 Грецова А. Н. 50, 56, 75
 Григорьев С. Ю. 131
 Гринберг Б. А. 127
 Гришков А. А. 92
 Гросс И. Н. 75
 Гроховский В. И. 22, 30
 Грязнов В. К. 95
 Грязнов Е. Ф. 128
 Губин А. С. 57
 Губин С. А. 128
 Губский К. Л. 129, 138
 Губченко В. М. 89
 Гуо П. 24
 Гуськов С. Ю. 27, 99

Д

Давлетчин Ю. Ф. 168
 Давлетшин А. И. 6
 Давыдов В. Ю. 57
 Дай Сяогань 47
 Дашапилов Г. Р. 73
 Дашко Д. В. 53
 Дегтярев А. А. 23, 40
 Дементьев О. Н. 210
 Денисова В. А. 35
 Дергунов А. В. 132
 Деркач В. Н. 35, 129
 Дерябин С. Л. 210
 Десятникова М. А. 98
 Долгих С. М. 40, 61, 77, 146, 152

Долголева Г. В. 91
 Доценко В. В. 211
 Дроздовский А. А. 96
 Дроздовский С. А. 96
 Дуань Инлянь 47
 Дубосарский В. Г. 189
 Дудай П. В. 97, 130
 Дунаев В. Н. 54
 Дырда Н. Д. 176, 179, 183
 Дьячков С. А. 131

Е

Евлашин С. А. 114
 Евсюкова Ю. А. 188
 Еганова А. В. 50
 Егорова Л. Ю. 146
 Егорян А. Д. 62
 Емелин Д. А. 131
 Емельянова Е. Ю. 211
 Ершова А. В. 211
 Ершов А. П. 73
 Еселевич Д. А. 58, 81, 137
 Еськов А. Н. 79
 Еськов Н. С. 61
 Есьман А. А. 100
 Ефанов А. Н. 121

Ж

Жань Цзянлун 47
 Жаховский В. В. 131
 Жеребцов А. Л. 61, 62
 Жерноклетов М. В. 132
 Жилыева Н. С. 33
 Жуков Ю. М. 58

З

Завьялов В. В. 207, 209, 212
 Завьялов З. И. 146
 Завьялов З. С. 145
 Зайков Ю. П. 184
 Замураев Д. О. 112
 Звегинцев В. И. 17
 Зверев А. С. 58, 67, 68
 Зеленов А. Н. 70
 Зелепугин С. А. 213
 Зельдович В. И. 23, 40, 158, 159
 Зименков А. А. 97, 130
 Змитренко Н. В. 99
 Золотовский А. В. 35
 Зубарев Н. М. 22

И, Й

Иваничкина К. А. 177
 Иванов С. Н. 92
 Иванов А. А. 196
 Иванова Г. Г. 86, 98

Иванов А. С. 33, 192
 Иванов М. Я. 59, 214
 Ивановский А. В. 92, 97, 130
 Ивашкин В. В. 24
 Ивашкин Н. В. 178
 Ивлиев С. В. 93
 Ильницкий Д. К. 147
 Ильякова Н. Н. 67, 68
 Иосилевский И. Л. 95
 Ирничев Д. А. 130
 Исаев А. А. 86
 Исхаков Т. Н. 49
 Ищенко А. Н. 13
 Й. Й. Юй 119

К

Казаков Д. Н. 141, 144
 Казиева Т. В. 138
 Калашников Д. А. 132
 Калинин М. П. 132
 Канунников Р. Н. 154
 Канцырев А. В. 96
 Караваев А. В. 133
 Карепов В. А. 98
 Карлыханов Н. Г. 95, 102, 113
 Карпов М. А. 96
 Касьянов С. Ю. 172
 Кашкаров А. О. 73, 152, 154
 Кирьянова А. С. 210
 Кирющенкова Н. А. 49
 Киселёв А. И. 133
 Кискин А. Е. 61
 Кискин П. Е. 61
 Кичигин Р. М. 133
 Клёнов А. И. 135, 161
 Клеопова Н. А. 96
 Клименко В. Ю. 128
 Ковалева С. Ф. 112
 Ковалёв Ю. М. 122
 Коваленко А. И. 215
 Коваленко М. Г. 135
 Коваль А. В. 40
 Козлов Е. А. 143
 Козлов Е. А. 133
 Козлов С. Г. 157
 Козловский К. И. 86
 Койнов О. В. 190
 Колобов Ю. К. 174
 Колотова Л. Н. 137
 Кольчугин С. В. 104
 Комаров Р. В. 79
 Кондратенко П. С. 114
 Кононов С. Н. 204
 Конюкова А. В. 81, 137
 Конюков И. В. 137
 Корнилова А. А. 25
 Королёв А. С. 104
 Корчиков В. С. 41
 Косолапов И. Э. 49, 56, 73

Костенко И. И. 172, 199
 Костицын О. В. 49, 50, 54, 56, 61, 73, 75, 78, 81
 Котова О. Г. 26, 103
 Кочутин Д. В. 62
 Кошелева Е. В. 151, 155
 Кошутин Д. А. 207, 209, 216
 Краев А. И. 97, 130
 Крайко А. Н. 62
 Крайнов А. Ю. 220
 Красильников В. Н. 58, 81
 Красников В. С. 123, 139
 Красюк И. К. 27
 Краюхин А. А. 35, 217
 Крутова И. Ю. 203, 205, 223
 Крюков В. М. 33, 168, 192
 Куделькин В. Б. 97
 Кудрявцев А. А. 70
 Кузнецов А. В. 150
 Кузнецов А. П. 129, 138
 Кузнецов Д. К. 58
 Кузнецов С. Д. 98
 Кузнецов Ю. А. 44, 109
 Кузьмина Т. Е. 191
 Кукля М. М. 58
 Кулешов А. А. 217
 Куликов В. Н. 64
 Куликов М. А. 100
 Куликов С. М. 92
 Куприянец Д. Н. 16
 Куропаткин Ю. П. 157, 160
 Курышева Е. В. 191
 Кухно А. В. 109
 Кучко Д. П. 79, 143, 149
 Кучугов П. А. 99

Л

Лаврук С. А. 65, 80
 Лапина Ю. В. 33
 Ларин Д. Е. 100
 Ларионов М. Ю. 30
 Ларичев М. Н. 138
 Лачугин А. А. 66, 72
 Лебедев С. Н. 110
 Левак К. В. 61
 Левашов П. Р. 38, 141
 Левин В. А. 66, 78
 Левунина Э. С. 204
 Лейви А. Я. 218
 Леонов А. Г. 42
 Лепёхин Н. М. 28, 44, 109
 Лимонов А. В. 41
 Линдемут И. Р. 19
 Липчак А. И. 87
 Лисенков В. В. 92
 Лисков И. Ю. 67, 68, 71
 Литвиненко И. А. 33
 Лобачёв А. С. 154
 Лобода Е. Л. 69
 Лобода П. А. 101, 104, 111

Лобода Ю. А. 69
 Ломунов А. К. 133, 150
 Лопаткин С. А. 75
 Лукашова М. В. 70
 Лукичева З. П. 53
 Лыков В. А. 95, 102, 110, 113
 Лю Жуй 47

М

Майер А. Е. 123, 126, 139, 140, 156
 Майер П. Н. 140
 Майорова А. С. 141, 144
 Макальский Л. М. 109
 Макаров К. Н. 42
 Макеева И. Р. 171, 173, 176, 179, 181, 183, 189, 195, 198
 Маклашова И. В. 128
 Малёв В. В. 154
 Малинин С. А. 75
 Мальцева Н. С. 35
 Малюгина С. Н. 135, 141, 142, 144
 Мамаев В. К. 59, 214
 Мамышев В. И. 92, 97
 Маренный А. М. 85
 Марсов А. А. 28, 66, 72
 Матвеев А. А. 64
 Мащенко М. А. 62
 Мезенцев А. В. 219
 Месяц Г. А. 22
 Милёхин Ю. М. 64, 75
 Миловзоров Н. Г. 70
 Минаков Д. В. 141
 Мингалеев И. Р. 28
 Мирошкин К. М. 49, 56, 73
 Мирошниченко В. П. 28
 Мисько В. В. 35
 Митрофанов А. Ю. 58
 Михайлов Н. А. 16, 26, 211, 224
 Михайлюк А. В. 129
 Модестов Д. Г. 170, 175, 196
 Моисеева К. М. 220
 Мокеев А. А. 28, 66, 72
 Мокрушин С. С. 141
 Мокрушин С. С. 142, 144
 Морозова И. В. 86
 Морозова Н. В. 168
 Мошкин Д. Л. 168, 194
 Музыря А. К. 29, 122
 Муфтахетдинова Р. Ф. 30
 Мухин Д. В. 154
 Мыгарев М. С. 142
 Мышецкая Е. Е. 217

Н

Надежин С. С. 130
 Назаров К. С. 26, 103, 211
 Назаров Ю. А. 28
 Наумова М. Ю. 109

Нелюбина Н. В. 68, 71
 Нескин А. Г. 33, 70
 Нечайкин Р. В. 41
 Нигматулин Р. И. 6
 Нижегородцев В. И. 157, 160
 Никитин А. П. 67, 68
 Никифоров М. В. 168, 194
 Николаев А. Ю. 154
 Никульшин М. В. 121, 190, 211
 Новиков И. Г. 206
 Нурмухаметов Д. Р. 71

О

Обухов А. Г. 203, 221
 Овечкин А. А. 104, 111
 Овчинников А. В. 114
 Оглобличев В. В. 180
 Ольховский А. В. 143
 Опрышко О. В. 223
 Орлов М. Ю. 71
 Орлов Ю. Н. 71
 Осавчук А. Н. 64

П

Павленко А. В. 37, 41, 135, 141, 142, 144, 192
 Паланияппан С. 167
 Панкратов Д. Г. 149, 162
 Панфилов П. Е. 146
 Панюшкин В. А. 96
 Парамонов М. А. 141
 Паршиков А. Н. 131
 Пастухович А. Ю. 30
 Пасюков С. Д. 168, 194
 Паукова А. Е. 181
 Пахнутова Н. В. 213
 Пахомов С. А. 191
 Пацелов А. М. 146
 Пашенцев В. А. 36
 Певный С. Н. 92
 Перминов А. В. 41
 Петрова А. Н. 145
 Петрова О. Е. 33
 Петров А. С. 66, 72
 Петров Д. В. 122, 152
 Петров Д. В. \ 56
 Петровцев А. В. 133, 135
 Петухов Е. А. 146, 161
 Пешкичев И. В. 173, 181, 183, 198
 Пешков Р. А. 31
 Пигасов Е. Е. 33
 Пикуз С. А. 104
 Пилюгин В. П. 127, 146
 Пирог В. А. 138
 Писклова М. А. 224
 Пискунов Ю. А. 37
 Плеханов А. А. 86
 Поварницын М. Е. 38
 Погорелко В. В. 139

Покаташкин П. А. 147
 Полюшко С. М. 97
 Попова В. В. 104
 Попова Е. Н. 148
 Попов В. В. 148
 Попов И. А. 168, 194
 Попов Н. А. 58, 133
 Попцов А. Г. 149, 162
 Потапов А. М. 184
 Потапов А. А. 105
 Потапов А. М. 180, 184
 Приходько В. В. 196
 Просвирнин К. М. 49, 56, 73
 Прууэл Э. Р. 11, 73, 152, 154
 Пугачев В. Ю. 181, 189
 Пугачёв В. Ю. 195
 Путилин О. С. 121, 190, 211
 Пушкин М. С. 127
 Пчелинцева С. В. 179

Р

Радченко А. В. 203, 225
 Радченко П. А. 203, 225
 Разоренов С. В. 120, 145, 159
 Ральников М. А. 79, 149
 Рахель А. Д. 107
 Рейно В. В. 69
 Рейновски Р. Е. 19, 167
 Рогачёв В. Г. 35, 92
 Романов А. М. 185, 187
 Романов И. Н. 157
 Рубцов И. А. 73, 154
 Рудина А. Х. 75
 Рудской И. В. 96
 Рыкованова В. В. 110
 Рыкованов Г. Н. 102, 113
 Рыкунов А. А. 107, 131, 150
 Рыкунова А. А. 181, 188, 189, 195, 198
 Рябина А. В. 137
 Рякин А. А. 190

С

Савенков Г. Г. 150
 Савин С. М. 96
 Савченко К. В. 157, 160
 Садовничий Д. Н. 75
 Сальникова Н. И. 76
 Сальников А. С. 76
 Салюлев А. Б. 184
 Саммель А. Ю. 13
 Санников В. С. 53
 Сарафанников А. В. 49, 54, 56, 73
 Сасоров П. В. 96
 Сатонкина Н. П. 73
 Сафронов К. В. 112
 Сверчков А. Г. 25
 Свиридов Е. В. 41
 С. Д. Ваулин С. Д. 31

Седов С. Ю. 32
 Селезнева К. И. 110
 Селезнев В. Н. 110
 Селемир В. Д. 157, 160
 Сельченкова Н. И. 151, 155
 Семенов А. Ю. 27
 Семенов В. Л. 59
 Серебряк В. Г. 168, 194
 Серёжкин А. А. 225
 Серова Е. В. 196
 Сидоров В. В. 191
 Сидоров К. С. 161
 Симаков Ф. А. 50
 Симоненко В. А. 6
 Симоненко В. А. 33, 170, 175, 176, 192
 Симонов О. А. 226
 Синицкий С. Л. 196
 Синькова О. Г. 82
 Синькова О. Г. 43
 С. Й. Пэй 119
 Скорочкин Ю. В. 35
 Скосырский А. Б. 13
 Скрипина Т. С. 75
 С. Л. Яо 119
 Смирнов В. Н. 36, 77
 Смирнов Е. Б. 18, 23, 40, 77, 122, 135, 146, 152, 154, 161
 Смирнов Н. А. 153
 Соболевская А. В. 75
 Соколов В. П. 33
 Соколов М. А. 77
 Соколов С. С. 155
 Соколов Ю. А. 172, 199
 Соловей В. А. 174
 Сомов П. А. 70
 Сон Э. Е. 7
 Сорокин С. А. 108, 109
 Ставриецкий Г. В. 34
 Стадник А. Л. 35, 217
 Станкевич А. В. 50, 56, 75, 78, 122
 Стариков С. В. 137
 Стародубцев П. В. 35
 Стаценко В. П. 43, 82
 Степанов И. Г. 138
 Степанов Н. В. 196
 Столбиков М. Ю. 36
 Столбовский А. В. 148
 Стучебрюхов И. А. 27
 Суаридзе Т. Р. 146
 Сутырин О. Г. 78
 Сухаревский Д. И. 109
 Сырцова Ю. Г. 179
 Сысоев В. С. 44, 109
 Сян Юн 47
 Сяоян Пэй 119

Т

Тайбинов Н. П. 50, 56, 75, 78, 81
 Тараканов А. А. 168, 194

Тарасов А. Ю. 81
 Тарасов Ф. И. 154
 Таржанов В. И. 79
 Тачаев Г. В. 100
 Телегина В. Ю. 35
 Тен К. А. 73, 152, 154
 Терещенко М. Н. 57
 Тимофеева Т. Б. 62
 Титова А. М. 196
 Титова О. В. 168
 Титов В. В. 211
 Тищенко А. С. 112
 Тищенко И. Ю. 138
 Ткаченко С. И. 87
 Толкачева С. И. 80
 Толмачёв Т. П. 146
 Толочко Б. П. 152, 154
 Топорков Д. Ю. 6
 Торшин Д. В. 110
 Тренькин А. А. 41
 Трунин И. Р. 155
 Тяктев А. А. 37, 142

У

Уйманов И. В. 22
 Уракова А. В. 209, 216, 226
 Урлин Е. В. 157
 Уфимцев Ю. С. 194
 Учаев А. Я. 151, 155
 Ушакова О. В. 227
 Ушков А. В. 192

Ф

Фавалли А. 167
 Файрушина Л. Р. 195
 Фалахутдинов Р. М. 148
 Фальков А. Л. 111
 Федорова А. С. 174
 Федоров А. В. 132
 Федоров В. Б. 31
 Федюшкин В. Н. 168, 194
 Филатов С. Ю. 144
 Филиппов В. Г. 28
 Финюшин С. А. 132
 Флегентов В. А. 112
 Фокин В. Б. 38
 Фомин В. М. 17, 52
 Фомин Е. В. 156
 Фомичёв В. А. 157, 160
 Фортов В. Е. 114
 Фролова Н. Ю. 23, 40, 158, 159
 Фролов В. Л. 39
 Фролов Д. В. 192

Х

Халитова Т. Ф. 6
 Хань Юн 47

Хатункин В. Ю. 35
 Хейфец А. Э. 23, 40, 158, 159
 Химич И. А. 102, 113
 Хищенко К. В. 27, 159
 Хлебникова Ю. В. 146
 Хлыбов В. И. 228
 Хмельницкий Д. В. 170, 175
 Хмель Т. А. 80
 Хомская И. В. 23, 40, 120, 158, 159
 Хусаинов А. В. 33
 Хусаинов В. М. 33
 Хуэй Пэн 119

Ц

Цзань Цзичао 47
 Цз. Д. Юй 119
 Цзидун Юй 119
 Цицилин П. А. 41
 Ц. У 119
 Цышевский Р. В. 58
 Цян У 119

Ч

Чапурова Т. В. 33
 Чемагина И. В. 50, 56, 75, 81
 Чепурин Е. В. 70
 Черемазов В. Е. 36
 Чернов А. В. 33
 Черняков В. Е. 102
 Четверушкин Б. Н. 7
 Чефонов О. В. 114
 Чешко А. Д. 228
 Чижков М. Н. 16, 26
 Чингина Е. А. 122
 Чинин А. А. 157, 160
 Чихачев А. С. 114
 Чубарешко И. С. 209, 226, 229
 Чудаков Е. А. 132
 Чупова И. А. 137

Ш, Щ

Шадрин А. Ю. 188
 Шалковский Д. М. 133, 135
 Шаманин И. В. 196
 Шамраев А. Л. 112
 Шамро О. А. 157, 160
 Шаповалов Е. В. 97
 Шаталова Е. А. 230
 Шахетов Г. В. 191
 Шахторин Ю. А. 81
 Швец Н. Н. 44
 Шевченко В. Г. 58, 81, 133, 137
 Шейнкман В. С. 226
 Шереметьева У. Ф. 171, 173, 176, 179
 Шестаков А. А. 207, 209, 212, 216, 226, 229, 231
 Шестаковская Е. С. 122
 Шестаченко О. Е. 41

Шиканов А. Е. 86
 Ширинкина И. Г. 18
 Широбоков А. Е. 143, 149
 Шестириков М. А. 146, 161
 Шишкин В. Ю. 184
 Шишкин В. Ю. 184
 Шишленин М. А. 231
 Шишов Н. И. 64
 Шкляев В. А. 92
 Шмаков В. М. 196, 197
 Шмелев И. В. 132
 Шмидт О. В. 188
 Шорохов Е. В. 23, 40, 120, 145, 148, 158, 159
 Шульц О. В. 181, 183, 192, 198
 Шур В. Я. 58
 Щербаков В. Н. 54

Ю

Югов Н. Т. 13

Юдов А. А. 172, 199
 Юсупов Д. Т. 135, 146, 161
 Юфа В. Н. 42

Я

Яблонских Т. И. 18
 Яговкин А. О. 132
 Яковлева О. Ф. 53
 Яковлев Г. А. 30
 Яковлев С. М. 53
 Якубов В. Б. 98
 Якунин А. К. 149, 162
 Яловец А. П. 87, 115, 218
 Янилкин А. В. 147
 Янилкин Ю. В. 43, 82, 217
 Янов Д. В. 213
 Яо Куйгуан 47
 Яхин Р. А. 99

INDEX

А

Abdullina D. N. 121, 160
 Aduев B. P. 67, 68, 71
 Afanas'eva S. A. 13
 Agafontsev M. V. 69
 Aganin A. A. 6
 Agranat M. B. 114
 Akashev L. A. 133
 Akhlustin I. A. 49, 73
 Akhlyustin I. A. 56
 Akopyan T. K. 145
 Akulinina E. Yu. 104
 Alekseev V. V. 130
 Andreev A. M. 42
 Andreev S. G. 128
 Anikin N. B. 38, 142, 143, 163
 Anisichkin V. F. 11, 48
 Antipova T. A. 51
 Antipova T. V. 71, 81
 Antoniuk L. K. 133
 Anuchina A. I. 228
 Aristova A. Yu. 35
 Artemova N. A. 228
 Arzhannikov A. V. 196
 Ashitkov S. I. 114
 Astafiev V. V. 19
 Astafurova M. V. 12, 85
 Astafurov V. I. 85

В

Baban' S. A. 17
 Badretdinova L. H. 122
 Badretdinova L. Kh. 50, 73
 Bakirov A. R. 50

Bakurkina E. S. 102
 Barakhvostov S. V. 88
 Baranov V. K. 130
 Barenbaum A. A. 14, 15
 Basotov V. Ya. 66
 Batalova I. A. 51
 Batkov M. U. 133
 Batuev S. P. 203, 225
 Bautin S. P. 204, 205, 216
 Baydin V. G. 34
 Bazanov A. A. 98
 Bazotov V. Ja. 77
 Bazotov V. Y. 55
 Bazotov V. Ya. 29, 50, 73
 Bedenko S. V. 196
 Beketov A. P. 121
 Belenovskiy Yu. A. 49, 54, 56, 73
 Belokurov G. M. 71
 Belonogova E. A. 172, 174
 Belonogov M. N. 171, 175
 Belov A. S. 16
 Belov I. A. 35
 Belov N. A. 145
 Belov N. N. 13
 Belyaev G. E. 138
 Berezhnov A. N. 28
 Berezovskaya M. E. 104
 Besov S. S. 173
 Bezgodov E. V. 193, 194
 Bezgodov E. V. 169
 Biryukova M. A. 122
 Bochkareva A. A. 172, 174, 183
 Bochkov E. I. 98
 Bodrov A. S. 214
 Bogdanov A. N. 51
 Bogdanov A. V. 97

Boldyrev M. I. 17
Borisyonok V. A. 32
Bortsov A. A. 146
Boyko M. M. 128
Bragin A. M. 134
Bragov A. M. 151
Braguntsov Ye. Ya. 18
Braguntsov Ye. Ya. 52
Brantov A. V. 89
Brichikov S. A. 144
Brodova I. G. 19, 145
Bugaenko A. A. 206
Bugaenko I. L. 38
Burdonsky I. N. 42
Burkin V. V. 13
Buyanov A. B. 41
Buyko A. M. 20, 86, 99
Bychenkov V. Yu. 5, 89

C

Chachetov G. V. 192
Chapuriva T. V. 34
Chefonov O. V. 114
Chemagina I. V. 51, 56, 75, 81
Chepurin E. V. 71
Cheremazov V. E. 36
Chernov A. V. 34
Chernyakov V. E. 102
Cheshko A. D. 229
Chetverushkin B. N. 8
Chikhachev A. S. 115
Chingina E. A. 123
Chinin A. A. 158, 161
Chizhkov M. N. 17, 27
Chubareshko I. S. 209, 226, 230
Chudakov E. A. 133
Chupova I. A. 137

D

Dai Xiaogan 48
Dashapilov G. R. 74
Dashko D. V. 53
Davletchin Yu. F. 169
Davletshin A. I. 6
Davydov V. Y. 57
Degtyarev A. A. 24, 40
Dementev O. N. 210
Denisova V. A. 35
Dergunov A. V. 133
Derkach V. N. 35, 130
Deryabin S. L. 210
Desyatnikova M. A. 99
Dolgikh S. M. 40, 61, 77, 146, 153
Dolgoleva G. V. 91
Dotsenko V. V. 211
Drozdovsky A. A. 97
Drozdovsky S. A. 97
Duan Yingliang 47

Duday P. V. 98, 130
Dunayev V. N. 54
Dyachkov S. A. 131
Dyrda N. D. 177, 180, 183

E

Efanov A. N. 121
Eganova A. V. 51
Egorova L. Yu. 147
Egoryan A. D. 63
Emelin D. A. 132
Emeljanova E. Yu. 211
Ershova A. V. 212
Ershov A. P. 74
Eselevich D. A. 58, 82, 137
Eskov A. N. 80
Es'kov N. S. 61
Evlashin S. A. 114
Evsyukova Yu. A. 188

F

Falahutdinov R. M. 148
Falkov A. L. 112
Favalli A. 167, 168
Fayrushina L. R. 195
Fedorova A. S. 175
Fedorov A. V. 133
Fedorov V. B. 32
Fedyushkin V. N. 169, 194
Filatov S. Yu. 145
Filippov V. G. 28
Finyushin S. A. 133
Flegentov V. A. 112
Fokin V. B. 38
Fomichev V. A. 158, 161
Fomin E. V. 157
Fomin V. M. 18, 52
Fortov V. E. 114
Frolova N. Yu. 24, 40, 159, 160
Frolov D. V. 193
Frolov V. L. 39

G

Gaan K. V. 61, 148, 159
Gadzhiev A. D. 207
Gagarkin D. M. 54
Galashev A. Y. 178
Galiullin I. G. 54
Garanin R. V. 35
Garanin S. F. 20, 99
Garanin S. G. 92
Garifullina G. D. 55
Garifullin R. Sh. 77
Garkushin G. V. 121
Garmashev A. Yu. 51, 54, 78, 81, 122, 135, 146, 153, 161
Gashkov M. A. 22

Gavrilin R. O. 97
 Gavrilov D. S. 112
 Gavrilov P. M. 22
 Gaydamak S. N. 26
 Georgievskiy P. Yu. 79
 Geynts V. L. 207
 Gilev S. D. 125, 126
 Gil'mutdinov D. K. 73
 Gilmutdinov D. K. 56
 Glazyrin I. V. 17, 27, 103, 212, 224
 Glazyrin S. I. 89
 Glazyrin V. P. 72
 Glukhov R. D. 138
 Glybin A. M. 130
 Gnutov I. S. 133
 Golomidov F. O. 208
 Gorbachyova E. S. 190
 Gordeichuk V. A. 228
 Gorokhov S. A. 112
 Goubin A. S. 57
 Grabovenskaya S. A. 209, 213
 Grachyova N. A. 126
 Grebyonkin K. F. 5, 27
 Greenberg B. A. 127
 Gretsova A. N. 51, 56, 75
 Grigoryev S. Yu. 131
 Grishkov A. A. 93
 Grokhovsky V. I. 23, 30, 31
 Gross I. N. 76
 Gryaznov E. F. 128
 Gryaznov V. 95
 Gubchenko V. M. 90
 Gubin S. A. 129
 Gubskiy K. L. 130, 138
 Guo P. 25
 Gus'kov S. Yu. 27
 Gus'kov S. Yu. 100

H

Han Yong 47
 Husainov A. V. 34
 Husainov V. M. 34

I

Iagovkin A. O. 133
 Ilnitsky D. K. 148
 Ilyakova N. N. 67
 Ilyakov N. N. 68
 Iosilevskiy I. 95
 Irinichev D. A. 130
 Isaev A. A. 87
 Ishchenko A. N. 13
 Iskhakov T. N. 50
 Ivanichkina K. A. 178
 Ivanov A. A. 196
 Ivanova G. G. 86, 99
 Ivanov A. S. 34, 193
 Ivanov M. Ja. 60

Ivanovsky A. V. 92, 98, 130
 Ivanov S. N. 93
 Ivanov M. Ya. 215
 Ivashkin N. V. 179
 Ivashkin V. V. 25
 Ivliev S. V. 94

K

Kalashnikov D. A. 133
 Kalinin M. P. 133
 Kantsyrev A. V. 97
 Kanunnikov R. N. 154
 Karavayev A. V. 134
 Karepov V. A. 99
 Karlykhanov N. G. 96, 102, 113
 Karpov M. A. 97
 Kashkarov A. O. 74, 153, 155
 Kas'yanov S. Yu. 173
 Kazakov D. N. 141, 145
 Kaziev T. V. 138
 Khalitova T. F. 6
 Khatunkin V. Yu. 35
 Kheifets A. E. 159, 160
 Kheyfets A. E. 24, 40
 Khimich I. A. 102, 113
 Khishchenko K. V. 27, 159
 Khlebnikova Yu. V. 147
 Khlybov V. I. 229
 Khmelnitsky D. V. 171, 175
 Khmel T. A. 80
 Khomskaya I. V. 24, 40, 121, 159, 160
 Kichigin R. M. 134
 Kiryanova A. S. 210
 Kiryushchenkova N. A. 50
 Kiselev A. I. 133
 Kiskin A. E. 61
 Kiskin P. E. 61
 Klenov A. I. 161
 Kleopova N. A. 97
 Klimenko V. Yu. 128
 Klyonov A. I. 135
 Kochutin D. V. 62
 Kolchugin S. V. 104
 Kolobov Yu. K. 175
 Kolotova L. N. 137
 Komarov R. V. 80
 Kondratenko P. S. 114
 Kononov S. N. 205
 Konyukova A. V. 82, 137
 Konyukov I. V. 137
 Korchikov V. S. 41
 Kornilova A. A. 26
 Korolev A. S. 104
 Kosheleva E. V. 152, 156
 Koshutin D. A. 207, 209, 217
 Kosolapov I. E. 49, 56, 73
 Kostenko I. I. 173, 199
 Kostitsyn O. V. 49, 50, 51, 54, 56, 61, 73, 75, 78, 81
 Kotova O. G. 27, 103

Koval A. V. 40
 Koval' A. V. 19
 Kovalenko A. I. 216
 Kovalenko M. G. 136
 Kovaleva S. F. 112
 Kovalyov Yu. M. 122
 Koynov O. V. 190
 Kozlov E. A. 134, 144
 Kozlov S. G. 158
 Kozlovskii K. I. 87
 Kraev A. I. 98
 Kraiko A. N. 63
 Krainov A. Yu. 221
 Krasilnikov V. N. 82
 Krasnikov V. S. 124, 139
 Krasnyuk I. K. 27
 Krayev A. I. 130
 Krayukhin A. A. 217
 Krayukhin A. A. 35
 Krukov V. M. 34, 193
 Krutova I. Yu. 204, 206, 223
 Kryukov V. M. 169
 Kuchko D. P. 80, 144, 149
 Kuchugov P. A. 100
 Kudelkin V. B. 98
 Kudryavtsev A. A. 70
 Kukhno A. V. 110
 Kukulja M. M. 59
 Kuleshov A. A. 218
 Kulikov M. A. 100
 Kulikov S. M. 92
 Kulikov V. N. 64
 Kupriyanec D. N. 17
 Kuropatkin Yu. P. 158, 161
 Kuryshcheva E. V. 192
 Kuzmina T. E. 192
 Kuznetsov A. P. 130, 138
 Kuznetsov A. V. 151
 Kuznetsov D. K. 58
 Kuznetsov S. D. 99
 Kuznetsov Yu. A. 110

L

Lachugin A. A. 66, 73
 Lapina Yu. V. 34
 Larichev M. N. 138
 Larin D. E. 100
 Larionov M. Yu. 31
 Lavruk S. A. 65, 80
 Lebedev S. N. 111
 Leonov A. G. 42
 Lepekhin N. M. 110
 Lepyokhin N. M. 28
 Levak K. V. 61
 Levashov P. R. 38, 142
 Levin V. A. 66, 79
 Levunina E. C. 205
 Leyvi A. Ya. 219
 Limonov A. V. 41

Lindemuth I. R. 20
 Lipchak A. I. 88
 Lisenkov V. V. 93
 Liskov I. Y. 67
 Liskov I. Yu. 68, 71
 Litvinenko I. A. 34
 Liu Rui 47
 Lobachev A. S. 154
 Loboda E. L. 69
 Loboda P. A. 101, 104, 112
 Loboda Yu. A. 69
 Lomunov A. K. 134, 151
 Lopatkin S. A. 76
 Lukashova M. V. 70
 Lukicheva Z. P. 53
 Lykov V. A. 96, 102, 111, 113

M

Makalsky L. M. 110
 Makarov K. N. 42
 Makeeva I. R. 172, 174, 177, 195
 Makeyeva I. R. 180, 182, 183, 199
 Maklashova I. V. 129
 Malev V. V. 154
 Malinin S. A. 76
 Maltseva N. S. 35
 Malyugina S. N. 136, 141, 145
 Malyutina S. N. 143
 Mamaev V. K. 60
 Mamayev V. K. 215
 Mamyshev V. I. 92, 98
 Marennyy A. M. 85
 Marsov A. A. 29, 66, 73
 Mashchenko M. A. 62
 Matveev A. A. 64
 Mayer A. E. 124, 126, 139, 140, 157
 Mayer P. N. 140
 Mayorova A. S. 141, 145
 Mesyats G. A. 22
 Mezentsev A. V. 220
 Mikhailov N. A. 17, 27, 212
 Mikhailyuk A. V. 130
 Mikhaylov N. A. 224
 Milekhin Yu. M. 64, 76
 Milovzorov N. G. 70
 Minakov D. V. 142
 Mingaleyev I. R. 29
 Miroshkin K. M. 49, 56, 73
 Miroshnichenko V. P. 28
 Misko V. V. 35
 Mitrofanov A. Y. 59
 Modestov D. G. 171, 175, 196
 Moiseeva K. M. 221
 Mokeyev A. A. 66, 73
 Mokeyev A. A. 29
 Mokrushin S. S. 141, 142, 145
 Morozova I. V. 86
 Morozova N. V. 169
 Moshkin D. L. 169, 194

Muftakhedinova R. F. 30
 Mukhin D. V. 154
 Muzyrya A. K. 30, 122
 Myshetskaya E. E. 218
 Mytarev M. S. 143

N

Nadezhin S. S. 130
 Naumova M. Yu. 110
 Nazarov K. S. 27, 103, 212
 Nazarov Yu. A. 28
 Nechaykin P. V. 41
 Nel G. M. 68
 Nelyubina N. V. 71
 Neskin A. G. 34, 71
 Nigmatulin R. I. 6
 Nikiforov M. V. 169, 194
 Nikitin A. P. 67, 68
 Nikolaev A. Yu. 154
 Nikulshin M. V. 121, 211
 Nikulshin M. V. 190
 Nizhegorodtsev V. I. 158
 Nizhegorodtsev V. I. 161
 Novikov I. G. 206
 Nurmukhametov D. R. 71

O

Obuhov A. G. 204
 Obukhov A. G. 222
 Ogloblichev V. V. 181
 Olhovskiy A. V. 144
 Opryshko O. V. 223
 Orlov M. Yu. 72
 Orlov Yu. N. 72
 Osavchuk A. N. 64
 Ovchinnikov A. V. 114
 Ovechkin A. A. 104, 112

P

Pakhnutova N. V. 214
 Pakhomov S. A. 192
 Palaniyappan S. 167
 Panfilov P. E. 147
 Pankratov D. G. 149, 162
 Panyushkin V. A. 97
 Paramonov M. A. 142
 Parshikov A. N. 131
 Pashentsev V. A. 36
 Pastukhovich A. Yu. 31
 Pasyukov S. D. 169, 194
 Patselov A. M. 147
 Paukova A. E. 182
 Pavlenko A. V. 38, 42, 136, 141, 142, 143, 145, 193
 Pchelintseva S. V. 180
 Pei Xiaoyang 119
 Pei X. Y. 120
 Peng Hui 119

Perminov A. V. 41
 Peshkichev I. V. 174, 182, 183, 199
 Peshkov R. A. 32
 Petrova A. N. 19, 145
 Petrova O. E. 34
 Petrov A. S. 66, 73
 Petrov D. V. 56, 122, 153
 Petrovtsev A. V. 134, 136
 Petukhov E. A. 146, 161
 Pevny S. N. 92
 Pigasov E. E. 34
 Pikuz S. A. 105
 Pilyugin V. P. 127, 147
 Pirog V. A. 138
 Pisklova M. A. 224
 Piskunov Yu. A. 38
 Plekhanov A. A. 87
 Pogorelko V. V. 139
 Pokatashkin P. A. 148
 Polyushko S. M. 98
 Popova E. N. 148
 Popova V. V. 104
 Popov I. A. 169, 194
 Popov N. A. 58, 133
 Popov V. V. 148
 Poptsov A. G. 149, 162
 Potapov A. A. 106
 Potapov A. M. 181, 184, 185
 Povarnitsyn M. E. 38
 Prikhodko V. V. 196
 Prosvirnin K. M. 49, 56, 73
 Prueel E. R. 153
 Prueel E. R. 11, 74, 155
 Pugachev V. Yu. 182, 195
 Pushkin M. S. 127
 Putilin O. S. 121, 211
 Putilin O. S. 190

R

Radchenko A. V. 203, 225
 Radchenko P. A. 203, 225
 Rakhel A. D. 107
 Ralnikov M. A. 80, 149
 Ran Jianglong 47
 Razorenov S. V. 121, 145, 160
 Reinovsky R. E. 20, 167, 168
 Reyno V. V. 69
 Rogachev V. G. 35, 92
 Romanov A. M. 186, 187
 Romanov I. N. 158
 Roudskoy I. V. 97
 Rubtsov I. A. 74, 155
 Rudina A. Kh. 75
 Ryabina A. V. 137
 Ryakin A. A. 190
 Rykounov A. A. 108, 132, 150
 Rykovanova V. V. 111
 Rykovanov G. N. 102, 113
 Rykunova A. A. 182, 188, 195, 199

S

Sadovnichii D. N. 76
 Safronov K. V. 112
 Salnikova N. I. 77
 Salnikov A. S. 77
 Salyulev A. B. 185
 Sammel A. Yu. 13
 Sannikov V. S. 53
 Sarafannikov A. V. 49, 54, 56, 73
 Sasorov P. V. 97
 Satonkina N. P. 74
 Savchenko K. V. 158, 161
 Savenkov G. G. 151
 Savin S. M. 97
 Sedov S. Yu. 32
 Sel'chenkova N. I. 152, 156
 Selemir V. D. 158, 161
 Selezneva K. I. 111
 Seleznev V. N. 111
 Semenov A. Yu. 27
 Semenov V. L. 60
 Serebryak V. G. 169, 194
 Serezhkin A. A. 225
 Serova E. V. 196
 Shadrin A. Yu. 188
 Shakhtorin Yu. A. 81
 Shalkovsky D. M. 134, 136
 Shamanin I. V. 196
 Shamraev A. L. 112
 Shamro O. A. 158, 161
 Shapovalov E. V. 98
 Shatalova E. A. 230
 Shcherbakov V. N. 54
 Sheinkman V. S. 226
 Sheremetyeva U. F. 172, 174, 177, 180
 Shestachenko O. E. 42
 Shestakov A. A. 207, 209, 213, 217, 226, 230, 231
 Shestakovskaya E. S. 122
 Shevchenko V. G. 58, 82, 133, 137
 Shikanov A. E. 87
 Shirinkina I. G. 19
 Shirobokov A. E. 144, 149
 Shishkin V. Yu. 184, 185
 Shishlenin M. A. 232
 Shishov N. I. 64
 Shistirikov M. A. 146, 161
 Shklyayev V. A. 93
 Shmakov V. M. 196, 197
 Shmelev I. V. 133
 Schmidt O. V. 188
 Shorohov E. V. 19, 148
 Shorokhov E. V. 24, 40, 121, 145, 159, 160
 Shults O. V. 182, 183, 193, 199
 Shur V. Ya. 58
 Sidorov V. V. 192
 Simakov F. A. 51
 Simonenko V. A. 7, 34, 171, 175, 177, 193
 Simonov O. A. 226
 Sinitsky S. L. 196

Sin'kova O. G. 82
 Sinkova O. G. 44
 Skorochkin Yu. V. 35
 Skosirsky A. B. 13
 Skripina T. S. 76
 Smirnov E. B. 19, 24, 40, 77, 122, 135, 146, 153, 154, 161
 Smirnov K. S. 161
 Smirnov N. A. 153
 Smirnov V. N. 36, 77
 Sobolevskaya A. V. 75
 Sokolov M. A. 77
 Sokolov S. S. 156
 Sokolov V. P. 34
 Sokolov Yu. A. 173, 199
 Solovei V. A. 175
 Somov P. A. 70
 Son E. E. 7
 Sorokin S. A. 108, 109
 Stadnik A. L. 217
 Stadnik A. L. 35
 Stankevich A. V. 50, 56, 75, 78, 122
 Starikov S. V. 137
 Starodubtsev P. V. 35
 Statsenko V. P. 44, 82
 Stavrietsky G. V. 35
 Stepanov I. G. 138
 Stepanov N. V. 196
 Stolbikov M. Yu. 36
 Stolbovsky A. V. 148
 Stuchebrukhov I. A. 27
 Suaridze T. R. 147
 Sukharevsky D. I. 110
 Sutyurin O. G. 79
 Sverchkov A. G. 26
 Sviridov E. V. 42
 Syrtsova Yu. G. 180
 Sysoev V. S. 110

T

Tachaev G. V. 100
 Taibinov N. P. 50, 51, 56, 75, 78, 81
 Tarakanov A. A. 169, 194
 Tarasov A. Yu. 81
 Tarasov F. I. 154
 Tarzhanov V. I. 80
 Telegina V. Yu. 35
 Ten K. A. 74, 153, 155
 Tereshenko M. N. 57
 Tischenko A. S. 112
 Tishchenko I. Yu. 138
 Titova A. M. 196
 Titova O. V. 169
 Titov V. V. 211
 Tkachenko S. I. 88
 Tolkacheva S. I. 80
 Tolmachev T. P. 147
 Tolochko B. P. 153, 155
 Tomofeeva T. B. 62

Toporkov D. Yu. 6
 Torshin D. V. 111
 Tren'kin A. A. 41
 Trunin I. R. 156
 Tsitsilin P. A. 41
 Tsyshevsky R. V. 59
 Tyaktev A. A. 38, 142

U

Uchaev A. Ya. 152, 156
 Ufimtsev Yu. S. 194
 Uimanov I. V. 22
 Urakova A. V. 209, 217, 226
 Urlin E. V. 158
 Ushakova O. V. 228
 Ushakov A. V. 193

V

Valeev M. F. 20
 Valiev Kh. F. 63
 Varfolomeev D. A. 61
 Varfolomeyev D. A. 230
 Vasileva A. A. 53
 Vaulin S. D. 32
 Vavilova I. G. 175
 Velichko A. M. 138
 Verkhovskii S. V. 181
 Vershinskaya A. S. 209, 213
 Vlasov A. N. 36
 Volkov I. A. 171, 175
 Volkov N. B. 88, 123
 Vorobyev A. V. 80
 Vorobyova M. A. 108, 150
 Voronin D. S. 124
 Voropinov A. A. 206, 208
 Vovchenko E. D. 87
 Voyevodin S. V. 41
 Vysikaylo P. I. 21

W

Wen Wen 48
 Wu Q. 120
 Wu Qiang 119

X

Xiang Yong 48

Y

Yablonskikh T. I. 19
 Yakhin R. A. 100
 Yakovleva O. F. 53
 Yakovlev G. A. 30
 Yakovlev S. M. 53
 Yakubov V. B. 99
 Yakunin A. K. 149, 162
 Yalovets A. P. 88, 115, 219
 Yanilin Yu. V. 217
 Yanilkin A. V. 148
 Yanilkin Yu. V. 43, 44, 82
 Yanov D. V. 214
 Yao Kuiguang 48
 Yao S. L. 120
 Yao Songlin 119
 Yes'man A. A. 100
 Yudov A. A. 173, 199
 Yufa V. N. 42
 Yugov N. T. 13
 Yu J. D. 120
 Yu Jidong 119
 Yusupov D. T. 135, 136, 146, 161
 Yu Y. Y. 120

Z

Zamuraev D. O. 112
 Zan Jichao 47
 Zavialov V. V. 207, 209
 Zavialov Z. S. 145
 Zaviyalov V. V. 213
 Zavyalov Z. I. 146
 Zaykov Yu. P. 184
 Zel'dovich V. I. 24, 40, 159
 Zeldovich V. I. 160
 Zelenov A. N. 71
 Zelepugin S. A. 214
 Zhakhovsky V. V. 131
 Zherebtsov A. L. 61, 62
 Zhernokletov M. V. 133
 Zhilyaeva N. S. 34
 Zhukov Yu. M. 58
 Zimenkov A. A. 98, 130
 Zmitrenko N. V. 100
 Zolotovskiy A. V. 35
 Zubarev N. M. 22
 Zvegintsev V. I. 18
 Zverev A. S. 59, 67, 68

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

PLENARY SESSION

НОВЫЕ ПОДХОДЫ В ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОЙ ФИЗИКЕ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО СВЕТА	5
<i>В. Ю. Быченко</i>	
NEW APPROACHES FOR LASER-PLASMA PHYSICS OF EXTREME LIGHT	5
<i>V. Yu. Bychenkov</i>	
ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЕТОНАЦИИ ГЕТЕРОГЕННЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВВ	5
<i>К. Ф. Гребёнкин</i>	
PHYSICAL MODELS OF CRYSTALLINE HETEROGENEOUS HE DETONATION	5
<i>K. F. Grebyonkin</i>	
ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ КУМУЛЯЦИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ СХЛОПЫВАНИИ ПАРОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ	6
<i>Р. И. Нигматулин, А. А. Аганин, А. И. Давлетишин, Д. Ю. Топорков, Т. Ф. Халитова</i>	
EXTREME CUMULATION OF ENERGY DURING THE COLLAPSE OF VAPOR BUBBLES	6
<i>R. I. Nigmatulin, A. A. Aganin, A. I. Davletshin, D. Yu. Toporkov, T. F. Khalitova</i>	
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ, ПРИКЛАДНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПО РЯДУ АКТУАЛЬНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЙ	6
<i>В. А. Симоненко</i>	
FUNDAMENTAL, APPLIED AND TECHNOLOGY CHALLENGES IN SEVERAL PRESSING FIELDS OF RESEARCH	7
<i>V. A. Simonenko</i>	
ТУРБУЛЕНТНОСТЬ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СРЕД С ОБЪЕМНЫМИ СИЛАМИ	7
<i>Э. Е. Сон</i>	
TURBULENCE OF HIGH-TEMPERATURE MEDIA WITH VOLUMETRIC FORCES	7
<i>E. E. Son</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ МАГНИТНОЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ НА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ СВЕРХВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ	7
<i>Б. Н. Четверушкин</i>	
SIMULATION OF MAGNETIC GAS DYNAMICS PROBLEM USING COMPUTING SYSTEMS OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE	8
<i>B. N. Chetverushkin</i>	

Секция 1

КОСМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ЗЕМЛИ, ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

Section 1

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПЛАНЕТ – ГАЗОВЫХ ГИГАНТОВ В ПЛАНЕТЫ ЗЕМНОГО ТИПА	11
<i>Э. Р. Прууэл, В. Ф. Анисичкин</i>	
SIMULATION OF EXPLOSIVE TRANSFORMATION OF GAS GIANT PLANETS INTO THE EARTH-LIKE PLANETS	11
<i>E. R. Pruuuel, V. F. Anisichkin</i>	
О ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЕ ЭНЕРГИИ РАСШИРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВА ВСЕЛЕННОЙ	12
<i>М. В. Астафурова</i>	
ABOUT THE PHYSICAL NATURE OF THE EXPANSION ENERGY OF THE SPACE OF UNIVERSE	12
<i>M. V. Astafurova</i>	
ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПРОНИКАНИЯ УДАРНИКОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ВОЛЬФРАМА В СТАЛЬНУЮ ПРЕГРАДУ	13
<i>С. А. Афанасьева, Н. Н. Белов, В. В. Буркин, А. Н. Ищенко, А. Ю. Саммель, А. Б. Скосырский, Н. Т. Югов</i>	

FEATURES OF HIGH-VELOCITY PENETRATION OF IMPACTORS FROM TUNGSTEN BASED COMPOSITION MATERIALS IN A STEEL SHIELD	13
<i>S. A. Afanas'eva, N. N. Belov, V. V. Burkin, A. N. Ishchenko, A. Yu. Sammel, A. B. Skosirsky, N. T. Yugov</i>	
КУМУЛЯТИВНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР ГАЛАКТИЧЕСКИМИ КОМЕТАМИ НА ПЛАНЕТАХ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ	13
<i>A. A. Баренбаум</i>	
CUMULATIVE FORMATION OF GEOLOGICAL STRUCTURES BY GALACTIC COMETS ON TERRESTRIAL PLANETS	14
<i>A. A. Varenbaum</i>	
О РЕАЛЬНОСТИ «БОЛЬШОГО ВЗРЫВА» В КОСМОЛОГИИ	14
<i>A. A. Баренбаум</i>	
ON THE REALITY OF THE "BIG BANG" IN COSMOLOGY	15
<i>A. A. Varenbaum</i>	
УПРАВЛЯЕМЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МАГНИТОСФЕРНУЮ ПЛАЗМУ С ПОМОЩЬЮ МОЩНОГО КОРОТКОВОЛНОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ	15
<i>A. С. Белов</i>	
CONTROLLED IMPACTS ON MAGNETOSPHERIC PLASMA WITH THE HELP OF INTENSE SHORT-WAVE RADIO EMISSION	16
<i>A. S. Belov</i>	
НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ k-EPS МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ТУРБУЛИЗОВАННЫМ СЛОЕМ	16
<i>М. И. Болдырев, С. А. Бабань, И. В. Глазырин, Д. Н. Курприянец, Н. А. Михайлов, М. Н. Чижков</i>	
CALIBRATION OF k-EPS TURBULENCE MODEL FOR DESCRIPTION OF EXPERIMENTS ON INTERACTION OF SHOCK WAVE WITH TURBULENT LAYER	17
<i>М. I. Boldyrev, S. A. Baban', I. V. Glazyrin, D. N. Kupriyanec, N. A. Mikhailov, M. N. Chizhkov</i>	
ЯВЛЕНИЯ НЕИДЕАЛЬНОЙ КУМУЛЯЦИИ	17
<i>В. М. Фомин, В. И. Звезинцев, Е. Я. Брагунцов</i>	
PHENOMENA OF NONIDEAL CUMULATIVE ACTION	18
<i>V. M. Fomin, V. I. Zvegintsev, Ye. Ya. Braguntsov</i>	
ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НА СЦЕНАРИИ СХОЖДЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ	18
<i>И. Г. Бродова, И. Г. Ширинкина, А. Н. Петрова, А. В. Коваль, Е. В. Шорохов, Е. Б. Смирнов, В. В. Астафьев, Т. И. Яблонских</i>	
INFLUENCE OF COMPOSITION AND MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINUM ALLOYS ON SCENARIOS OF CONVERGENCE OF CYLINDRICAL SHELLS	19
<i>I. G. Brodova, I. G. Shirinkina, A. N. Petrova, A. V. Koval', E. V. Shorohov, E. B. Smirnov, V. V. Astafiev, T. I. Yablonskikh</i>	
25 ЛЕТ ПЕРВОМУ СОВМЕСТНОМУ РОССИЙСКО-АМЕРИКАНСКОМУ ЭКСПЕРИМЕНТУ С ДИСКОВЫМ ВМГ.	19
<i>А. М. Буйко, С. Ф. Гаранин, И. Р. Линдемут, Р. Е. Рейновски</i>	
25TH ANNIVERSARY OF THE JOINT US-RUSSIAN DISK EMG EXPERIMENT	20
<i>A. M. Buiyko, S. F. Garanin, I. R. Lindemuth, R. E. Reinovsky</i>	
ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ КОМЕТЫ ЧУРУМОВА-ГЕРАСИМЕНКО	20
<i>М. Ф. Валеев</i>	
POSSIBLE FORMATION MECHANISM OF CHURUMOV-GERASIMENKO COMET	20
<i>M. F. Valeev</i>	
СРАВНЕНИЯ ЯВЛЕНИЙ С ОГРАНИЧЕННОЙ КУМУЛЯЦИЕЙ В ФЕМТО-, НАНО-, МЕЗО- И МАКРОМИРАХ	21
<i>Ф. И. Высикайло</i>	

COMPARISONS OF PHENOMENA WITH LIMITED CUMULATION IN FEMTO-, NANO-, MEZO- AND MACRO-WORLDS	21
<i>P. I. Vysikaylo</i>	
ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦ И ОБЪЕКТОВ ВО ВСЕЛЕННОЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГРАВИТАЦИИ МАССИВНОГО ТЕЛА	21
<i>П. М. Гаврилов</i>	
MOTION OF PARTICLES AND OBJECTS IN THE UNIVERSE INFLUENCED BY MASSIVE BODY GRAVITATION	22
<i>P. M. Gavrilo</i>	
ДИНАМИКА ОБРАЗОВАНИЯ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КРАТЕРОВ В КАТОДНОМ ПЯТНЕ ВАКУУМНОЙ ДУГИ	22
<i>М. А. Гашков, Н. М. Зубарев, Г. А. Месяц, И. В. Уйманов</i>	
DYNAMICS OF LIQUID-METAL JETS FORMATION DURING THE FORMATION OF CRATERS IN A VACUUM ARC CATHODE SPOT	22
<i>M. A. Gashkov, G. A. Mesyats, I. V. Uimanov, N. M. Zubarev</i>	
МЕТЕОРИТИКА ПОСЛЕ ЧЕЛЯБИНСКОГО СОБЫТИЯ 15.02.2013 ГОДА	22
<i>В. И. Гроховский</i>	
METEORITE SCIENCE AFTER CHELYABINSK EVENT OF FEBRUARY 15, 2013	23
<i>V. I. Grokhovsky</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СХОЖДЕНИЯ МЕДНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК	23
<i>В. И. Зельдович, Н. Ю. Фролова, А. Э. Хейфец, И. В. Хомская, Е. Б. Смирнов, А. А. Дегтярев, Е. В. Шорохов</i>	
STUDY OF THE CONVERGENCE PROCESS OF COPPER CYLINDRICAL SHELLS	24
<i>V. I. Zel'dovich, N. Yu. Frolova, A. E. Kheyfets, I. V. Khomskaaya, E. B. Smirnov, A. A. Degtyarev, E. V. Shorokhov</i>	
АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ АСТЕРОИДА АПОФИС, ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРИТА И АСТЕРОИДА 2008 ТС3 ПО ОПТИЧЕСКИМ ИЗМЕРЕНИЯМ СИСТЕМЫ «НЕБОСВОД»	24
<i>В. В. Ивашкин, П. Гуо</i>	
ACCURACY ANALYSIS FOR DETERMINING ORBITAL PARAMETERS OF THE APOPHIS ASTEROID, CHELYABINSK METEOROID AND ASTEROID 2008 TC3 USING «NEBOSVOD» SYSTEM'S OPTICAL MEASUREMENTS	25
<i>V. V. Ivashkin, P. Guo</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАДИАЦИОННЫХ И ТЕПЛОВЫХ ЯВЛЕНИЙ, ОБРАЗУЕМЫХ ПРИ КАВИТАЦИИ СТРУЙ ЖИДКОСТИ НА ДЕУТЕРИРОВАННЫЙ ТИТАН	25
<i>А. А. Корнилова, С. Н. Гайдамака, А. Г. Сверчков</i>	
INVESTIGATION OF THE EFFECT OF RADIATION AND HEAT PHENOMENA, FORMED BY THE CAVITATION OF LIQUID JETS TO DEUTERATED TITANIUM	26
<i>A. A. Kornilova, S. N. Gaydamaka, A. G. Sverchikov</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ РИХТМАЙЕРА–МЕШКОВА, РЕЛЕЯ–ТЕЙЛОРА И КЕЛЬВИНА–ГЕЛЬМГОЛЬЦА НА МОЩНЫХ ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВКАХ	26
<i>О. Г. Котова, И. В. Глазырин, К. Ф. Гребёнкин, Н. А. Михайлов, К. С. Назаров, М. Н. Чижков</i>	
MODELLING OF RICHTMYER-MESHKOV, RAYLEIGH-TEYLOR AND KELVIN-HELMHOLTZ INSTABILITY DEVELOPMENT ON POWER LASER FACILITIES	27
<i>O. G. Kotova, I. V. Glazyrin, K. F. Grebyonkin, N. A. Mikhailov, K. S. Nazarov, M. N. Chizhkov</i>	
ПОЛУЭМПИРИЧЕСКАЯ АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК УДАРНОЙ ВОЛНЫ В МЕТАЛЛАХ	27
<i>С. Ю. Гуськов, И. К. Красюк, А. Ю. Семенов, И. А. Стучебрюхов, К. В. Хищенко</i>	
SEMI-EMPIRICAL ANALYTICAL MODEL FOR CALCULATION OF SHOCK WAVE CHARACTERISTICS IN METALS	27
<i>S. Yu. Gus'kov, I. K. Krasuyuk, A. Yu. Semenov, I. A. Stuchebrukhov, K. V. Khishchenko</i>	
ИМИТАТОР ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ И ТОКОВ МОЛНИИ С АМПЛИТУДОЙ ДО 150 КА	28
<i>В. Г. Филиппов, Н. М. Лепёхин, В. П. Мирошниченко, А. Н. Бережнов, Ю. А. Назаров</i>	

SIMULATOR OF ELECTROMAGNETIC IMPULSES AND LIGHTNING CURRENTS WITH AMPLITUDE UP TO 150 KA	28
<i>V. G. Filippov, N. M. Lepyokhin, V. P. Miroshnichenko, A. N. Berezhnov, Yu. A. Nazarov</i>	
УДЛИНЕННЫЕ КУМУЛЯТИВНЫЕ ЗАРЯДЫ С МЕТАЕМОЙ СЕГМЕНТНО-ПРОФИЛЬНОЙ ОБЛИЦОВКОЙ	28
<i>И. Р. Мингалеев, В. Я. Базотов, А. А. Марсов, А. А. Мокеев</i>	
ELONGATED CUMULATIVE CHARGES WITH PROJECTED SEGMENT-PROFILE LINER	29
<i>I. R. Mingaleev, V. Ya. Bazotov, A. A. Marsov, A. A. Mokeyev</i>	
ЗАТУХАНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В ДРЕВЕСИНЕ БЕРЕЗЫ	29
<i>А. К. Музыря</i>	
SHOCK WAVE ATTENUATION IN BIRCHWOOD	30
<i>А. К. Музыря</i>	
СТРУКТУРНЫЕ И ФАЗОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В МЕТЕОРИТЕ ЧЕЛЯБИНСК LL5 ПОСЛЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ	30
<i>Р. Ф. Муфтахетдинова, В. И. Гроховский, Г. А. Яковлев</i>	
STRUCTURAL AND PHASE CHANGES IN THE CHELYABINSK LL5 METEORITE AFTER SHOCK-WAVE LOADING	30
<i>R. F. Muftakhetdinova, V. I. Grokhovsky, G. A. Yakovlev</i>	
ПОИСК КОСМИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ХОЛОДНЫХ И ГОРЯЧИХ ПУСТЫНЯХ МИРА. ОПЫТ МЕТЕОРИТНОЙ ЭКСПЕДИЦИИ УРФУ	30
<i>А. Ю. Пастухович, М. Ю. Ларионов, В. И. Гроховский</i>	
SEARCH FOR COSMIC SUBSTANCE IN COLD AND HOT DESERT OF THE WORLD. EXPERIENCE OF URFU METEORITE EXPEDITION	31
<i>A. Yu. Pastukhovich, M. Yu. Larionov, V. I. Grokhovsky</i>	
КОНЦЕПЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРАНСПОРТНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ	31
<i>С. Д. Ваулин, Р. А. Пешков, В. Б. Федоров</i>	
CONCEPT OF SMALL SPACE OBJECTS RESEARCH USING TRANSPORT ENERGY MODULE	32
<i>S. D. Vaulin, R. A. Peshkov, V. B. Fedorov</i>	
О РОЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В ЭФФЕКТЕ СОНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КОЛЛАПСИРУЮЩИХ ПУЗЫРЬКОВ	32
<i>В. А. Борисёнок, С. Ю. Седов</i>	
ON THE ROLE OF ELECTRIC POLARIZATION IN THE SONOLUMINESCENCE EFFECT OF COLLAPSING BUBBLES	32
<i>V. A. Borisyonok, S. Yu. Sedov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПОРОХОВЫХ ЗАРЯДОВ НА ПРОДУКТОВЫЙ ПЛАСТ ТЕРРИГЕННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, НАХОДЯЩЕГОСЯ НА ПОЗДНЕЙ СТАДИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ	33
<i>В. Г. Байдин, В. М. Крюков, А. С. Иванов, Н. С. Жилева, Ю. В. Лапина, И. А. Литвиненко, А. Г. Нескин, О. Е. Петрова, Е. Е. Пигасов, В. А. Симоненко, В. П. Соколов, Т. В. Чапурова, А. В. Чернов, А. В. Хусаинов, В. М. Хусаинов</i>	
STUDY OF DYNAMIC PROCESSES CAUSED BY POWDER CHARGE EXPLOSION IN THE VICINITY OF TERRIGENOUS DEPOSITS BEING AT THE LATER STAGE OF EXPLOITATION	34
<i>V. G. Baydin, V. M. Krukov, A. S. Ivanov, N. S. Zhilyaeva, Yu. V. Lapina, I. A. Litvinenko, A. G. Neskin, O. E. Petrova, E. E. Pigasov, V. A. Simonenko, V. P. Sokolov, T. V. Chapuriva, A. V. Chernov, A. V. Husainov, V. M. Husainov</i>	
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ МОДУЛЕЙ ДЕТЕКТИРУЮЩЕЙ СТАНЦИИ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА	34
<i>Г. В. Ставрицкий</i>	

THE DEVELOPMENT OF THE SYSTEM CONTROLLING THE PARAMETERS OF DETECTING SYSTEM MODULES FOR RADIOGRAPHIC COMPLEX	35
<i>G. V. Stavrietsky</i>	
ЛАЗЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШИТЕЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА НА КАМЕННЫЕ, ЛЕДЯНЫЕ И ЖЕЛЕЗНО-НИКЕЛЕВЫЕ АСТЕРОИДЫ	35
<i>А. Ю. Аристова, И. А. Белов, Р. В. Гаранин, В. А. Денисова, В. Н. Деркач, А. В. Золотовский, А. А. Краюхин, Н. С. Мальцева, В. В. Мисько, В. Г. Рогачёв, Ю. В. Скорочкин, А. Л. Стадник, П. В. Стародубцев, В. Ю. Телегина, В. Ю. Хатункин</i>	
LASER MODELING OF DESTRUCTIVE EFFECT OF NUCLEAR EXPLOSION ONTO STONE, ICY AND IRON-NICKEL ASTEROIDS	35
<i>A. Yu. Aristova, I. A. Belov, R. V. Gararin, V. A. Denisova, V. N. Derkach, A. V. Zolotovskiy, A. A. Krayukhin, N. S. Mal'tseva, V. V. Misko, V. G. Rogachev, Yu. V. Skorochkin, A. L. Stadnik, P. V. Starodubtsev, V. Yu. Telegina, V. Yu. Khatunkin</i>	
ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ С ЭНЕРГИЕЙ КВАНТОВ $E_{\gamma} < 1$ МЭВ С МЕТАЛЛАМИ $Z = 26 \div 92$	36
<i>В. Н. Смирнов, В. Е. Черемазов, М. Ю. Столбиков, А. Н. Власов, В. А. Пашенцев</i>	
THE FEATURES OF RADIATION ATTENUATION WITH QUANTA ENERGY $E_{\gamma} < 4$ MEV IN METALS WITH $Z = 26 \div 92$	36
<i>V. N. Smirnov, V. E. Cheremazov, M. Yu. Stolbikov, A. N. Vlasov, V. A. Pashentsev</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РИХТМАЙЕРА–МЕШКОВА НА КОНТАКТНЫХ ГРАНИЦАХ РАЗНОПЛОТНЫХ ГАЗОВЫХ СРЕД С ОДНОМОДОВЫМИ НАЧАЛЬНЫМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ	37
<i>А. А. Тяктев, А. В. Павленко, Н. Б. Аникин, Ю. А. Пискунов, И. Л. Бугаенко</i>	
INVESTIGATION INTO THE DEVELOPMENT OF RICHTMYER-MESHKOV INSTABILITY AT CONTACT BOUNDARIES OF GAS MEDIA OF DIFFERENT DENSITIES WITH SINGLE MODE INITIAL PERTURBATIONS	38
<i>A. A. Tyaktev, A. V. Pavlenko, N. B. Anikin, Yu. A. Piskunov, I. L. Bugaenko</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ ПРИ АБЛЯЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИШЕНИ В ЖИДКОСТЬ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ	38
<i>В. Б. Фокин, П. Р. Левашов, М. Е. Поварницын</i>	
ANALYSIS OF NANOPARTICLES FORMATION BY ABLATION OF A METAL TARGET INTO LIQUID UNDER THE ACTION OF FEMTOSECOND LASER PULSES.	38
<i>V. B. Fokin, P. R. Levashov, M. E. Povarnitsyn</i>	
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО МОДИФИКАЦИИ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ МОЩНЫМИ КВ РАДИОВОЛНАМИ	39
<i>В. Л. Фролов</i>	
EXPERIMENTAL RESULTS ON MODIFICATION OF THE EARTH IONOSPHERE BY HIGH-POWER SHORT WAVES	39
<i>V. L. Frolov</i>	
ДЕФОРМАЦИОННЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ СХОДЯЩИХСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЗРЫВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК	40
<i>А. Э. Хейфец, В. И. Зельдович, Н. Ю. Фролова, И. В. Хомская, А. А. Дегтярев, Е. В. Шорохов, Е. Б. Смирнов, С. М. Долгих, А. В. Коваль</i>	
DEFORMATION MECHANISMS OF STABILITY LOSS OF THE METAL CYLINDRICAL SHELLS, CONVERGING UNDER THE EXPLOSION ACTION	40
<i>A. E. Kheifets, V. I. Zel'dovich, N. Yu. Frolova, I. V. Khomskaaya, A. A. Degtyarev, E. V. Shorokhov, E. B. Smirnov, S. M. Dolgikh, A. V. Koval</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ БАЗА ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ	41
<i>А. Б. Буянов, С. В. Воеводин, В. С. Корчиков, А. В. Лимонов, Р. В. Нечайкин, А. В. Перминов, А. А. Тренькин, П. А. Цицилин</i>	
EXPERIMENTAL CAPABILITIES FOR LABORATORY SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN NEAR-EARTH SPACE	41
<i>A. B. Buyanov, S. V. Voyevodin, V. S. Korchikov, A. V. Limonov, P. V. Nechaykin, A. V. Perminov, A. A. Tren'kin, P. A. Tsitsilin</i>	

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ НИЗКИХ (10^2 – 10^3) ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА	41
<i>О. Е. Шестаченко, А. В. Павленко, Е. В. Свиридов, А. М. Андреев</i>	
EXPERIMENTAL INVESTIGATION INTO THE EVOLUTION OF SINUSOIDAL PERTURBATIONS AT LOW REYNOLDS NUMBERS (10^2 – 10^3)	42
<i>A. V. Pavlenko, O. E. Shestachenko, E. V. Sviridov, A. M. Andreev</i>	
ИЗМЕРЕНИЯ УДЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСА ОТДАЧИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫЕ АСТЕРОИДЫ	42
<i>И. Н. Бурдонский, А. Г. Леонов, К. Н. Макаров, В. Н. Юфа</i>	
MEASUREMENT OF THE SPECIFIC RECOIL MOMENTUM TO SIMULATE THE EFFECTS OF LASER RADIATION EXPOSURE ON POTENTIALLY DANGEROUS ASTEROIDS	42
<i>I. N. Burdonsky, A. G. Leonov, K. N. Makarov, V. N. Yufa</i>	
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОВЛИЯНИЯ ЗОНЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ И ЛОКАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА В ЗАДАЧЕ ГРАВИТАЦИОННОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ	43
<i>Ю. В. Янилкин</i>	
NUMERICAL STUDY OF TURBULENT MIXING ZONE INTERACTION WITH LOCAL PERTURBATIONS OF INTERFACE IN A PROBLEM OF GRAVITATION TURBULENT MIXING	43
<i>Yu. V. Yanilkin</i>	
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАЧАЛЬНОГО СПЕКТРА ВОЗМУЩЕНИЙ НА РАЗВИТИЕ ГРАВИТАЦИОННОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ	43
<i>О. Г. Синькова, В. П. Стаценко, Ю. В. Янилкин</i>	
NUMERICAL STUDY OF PERTURBATION INITIAL SPECTRUM INFLUENCE ON THE DEVELOPMENT OF GRAVITATION TURBULENT MIXING	44
<i>O. G. Sinkova, V. P. Statsenko, Yu. V. Yanilkin</i>	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛИГОННОЙ УСТАНОВКИ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ЦЕНТРА РФЯЦ – ВНИИТФ ВНИЦ (г. ИСТРА) ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА СТОЙКОСТЬ К ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИМПУЛЬСАМ НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА	44
<i>Н. Н. Швеи, Ю. А. Кузнецов, В. С. Сысоев, Н. М. Лепехин</i>	
Секция 2	
ВЗРЫВНЫЕ И ДЕТОНАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ	
Section 2	
EXPLOSION AND DETONATION PHENOMENA	
ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНИЦИИРОВАНИЯ ПЛАСТИЧНОГО ВВ НА ОСНОВЕ ТАТБ ПОСЛЕ УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ, СОЗДАННОГО ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ДЕТОНАТОРОМ ПЛАСТИЧНОГО ВВ НА ОСНОВЕ ГЕКСОГЕНА	47
<i>Дуань Инлянь, Хань Юнь, Лю Жуй, Жань Цзянлун, Цзань Цзичао</i>	
INITIATION CHARACTERISTICS OF TATB-BASED PBX SHOCKED BY RDX-BASED PBX BOOSTER	47
<i>Duan Yingliang, Han Yong, Liu Rui, Ran Jianglong, Zan Jichao</i>	
ПРОЦЕСС/ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕФЛАГРАЦИИ ВВ НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА И ВЛИЯНИЕ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛОВЫХ ВЗРЫВОВ	47
<i>Яо Куйгуан, Дай Сяогань, Вэнь Вэнь, Сян Юнь</i>	
DEFLAGRATION BEHAVIOR OF HMX-BASED EXPLOSIVES AND EFFECTS ON THE VIOLENCE OF THERMAL EXPLOSIONS	48
<i>Yao Kuiguang, Dai Xiaogan, Wen Wen and Xiang Yong</i>	
РЕВИЗИЯ МЕХАНИЗМА ДЕТОНАЦИИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПО TARVER	48
<i>В. Ф. Анисичкин</i>	
THE REVISION OF TARVER'S HIGH EXPLOSIVE DETONATION MECHANISM	48
<i>V. F. Anisichkin</i>	

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ВНЕДРЕМОЙ ЧАСТИ СТЕРЖНЯ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВВ К МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ	49
<i>И. А. Ахлюстин, К. М. Просвирнин, К. М. Мирошкин, И. Э. Косолапов, Ю. А. Беленовский, А. В. Сарафанников, О. В. Костицын</i>	
EFFECT OF THE ROD'S INTRUDED PART SHAPE ON THE HIGH EXPLOSIVE SENSITIVITY TO THE MECHANICAL ACTIONS	49
<i>I. A. Akhlustin, K. M. Prosvirnin, K. M. Miroshkin, I. E. Kosolapov, Yu. A. Belenovskiy, A. V. Sarafannikov, O. V. Kostitsyn</i>	
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ	49
<i>В. Я. Базотов, Н. А. Кирюшченкова, Т. Н. Исхаков, Л. Х. Бадретдинова</i>	
ELECTROMECHANICAL INITIATION ENERGY SATURATED MATERIALS	50
<i>V. Ya. Bazotov, N. A. Kiryushchenkova, T. N. Iskhakov, L. Kh. Badretdinova</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИСПЕРГИРОВАНИЯ СПЛАВА АЛЮМИНИЙ-МАГНИЙ-ГРАФЕН И АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ СВОЙСТВ	50
<i>А. Р. Бакиров, А. В. Станкевич, Н. П. Тайбинов, О. В. Костицын</i>	
STUDYING DISPERSION OF THE ALUMINIUM-MAGNESIUM-GRAPHENE ALLOY AND ANALYSIS OF PROPERTY CHANGES	50
<i>A. R. Bakirov, A. V. Stankevich, N. P. Taibinov, O. V. Kostitsyn</i>	
ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СИНТЕЗА НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТАТБ	50
<i>И. А. Баталова, Т. В. Антипова, А. Ю. Гармашев, А. Н. Грецова, А. В. Еганова, О. В. Костицын, Ф. А. Симаков, Н. П. Тайбинов, И. В. Чемагина</i>	
EFFECT OF SYNTHESIS TECHNOLOGY ON PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF TATB	51
<i>I. A. Batalova, T. A. Antipova, A. Yu. Garmashev, A. N. Gretsova, A. V. Eganova, O. V. Kostitsyn, F. A. Simakov, N. P. Taibinov, I. V. Chemagina</i>	
ДИНАМИКА УДАРНЫХ ВОЛН. ДЖ. УИЗЕМ – ШАГ ВПЕРЕД.	51
<i>А. Н. Богданов</i>	
SHOCK-WAVE DYNAMICS. G. V. WHITHAM – A STEP BEYOND PREVIOUS EXPERIENCE	51
<i>А. Н. Богданов</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН НЕСТАБИЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ С КАЛИБРОВАННЫМИ ОБЛИЦОВКАМИ	52
<i>В. М. Фомин, Е. Я. Брагунцов</i>	
STUDYING CAUSES OF UNSTABLE ACTION OF CUMULATIVE CHARGES WITH CALIBRATED LINERS	52
<i>V. M. Fomin, E. Ya. Braguntsov</i>	
2,6-ДИАМИНО-3,5-ДИНИТРОПИРАЗИН-1-ОКСИД И НЕКОТОРЫЕ ЕГО СВОЙСТВА	53
<i>А. А. Васильева, Д. В. Дашко, З. П. Лукичева, В. С. Санников, О. Ф. Яковлева, С. М. Яковлев</i>	
2,6-DIAMINO-3,5-DINITROPYRAZIN-1-OXID AND SOME PROPERTIES	53
<i>A. A. Vasileva, D. V. Dashko, Z. P. Lukicheva, V. S. Sannikov, O. F. Yakovleva, S. M. Yakovlev</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ МОЩНОСТИ ВЗРЫВА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УЗЛОВ, СНАРЯЖЕННЫХ ПОРОШКАМИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ НЕ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ	54
<i>Ю. А. Беленовский, Д. М. Гагаркин, И. Г. Галиуллин, А. Ю. Гармашев, В. Н. Дунаев, О. В. Костицын, А. В. Сарафанников, В. Н. Щербakov</i>	
INVESTIGATION INTO EXPLOSION YIELD OF EXPERIMENTAL ASSEMBLIES CHARGED WITH POW-DERS OF HIGH-ENERGY NON-EXPLOSIVE MATERIALS	54
<i>Yu. A. Belenovskiy, D. M. Gagarkin, I. G. Galiullin, A. Yu. Garmashev, V. N. Dunayev, O. V. Kostitsyn, A. V. Sarafannikov, V. N. Shcherbakov</i>	
ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ НА ПОЛИМОРФНЫЙ ПЕРЕХОД $\alpha \leftrightarrow \beta$ НТО	55
<i>Г. Д. Гарифуллина, В. Я. Базотов</i>	
STUDY OF THE INFLUENCE OF ORGANIC SOLVENTS ON THE POLYMORPHIC TRANSITION $\alpha \leftrightarrow \beta$ NTO	55
<i>G. D. Garifullina, V. Y. Bazotov</i>	

ВЛИЯНИЕ ВТОРИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НА ДЕТОНАЦИОННУЮ СПОСОБНОСТЬ ПРЕССОВАННОГО ВВ НА ОСНОВЕ ТАТБ	56
<i>Д. К. Гильмутдинов, О. В. Костицын, А. В. Сарафанников, Ю. А. Беленовский, К. М. Просвирнин, К. М. Мирошкин, И. А. Ахлюстин, И. Э. Косолапов</i>	
THE INFLUENCE OF REPROCESSING ON DETONABILITY OF PRESSED TATB-BASED EXPLOSIVES	56
<i>D. K. Gilmudinov, O. V. Kostitsyn, A. V. Sarafannikov, Yu. A. Belenovskiy, K. M. Prosvirnin, K. M. Miroshkin, I. A. Akhlyustin, I. E. Kosolapov</i>	
ВЛИЯНИЕ ТЕРМОВЫДЕРЖКИ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТАТБ	56
<i>А. Н. Грецова, О. В. Костицын, Н. П. Тайбинов, И. В. Чемагина, А. В. Станкевич, Д. В. Петров</i>	
EFFECT OF TEMPERATURE EXPOSURE ON PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF TATB	56
<i>A. N. Gretsova, O. V. Kostitsyn, N. P. Taibinov, I. V. Chemagina, A. V. Stankevich, D. V. Petrov</i>	
МЕТАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ КОМБИНИРОВАННЫХ РАЗРЫВНЫХ ЗАРЯДОВ, СОДЕРЖАЩИХ ДИСПЕРСНЫЕ МЕТАЛЛЫ В ТОНКОМ ПЕРИФЕРИЙНОМ СЛОЕ	57
<i>В. Ю. Давыдов, А. С. Губин, М. Н. Терещенко, А. Д. Боднарюк</i>	
ACCELERATION ABILITY OF COMBINED EXPLOSIVE CHARGES, CONTAINING DESPERSED METALS IN THIN PERIPHERAL LAYER	57
<i>V. Y. Davudov, A. S. Goubin, M. N. Tereshenko</i>	
МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОРОШКА АСД-4 ПЕНТОКСИДОМ ВАНАДИЯ	58
<i>В. Г. Шевченко, Д. А. Еселевич, Н. А. Попов, Д. К. Кузнецов, В. Я. Шур</i>	
SURFACE MORPHOLOGY OF THE MODIFIED POWDER ASD-4 BY VANADIUM PENTOXIDE	58
<i>V. G. Shevchenko, D. A. Eselevich, N. A. Popov, D. K. Kuznetsov, V. Ya. Shur</i>	
СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НАНОСТРУКТУР	58
<i>Ю. М. Жуков</i>	
СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НАНОСТРУКТУР	58
<i>Yu. M. Zhukov</i>	
РОЛЬ ФОТОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЛАЗЕРНОМ ИНИЦИИРОВАНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	58
<i>А. С. Зверев, А. Ю. Митрофанов, Р. В. Цышевский, М. М. Кукля</i>	
THE ROLE OF PHOTOCHEMICAL PROCESSES IN ENERGETIC MATERIALS LASER INITIATION	59
<i>A. S. Zverev, A. Y. Mitrofanov, R. V. Tsyshevskiy, M. M. Kuklja</i>	
ПРИРОДА РОСТА ЭНТРОПИИ В УДАРНЫХ И ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛНАХ	59
<i>М. Я. Иванов, В. К. Мамаев, В. Л. Семенов</i>	
THE NATURE OF ENTROPY INCREASE IN SHOCK WAVES	60
<i>M. Ya. Ivanov, V. K. Mamaev, V. L. Semenov</i>	
РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЫТОВ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ СХОЖДЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА АЛЮМИНИЗОВАННОГО ВВ	61
<i>Д. А. Варфоломеев, К. В. Гаан, С. М. Долгих, А. Л. Жеребцов, Н. С. Еськов, П. Е. Кискин, А. Е. Кискин, О. В. Костицын, К. В. Левак</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF THE EXPERIMENTS TO STUDY CONVERGENCE OF THE CYLINDRICAL SHELLS AFFECTED BY THE EXPLOSION PRODUCTS OF THE ALUMINIZED HIGH EXPLOSIVE	61
<i>D. A. Varfolomeev, K. V. Gaan, S. M. Dolgikh, A. L. Zherebtsov, N. S. Es'kov, P. E. Kiskin, A. E. Kiskin, O. V. Kostitsyn, K. V. Levak</i>	
РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЫТОВ ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ ДЕТОНАЦИИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦАХ РАЗЛИЧНОГО ДИАМЕТРА ИЗ НИЗКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ВВ	62
<i>Д. В. Кочутин, А. Л. Жеребцов, Т. Б. Тимофеева, М. А. Мащенко</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF EXPERIMENTS ON THE DETONATION PROPAGATION IN CYLINDRICAL SAMPLES OF LOW-SENSITIVITY HE OF DIFFERENT DIAMETERS	62
<i>D. V. Kochutin, A. L. Zherebtsov, T. B. Tomofeeva, M. A. Mashchenko</i>	

К «ПРЕИМУЩЕСТВАМ» ДЕТОНАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ И ОБ УСТОЙЧИВОСТИ КВАЗИОДНОМЕРНОГО СТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ С ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНОЙ	62
<i>A. N. Kraiko, Kh. F. Valiev, A. D. Egoryan</i>	
ON THE “ADVANTAGES” OF DETONATION COMBUSTION AND THE STABILITY OF QUASI-ONE-DIMENSIONAL STATIONARY FLOW WITH A DETONATION WAVE	63
<i>A. N. Kraiko, Kh. F. Valiev, A. D. Egoryan</i>	
ЗАВИСИМОСТЬ ДЕТОНАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СМЕСЕВЫХ ЛИТЬЕВЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ ОТ СОДЕРЖАНИЯ И СВОЙСТВ КОМПОНЕНТОВ	64
<i>Ю. М. Милёхин, В. Н. Куликов, А. А. Матвеев, А. Н. Осавчук, Н. И. Шихов</i>	
DEPENDENCE OF DETONATION CHARACTERISTICS OF MIXED CAST EXPLOSIVE COMPOSITIONS ON THE CONTENT AND PROPERTIES OF THE COMPONENTS	64
<i>Yu. M. Milekhin, V. N. Kulikov, A. A. Matveev, A. N. Osavchuk, N. I. Shishov</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОДАВЛЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕТОНАЦИИ СУБМИКРОННЫХ ГАЗОВЗВЕСЕЙ АЛЮМИНИЯ ОБЛАКАМИ ИНЕРТНЫХ ЧАСТИЦ	65
<i>С. А. Лаврук</i>	
MODELLING OF THE HETEROGENEOUS DETONATION SUPPRESSION PROCESSES IN SUBMICRON ALUMINIUM SUSPENSION WITH CLOUDS OF INERT PARTICLES	65
<i>S. A. Lavruk</i>	
ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГОРЕНИЯ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ ДИНИТРАТА ЦЕЛЛЮЛОЗЫ И ПЛАСТИФИКАТОРА	66
<i>А. А. Лачугин, А. С. Петров, В. Я. Базотов, А. А. Мокеев, А. А. Марсов</i>	
STUDYING THE REGULARITY OF COMBUSTION COMBUSTION ON THE BASIS OF CELLULOSE DITHITRATE AND PLASTICIZER	66
<i>A. A. Lachugin, A. S. Petrov, V. Ya. Basotov, A. A. Mokeev, A. A. Marsov</i>	
КОМПЛЕКСНОЕ ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ГОРЮЧИХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ	66
<i>В. А. Левин</i>	
COMPLEX THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF COMBUSTIBLE GAS MIXTURES FLOWS	66
<i>V. A. Levin</i>	
СПЕКТРЫ СВЕЧЕНИЯ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВЧАТОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛА ДАДНЭ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОГО ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ	67
<i>И. Ю. Лисков, А. П. Никитин, Н. Н. Ильякова, Б. П. Адуев, А. С. Зверев</i>	
LUMINESCENCE SPECTRA OF THE PRODUCTS OF THE EXPLOSIVE DECOMPOSITION OF A DADNE POLYCRYSTAL WHEN IMPACT TO A PULSED ELECTRON BEAM	67
<i>I. Y. Liskov, A. P. Nikitin, N. N. Ilyakova, A. S. Zverev, B. P. Aduev</i>	
РАДИОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ ДАДНЭ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ	68
<i>И. Ю. Лисков, А. П. Никитин, А. С. Зверев, Б. П. Адуев, Н. Н. Ильякова, Н. В. Нелюбина</i>	
RADIOLUMINESCENCE OF DADNE POLYCRYSTALS UNDER THE IMPACT OF AN ELECTRON BEAM	68
<i>I. Yu. Liskov, A. P. Nikitin, N. N. Iyakov, A. S. Zverev, B. P. Aduev, G. M. Nel</i>	
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И СТРУКТУРЫ ПЛАМЕНИ ПРИ ГОРЕНИИ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ ТОПЛИВ	69
<i>Е. Л. Лобода, М. В. Агафонцев, В. В. Рейно, Ю. А. Лобода</i>	
APPLICATION OF INFRARED THERMOGRAPHY METHODS FOR THE STUDY OF THE COMBUSTION PROCESSES AND THE FLAME STRUCTURE DURING SOME FUEL BURNING	69
<i>E. L. Loboda, M. V. Agafontsev, V. V. Reyno, Yu. A. Loboda</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ	70
<i>Н. Г. Миловзоров, М. В. Лукашова, А. А. Кудрявцев, П. А. Сомов</i>	
STUDY OF COMPLEX OBJECTS BY SCANNING ELECTRON MICROSCOPY	70
<i>N. G. Milovzorov, M. V. Lukashova, A. A. Kudryavtsev, P. A. Somov</i>	

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОСТОЙКОСТИ ЧЕРНОГО И ПИРОКСИЛИНОВОГО ПОРОХА	70
<i>T. V. Antipova, A. N. Zelenov, A. G. Neskin, E. V. Chepurin</i>	
EXPERIMENTAL STUDIES OF THERMAL STABILITY OF BLACK AND PYROXYLIN POWDERS	71
<i>T. V. Antipova, A. N. Zelenov, A. G. Neskin, E. V. Chepurin</i>	
ВЗРЫВЧАТОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ КОМПОЗИТА RDX-AL ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ	71
<i>Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, И. Ю. Лисков, Г. М. Белокуров, Н. В. Нелюбина</i>	
EXPLOSIVE DECOMPOSITION OF RDX-AL COMPOSITE DURING A PULSE LASER EXPOSURE	71
<i>B. P. Aduev, D. R. Nurmukhametov, I. Yu. Liskov, G. M. Belokurov, N. V. Nelyubina</i>	
КОМПЛЕКСНОЕ ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ ЛЬДА	71
<i>В. П. Глазырин, М. Ю. Орлов, Ю. Н. Орлов</i>	
COMPLEX THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY ICE DESTRUCTION UNDER EXPLOSIVE LOAD	72
<i>V. P. Glazyrin, M. Yu. Orlov, Yu. N. Orlov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ КИСЛОТОГЕНЕРИРУЮЩИХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ НИТРАТА АММОНИЯ ОТ ДАВЛЕНИЯ	72
<i>А. С. Петров, А. А. Лачугин, В. Я. Базотов, А. А. Мокеев, А. А. Марсов, Л. Х. Бадретдинова</i>	
STUDY OF THE DEPENDENCE OF THE RATE OF COMBUSTION OF ACID-GENERATING COMPOSITIONS BASED ON AMMONIUM NITRATE AGAINST PRESSURE	73
<i>A. S. Petrov, A. A. Lachugin, V. Ya. Bazotov, A. A. Mokeev, A. A. Marsov, L. Kh. Badretdinova</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В АЛЮМИНИЕВОЙ ПРЕГРАДЕ ОТ ДЕТОНИРУЮЩИХ НИЗКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ВВ НА ОСНОВЕ ТАТБ	73
<i>К. М. Просвирнин, О. В. Костицын, А. В. Сарафанников, Ю. А. Беленовский, К. М. Мирошкин, И. А. Ахлустин, И. Э. Косолапов, Д. К. Гильмутдинов</i>	
INVESTIGATION INTO THE SHOCK WAVE PROPAGATION IN THE ALUMINUM OBSTACLE GENERATED BY THE DETONATING LOW-SENSITIVITY TATB-BASED EXPLOSIVES	73
<i>K. M. Prosvirnin, O. V. Kostitsyn, A. V. Sarafannikov, Yu. A. Belenovskiy, K. M. Miroshkin, I. A. Akhlustin, I. E. Kosolapov, D. K. Gil'mutdinov</i>	
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ КОМПОЗИТЫ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ СОДЕРЖАЩИЕ ОДНОСТЕННЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ	73
<i>Э. Р. Пруэл, А. О. Кашкаров, А. П. Ершов, И. А. Рубцов, Н. П. Сатонкина, К. А. Тен, Г. Р. Дашапилов</i>	
NANOSTRUCTURED HE-BASED COMPOSITES WITH EMBEDDED SINGLE-WALL CARBON NANOTUBES	74
<i>E. R. Prueel, A. O. Kashkarov, A. P. Ershov, I. A. Rubtsov, N. P. Satonkina, K. A. Ten, G. R. Dashapilov</i>	
ПРЕМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ПОРОШКООБРАЗНОГО ОБРАЗЦА ДЛЯ ЕГО ИДЕНТИФИКАЦИИ	75
<i>А. Х. Рудина, О. В. Костицын, Н. П. Тайбинов, И. В. Чемагина, А. В. Станкевич, А. В. Соболевская, А. Н. Грецова</i>	
PHYSICOCHEMICAL METHODS OF POWDERED SAMPLE ANALYSIS AND IDENTIFICATION	75
<i>A. Kh. Rudina, O. V. Kostitsyn, N. P. Taibinov, I. V. Chemagina, A. V. Stankevich, A. V. Sobolevskaya, A. N. Gretsova</i>	
ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ	75
<i>Д. Н. Садовничий, Ю. М. Милехин, С. А. Лопаткин, Т. С. Скрипина, С. А. Малинин, И. Н. Гросс</i>	
IGNITION OF ENERGY CONDENSED SYSTEMS IN A ALTERNATING ELECTRIC FIELD	76
<i>D. N. Sadvnichii, Yu. M. Milekhin, S. A. Lopatkin, T. S. Skripina, S. A. Malinin, I. N. Gross</i>	
РАЗРАБОТКА ЭЛАСТИЧНОГО ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОГО МАТЕРИАЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОРОШКООБРАЗНОГО ЭЛАСТОМЕРА	76
<i>А. С. Сальников, Н. И. Сальникова, Р. Ш. Гарифуллин, В. Я. Базотов</i>	

DEVELOPMENT OF ELASTIC ENERGY SATURATED MATERIAL USING A POWDERED ELASTOMER	77
<i>A. S. Salnikov, N. I. Salnikova, R. Sh. Garifullin, V. Ja. Bazotov</i>	
ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ ОБОЛОЧКИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ПЛОСКИХ ЗАРЯДАХ ИЗ НИЗКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ВВ НА ОСНОВЕ ТАТБ	77
<i>С. М. Долгих, М. А. Соколов, В. Н. Смирнов, Е. Б. Смирнов</i>	
EFFECT OF THE SHELL DYNAMIC RIGIDITY ON THE DETONATION PROPAGATION IN PLANE CHARGES OF LOW-SENSITIVITY TATB-BASED HIGH EXPLOSIVE	77
<i>S. M. Dolgikh, M. A. Sokolov, V. N. Smirnov, E. B. Smirnov</i>	
АНИЗОТРОПНАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ СПЛАВА АЛЮМИНИЙ-МАГНИЙ-ГРАФЕН	78
<i>А. В. Станкевич, О. В. Костицын, Н. П. Тайбинов, А. Ю. Гармашев</i>	
ANISOTROPIC THERMAL DEFORMATION OF THE ALLOY THE ALUMINIUM-MAGNESIUM-GRAPHENE	78
<i>A. V. Stankevich, O. V. Kostitsyn, N. P. Taibinov, A. Yu. Garmashev</i>	
ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ГОРЮЧИМ ГАЗОВЫМ ПУЗЫРЕМ	78
<i>О. Г. Сутырин, П. Ю. Георгиевский, В. А. Левин</i>	
DETONATION INITIATION UPON INTERACTION OF A SHOCK WITH COMBUSTIBLE GAS BUBBLE	79
<i>O. G. Sutyurin, P. Yu. Georgievskiy, V. A. Levin</i>	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ТОНКИХ ПРЕГРАД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ РАЗЛОЖЕНИЯ ВВ ВЕЛИЗИ ФРОНТА ДЕТОНАЦИИ	79
<i>В. И. Таржанов, А. В. Воробьев, А. Н. Еськов, Д. П. Кучко, М. А. Ральников, Р. В. Комаров</i>	
USING METHOD OF THIN BARRIERS FOR INVESTIGATION OF THE DECOMPOSITION KINETICS NEAR DETONATION FRONT	80
<i>V. I. Tarzhanov, A. V. Vorobyev, A. N. Eskov, D. P. Kuchko, M. A. Ralnikov, R. V. Komarov</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕТОНАЦИИ В СУБМИКРОННЫХ И НАНОДИСПЕРСНЫХ ВЗВЕСЯХ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ	80
<i>Т. А. Хмель, С. А. Лаврук, С. И. Толкачева</i>	
MODELLING OF THE DETONATION PROCESSES IN SUBMICRON AND NANODISPERSE SUSPENSIONS OF ALUMINIUM PARTICLES	80
<i>T. A. Khmel, S. A. Lavruk, S. I. Tolkacheva</i>	
ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НАНОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ АЛЮМИНИЯ, НИКЕЛЯ И МЕДИ НА ТЕРМИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ТАТБ	81
<i>И. В. Чемагина, А. Ю. Гармашев, О. В. Костицын, Н. П. Тайбинов, А. Ю. Тарасов, Т. В. Антипова, Ю. А. Шахторин</i>	
EFFECT OF ADDED NANODISPERSED POWDERS OF ALUMINUM, NICKEL, AND COPPER ON THERMAL DECOMPOSITION OF TATB.	81
<i>I. V. Chemagina, A. Yu. Garmashev, O. V. Kostitsyn, N. P. Taibinov, A. Yu. Tarasov, T. V. Antipova, Yu. A. Shakhatorin</i>	
ОКИСЛЕНИЕ ПОРОШКА АСД-4, МОДИФИЦИРОВАННОГО ФОРМИАТАМИ Mn, Fe, Co, Ni, Cu	81
<i>В. Г. Шевченко, В. Н. Красильников, Д. А. Еселевич, А. В. Конюкова</i>	
OXIDATION OF ASD-4 POWDER MODIFIED BY FORMATE Mn, Fe, Co, Ni, Cu	82
<i>V. G. Shevchenko, V. N. Krasilnikov, D. A. Eselevich, A. V. Konyukova</i>	
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДА К ДЕТОНАЦИИ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ОПЫТАХ НА УСТАНОВКЕ HTCF	82
<i>О. Г. Синькова, В. П. Стаценко, Ю. В. Янилкин</i>	
NUMERICAL INVESTIGATION INTO THE DETONATION TRANSITION OF THE HYDROGEN-AIR MIXTURE IN THE EXPERIMENTS USING HTCF	82
<i>O. G. Sin'kova, V. P. Statsenko, Yu. V. Yanilkin</i>	

Секция 3 ЯВЛЕНИЯ В ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ

Section 3 DENSE PLASMA PHENOMENA

ПРОСТРАНСТВЕННО-ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ МОДЕЛЬ ФИЗИЧЕСКОГО ВАКУУМА И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЕ К ПРОБЛЕМЕ МАГНИТНЫХ ЗАРЯДОВ	85
<i>A. M. Marennyy, M. V. Astafurova, V. I. Astafurov</i>	
THE SPACE-ELECTROMAGNETIC MODEL OF THE PHYSICAL VACUUM AND ITS APPLICATION TO THE PROBLEM OF MAGNETIC CHARGES	85
<i>A. M. Marennyy, M. V. Astafurova, V. I. Astafurov</i>	
РАСЧЕТЫ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ УСТРОЙСТВ ТИПА ALT ДЛЯ БЕЗУДАРНОГО СЖАТИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МАГНИТНОЙ ИМПЛОЗИИ ЛАЙНЕРОВ	86
<i>A. M. Buiyko, G. G. Ivanova, I. V. Morozova</i>	
SIMULATIONS OF ALT-LIKE EXPLOSIVE MAGNETIC SYSTEMS FOR RAMP COMPRESSION OF MATERIALS BY MAGNETICALLY IMPLoded LINERS	86
<i>A. M. Buiyko, G. G. Ivanova, I. V. Morozova</i>	
УСКОРЕНИЕ ИОНОВ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ДИОДАХ С МАГНИТНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ И ИНДУКЦИОННЫХ УСКОРИТЕЛЯХ С БЫСТРО НАРАСТАЮЩИМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ	86
<i>E. D. Vovchenko, K. I. Kozlovskii, A. E. Shikanov, A. A. Isaev, A. A. Plekhanov</i>	
THE ACCELERATION OF IONS OF A LASER PLASMA IN THE DIODE WITH MAGNETIC INSULATION AND INDUCTION ACCELERATORS WITH A HIGH-SPEED MAGNETIC FIELD	87
<i>E. D. Vovchenko, K. I. Kozlovskii, A. E. Shikanov, A. A. Isaev, A. A. Plekhanov</i>	
ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПИКОСЕКУНДНЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИШЕНЬЮ	87
<i>N. B. Volkov, S. V. Barakhvostov, A. I. Lipchak, S. I. Tkachenko, A. P. Yalovets</i>	
PECULIARITIES OF INTERACTION OF PICOSECOND RELATIVISTIC ELECTRON BEAMS WITH A METALLIC TARGET	88
<i>N. B. Volkov, S. V. Barakhvostov, A. I. Lipchak, S. I. Tkachenko, A. P. Yalovets</i>	
ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ И ВРЕМЕННЫХ МАСШТАБОВ В КОРОНЕ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРА С ПЛАЗМОЙ	88
<i>S. I. Glazyrin, A. V. Brantov, V. Yu. Bychenkov</i>	
INFLUENCE OF SPATIAL AND TEMPORAL SCALES OF LASER CORONA ON LASER-PLASMA INTERACTION	89
<i>S. I. Glazyrin, A. V. Brantov, V. Yu. Bychenkov</i>	
ОБ ИМПЕДАНСНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ РАЗЛЕТА ГОРЯЧЕЙ БЕССТОЛКОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ	89
<i>V. M. Gubchenko</i>	
ON IMPEDANCE PRESENTATION OF HOT COLLISIONLESS PLASMA EXPANSION RELATIVE ELECTRODYNAMICAL ELEMENTS	90
<i>V. M. Gubchenko</i>	
СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ВКЛАДЫВАЕМОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЗАГОРАНИЯ МИШЕНЕЙ ТЯЖЕЛОИОННОГО СИНТЕЗА	91
<i>G. V. Dolgoleva</i>	
WAYS TO REDUCE THE ENERGY INVESTED TO IGNITE TARGETS FOR HEAVY ION SYNTHESIS	91
<i>G. V. Dolgoleva</i>	
ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ В СХЕМЕ СО СЖАТИЕМ ЗАМАГНИЧЕННОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ТОКОМ ВЗРЫВОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА	92
<i>S. G. Garanin, A. V. Ivanovskiy, S. M. Kulikov, V. I. Mamyshev, S. N. Pevnyy, V. G. Rogachev</i>	
NUCLEAR FUSION IN THE SCHEME WITH MAGNETIZED LASER PLASMA COMPRESSION BY MAGNETIC EXPLOSION GENERATOR CURRENT	92
<i>S. G. Garanin, A. V. Ivanovskiy, S. M. Kulikov, V. I. Mamyshev, S. N. Pevnyy, V. G. Rogachev</i>	

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ИОНИЗАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА СТАДИИ ЗАПАЗДЫВАНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО СУБНАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЯДА В АЗОТЕ ПРИ ДАВЛЕНИИ 40 АТМ	92
<i>С. Н. Иванов, В. А. Шкляев, А. А. Гришков, В. В. Лисенков</i>	
STUDY OF THE WAVE IONIZATION PROCESSES AT THE DELAY STAGE OF THE SELF-SUSTAINED SUBNANOSECOND DISCHARGE IN 40 ATM NITROGEN	93
<i>S. N. Ivanov, V. A. Shklyayev, A. A. Grishkov, V. V. Lisenkov</i>	
ФЛУКТУАЦИОННО-ДИССИПАТИВНАЯ ТЕОРЕМА И ДИНАМИЧЕСКИЙ СТРУКТУРНЫЙ ФАКТОР ДЛЯ АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ	93
<i>С. В. Ивлиев</i>	
FLUCTUATION-DISSIPATION THEOREM AND DYNAMIC STRUCTURE FACTOR FOR ANISOTROPIC MEDIUM	94
<i>S. V. Ivliev</i>	
ПРОБЛЕМА КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ УРАНА	95
<i>И. Л. Иосилевский, В. К. Грязнов</i>	
URANIUM CRITICAL POINT LOCATION PROBLEM	95
<i>I. Iosilevskiy, V. Gryaznov</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛОКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ОДНОМЕРНЫХ РАСЧЕТАХ МИШЕНЕЙ ПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ	95
<i>Н. Г. Карлыханов, В. А. Лыков</i>	
SIMULATION OF NON-LOCAL ELECTRON HEAT TRANSFER IN ONE-DIMENSIONAL CALCULATIONS OF DIRECT-DRIVE TARGETS	96
<i>N. G. Karlykhanov, V. A. Lykov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ ЛИНЗЫ С ИНИЦИАЦИЕЙ РАЗРЯДА ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ	96
<i>А. А. Дроздовский, П. В. Сасоров, А. В. Богданов, Р. О. Гаврилин, С. А. Дроздовский, М. А. Карпов, А. В. Канцырев, Н. А. Клеопова, В. А. Панюшкин, И. В. Рудской, С. М. Савин</i>	
THE OBSERVATION OF PLASMA LENS WITH DISCHARGE INITIATION BY THE ELECTRON BEAM	97
<i>А. А. Drozdovsky, P. V. Sasorov, A. V. Bogdanov, R. O. Gavrilin, S. A. Drozdovsky, M. A. Karpov, A. V. Kantsyrev, N. A. Kleopova, V. A. Panyushkin, I. V. Roudskoy, S. M. Savin</i>	
ИСТОЧНИК МЕГААМПЕРНОГО ТОКА С ВРЕМЕНЕМ НАРАСТАНИЯ ~100 нс НА БАЗЕ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ	97
<i>А. А. Базанов, Е. И. Бочков, П. В. Дудай, А. А. Зименков, А. В. Ивановский, А. И. Краев, В. Б. Куделькин, В. И. Мамышев, С. М. Полюшко, Е. В. Шаповалов</i>	
THE SOURCE OF MEGAMPERE CURRENT WITH RISE TIME OF ~100 ns ON THE BASIS OF MAGNETIC EXPLOSION GENERATORS	98
<i>А. А. Bazanov, E. I. Bochkov, P. V. Duday, A. A. Zimenkov, A. V. Ivanovsky, A. I. Kraev, V. B. Kudelkin, V. I. Matyshev, S. M. Polyushko, E. V. Shapovalov</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗЭНТРОПИЧЕСКОГО СЖАТИЯ АЛЮМИНИЯ ПРИ МАГНИТНОЙ ИМПЛОЗИИ ЛАЙНЕРОВ В УСТРОЙСТВАХ ALT-1-3	98
<i>А. М. Буйко, С. Ф. Гаранин, М. А. Десятникова, Г. Г. Иванова, В. А. Карепов, С. Д. Кузнецов, В. Б. Якубов</i>	
SIMULATION OF ISENTROPIC COMPRESSION OF ALUMINUM BY MAGNETICALLY IMPLoded LINERS IN EXPERIMENTS ALT-1-3	99
<i>А. М. Buiyko, S. F. Garanin, M. A. Desyatnikova, G. G. Ivanova, V. A. Karepov, S. D. Kuznetsov, V. B. Yakubov</i>	
ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ БЫСТРЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ В СФЕРИЧЕСКОЙ МИШЕНИ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА ПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ	99
<i>С. Ю. Гуськов, Н. В. Змитренко, П. А. Кучугов, Р. А. Яхин</i>	
PECULIARITIES OF ENERGY TRANSFER BY FAST ELECTRONS IN THE DIRECT-DRIVEN SPHERICAL TARGET OF LASER THERMONUCLEAR FUSION	100
<i>S. Yu. Gus'kov, N. V. Zmitrenko, P. A. Kuchugov, R. A. Yakhin</i>	

НАРУШЕНИЕ РАДИОАКТИВНОГО РАВНОВЕСИЯ МЕЖДУ ИЗОМЕРАМИ ЯДРА ^{186}Re В УСЛОВИЯХ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ УСТАНОВКИ «ИСКРА-5»	100
<i>A. A. Es'man, M. A. Kulikov, D. E. Larin, G. V. Tachaev</i>	
RADIOACTIVE IMBALANCE BETWEEN ISOMERS OF NUCLEUS ^{186}Re IN LASER PLASMA CONDITIONS AT THE LASER FACILITY "ISKRA-5"	100
<i>A. A. Yes'tan, M. A. Kulikov, D. E. Larin, G. V. Tachaev</i>	
О СУЩЕСТВОВАНИИ ЛАЗЕРНОГО ЭФФЕКТА В НЕБУЛЯРНОЙ ПЛАЗМЕ	101
<i>П. А. Лобода</i>	
ON THE OCCURRENCE OF LASER ACTION IN NEBULAR PLASMAS	101
<i>P. A. Loboda</i>	
ОДНОМЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ ЗАПАСОВ ПО ЗАЖИГАНИЮ МИШЕНЕЙ ПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ ДЛЯ МЕГАДЖОУЛЬНЫХ УСТАНОВОК С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 0,35 мкм И 0,53 мкм	102
<i>В. А. Лыков, Е. С. Бакуркина, Н. Г. Карлыханов, Г. Н. Рыкованов, И. А. Химич, В. Е. Черняков</i>	
1D-CALCULATIONS OF IGNITION MARGINS OF DIRECT-DRIVE TARGETS FOR MEGAJOULE FACILITIES WITH LASER WAVELENGTH OF 0.35 μm AND 0.53 μm	102
<i>V. A. Lykov, E. S. Bakurkina, V. E. Chernyakov, N. G. Karlykhanov, I. A. Khimich and G. N. Rykovanov</i>	
КИЛЬВАТЕРНОЕ УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ СТЕКЛЯННОГО КАПИЛЛЯРА	103
<i>К. С. Назаров, И. В. Глазырин, О. Г. Котова</i>	
WAKEFIELD ACCELERATION OF ELECTRONS FROM GLASS CAPILLARY	103
<i>K. S. Nazarov, I. V. Glazyrin, O. G. Kotova</i>	
РАСЧЕТЫ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОГЛОЩЕНИЯ ФОТОНОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ИОНИЗАЦИОННОГО РАВНОВЕСИЯ ПЛАЗМЫ	104
<i>A. A. Ovechkin, P. A. Loboda, E. Yu. Akulinina, M. E. Berезовская, В. В. Попова, А. С. Королёв, С. В. Кольчугин</i>	
OPACITY CALCULATIONS USING CHEMICAL-PICTURE-BASED PLASMA MODEL	104
<i>A. A. Ovechkin, P. A. Loboda, E. Yu. Akulinina, M. E. Berезovskaya, V. V. Popova, A. S. Korolev, S. V. Kolchugin</i>	
СВЕРХИНТЕНСИВНОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПЕТАВАТТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ – ГЕНЕРАЦИЯ, РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ РАДИАЦИОННО-ВОЗБУЖДАЕМОГО И ПЛОТНОГО НАГРЕТОГО ВЕЩЕСТВА	104
<i>С. А. Пикюз</i>	
ULTRA-INTENSE X-RAYS IN PW LASER PLASMA – GENERATION, TRANSPORT AND APPLICATION TO STUDY RADIATION DOMINATED AND WARM DENSE MATTER	105
<i>S. A. Pikuz</i>	
ФРАКТАЛЫ И ТЕКСТУРЫ В РАДИОФИЗИКЕ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ: 40 ЛЕТ НАУЧНЫХ РАЗРАБОТОК	105
<i>А. А. Потапов</i>	
FRACTALS AND TEXTURES IN RADIO PHYSICS AND RADIO ELECTRONICS: 40 YEARS OF RESEARCH AND DEVELOPMENT	106
<i>А. А. Potapov</i>	
ЭФФЕКТЫ КУЛОНОВСКОЙ НЕИДЕАЛЬНОСТИ В ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ	107
<i>А. Д. Рахель</i>	
EFFECTS OF COULOMB COUPLING IN DENSE PLASMAS	107
<i>A. D. Rakhel</i>	
УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ СТИРОЛА В ОБЛАСТИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ И ТЕМПЕРАТУР	107
<i>А. А. Рыкунов, М. А. Воробьева</i>	
AN EQUATION OF STATE FOR STYRENE UNDER HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES	108
<i>A. A. Rykunov, M. A. Vorobyova</i>	

СВЕРХБЫСТРЫЙ ВЗРЫВ СКИН-СЛОЯ ПРИ СКОРОСТИ НАРАСТАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПРОВОДНИКА БОЛЕЕ 4 МГс/нс	108
<i>С. А. Сорокин</i>	
ULTRAFAST SKIN LAYER EXPLOSION AT SURFACE MAGNETIC FIELD RISE RATES OF MORE THAN 4 MG/ns	108
<i>S. A. Sorokin</i>	
ФОРМИРОВАНИЕ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КОНФИГУРАЦИИ СО СТЕРЖНЕВЫМ ПИНЧ-ДИОДОМ, ЗАКОРОЧЕННЫМ НАБОРОМ ПРОВОЛОЧЕК	109
<i>С. А. Сорокин</i>	
FORMATION OF A POINT-LIKE HARD X-RAY SOURCE IN A CONFIGURATION WITH A ROD-PINCH DIODE, SHORT-CIRCUITED WITH A WIRE ARRAY	109
<i>S. A. Sorokin</i>	
РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ ЛАВИНО-СТРИМЕРНОГО РАЗРЯДА	109
<i>В. С. Сысоев, Ю. А. Кузнецов, Д. И. Сухаревский, М. Ю. Наумова, Н. М. Лепёхин, Л. М. Макальский, А. В. Кухно</i>	
RADIO EMISSION OF AVALANCHE-STREAMER DISCHARGE	110
<i>V. S. Sysoev, Yu. A. Kuznetsov, D. I. Sukharevsky, M. Yu. Naumova, N. M. Lepikhin, L. M. Makalsky, A. V. Kikhno</i>	
РАСЧЕТЫ ГЕНЕРАЦИИ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВНУТРИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ХОЛЬРАУМА, ПРОВЕДЕННЫЕ ПО ПРОГРАММЕ СИНАРА ДЛЯ УСЛОВИЙ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ NIF	110
<i>Д. В. Торшин, С. Н. Лебедев, В. А. Лыков, В. В. Рыкованова, В. Н. Селезнев, К. И. Селезнева</i>	
CALCULATIONS OF RADIATION GENERATION AND PROPAGATION INSIDE THE CYLINDRICAL HOHLRAUM PERFORMED WITH THE SINARA CODE PACKAGE FOR THE EXPERIMENTAL CONDITIONS OF THE NATIONAL IGNITION FACILITY (NIF)	111
<i>D. V. Torshin, S. N. Lebedev, V. A. Lykov, V. V. Rykovanova, V. N. Seleznev, K. I. Selezneva</i>	
ПРИМЕНЕНИЕ ПСЕВДОАТОМНОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ К ИССЛЕДОВАНИЮ ТРАНСПОРТНЫХ СВОЙСТВ СИЛЬНОНЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ	111
<i>А. Л. Фальков, А. А. Овечкин, П. А. Лобода</i>	
APPLICATION OF PSEUDOATOMIC MOLECULAR DYNAMICS METHOD FOR IONIC TRANSPORT COEFFICIENTS RESEARCH	112
<i>A. L. Falkov, A. A. Ovechkin, P. A. Loboda</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ПУЧКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В ГАЗОВЫХ СТРУЯХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ	112
<i>В. А. Флегентов, К. В. Сафронов, С. А. Горохов, А. С. Тищенко, Д. О. Замураев, А. Л. Шамраев, С. Ф. Ковалева, Д. С. Гаврилов</i>	
EXPERIMENTAL INVESTIGATION ULTRAINTENSE LASER-DRIVEN RELATIVISTIC ELECTRON BUNCH GENERATION IN GAS JET TARGETS	112
<i>V. A. Flegentov, K. V. Safronov, S. A. Gorokhov, A. S. Tischenko, D. O. Zamuraev, A. L. Shamraev, S. F. Kovaleva, D. S. Gavrilov</i>	
ВЛИЯНИЕ ПЕРЕКАЧКИ ЭНЕРГИИ В ПЕРЕСЕКАЮЩИХСЯ ПУЧКАХ НА ПОГЛОЩЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КОРОНЕ МИШЕНЕЙ ПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ	113
<i>И. А. Химич, Н. Г. Карлыханов, В. А. Лыков, Г. Н. Рыкованов</i>	
INFLUENCE OF CROSS-BEAM ENERGY TRANSFER ON LASER RADIATION ABSORPTION IN A CORONA OF DIRECT DRIVEN TARGETS	113
<i>I. A. Khimich, N. G. Karlykhanov, V. A. Lykov, G. N. Rykovanov</i>	
РАЗРУШЕНИЕ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК МОЩНЫМИ ТЕРАГЕРЦОВЫМИ ИМПУЛЬСАМИ	114
<i>О. В. Чефонов, А. В. Овчинников, С. И. Ашитков, С. А. Евлашин, П. С. Кондратенко, М. Б. Агранат, В. Е. Фортвов</i>	
DAMAGE OF THIN METAL FILMS BY HIGH-POWER TERAHERTZ PULSES	114
<i>O. V. Chefonov, A. V. Ovchinnikov, S. I. Ashitkov, S. A. Evlashin, P. S. Kondratenko, M. B. Agranat, V. E. Fortov</i>	

ТОЧЕЧНЫЕ ПОТЕНЦИАЛЫ В КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ	114
<i>A. S. Chikhachev</i>	
POINT POTENTIAL IN QUANTUM MECHANICS	115
<i>A. S. Chikhachev</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ПЛОТНОГО ГАЗА ИНТЕНСИВНЫМ ПОТОКОМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	115
<i>A. П. Яловец</i>	
SIMULATION OF SOLID GAS HEATING BY HIGH RADIATION LASER FLUX	115
<i>A. P. Yalovets</i>	

Секция 4

СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ПРОЦЕССАХ

Section 4

PROPERTIES OF MATTER AT HIGH-INTENSITY PROCESSES

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И КИНЕТИКИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ЖЕЛЕЗА	119
<i>Цзидун Юй, Хуэй Пэн, Сяоян Пэй, Цян У</i>	
INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE ON PHASE TRANSITION KINETICS OF IRON	119
<i>Jidong Yu, Hui Peng, Xiaoyang Pei, Songlin Yao, Qiang Wu</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ МЕТАЛЛОВ ОЦК ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ	119
<i>С. Л. Яо, С. Й. Пэй, Цз. Д. Юй, Й. Й. Юй, Ц. У</i>	
INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE DYNAMIC YIELD STRESS OF BCC METALS SUBJECTED TO SHOCK LOADING	120
<i>S. L. Yao, X. Y. Pei, J. D. Yu, Y. Y. Yu, Q. Wu</i>	
ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕДИ И СПЛАВОВ МЕДИ С СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ, ПОЛУЧЕННОЙ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ	120
<i>Д. Н. Абдуллина, И. В. Хомская, С. В. Разоренов, Е. В. Шорохов, Г. В. Гаркушин</i>	
THE DYNAMIC PROPERTIES OF COPPER AND COPPER ALLOYS WITH SUBMICROCRYSTALLINE STRUCTURE OBTAINED BY HIGH SPEED DEFORMATION	121
<i>D. N. Abdullina, I. V. Khomskaya, S. V. Razorenov, E. V. Shorokhov, G. V. Garkushin</i>	
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР ОТ +20°C ДО +100°C	121
<i>А. П. Бекетов, А. Н. Ефанов, М. В. Никольшин, О. С. Путилин</i>	
RESEARCH OF MECHANICAL PROPERTIES OF AN EXPLOSIVE WITHIN A TEMPERATURE RANGE FROM 20°C TO 100°C	121
<i>A. P. Beketov, A. N. Efanov, M. V. Nikulshin, O. S. Putilin</i>	
УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ СНОН ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ	122
<i>М. А. Бирюкова, Д. В. Петров, А. Ю. Гармашев, А. К. Музыря, Ю. М. Ковалёв, Е. Б. Смирнов, А. В. Станкевич, Е. С. Шестаковская, Л. Х. Бадретдинова</i>	
THE EQUATION OF STATE FOR СНОН EXPLOSIVES	122
<i>M. A. Biryukova, D. V. Petrov, A. Yu. Garmashev, A. K. Muzyrya, Yu. M. Kovalyov, E. B. Smirnov, A. V. Stankevich, E. S. Shestakovskaya, L. H. Badretdinova</i>	
СВЯЗЬ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАТРИЯ С КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРОЙ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ	122
<i>Н. Б. Волков, Е. А. Чингина</i>	
THE RELATION OF THE SODIUM PHYSICAL PROPERTIES WITH CRYSTALLINE AND ELECTRONIC STRUCTURE AT HIGH PRESSURES	123
<i>N. B. Volkov, E. A. Chingina</i>	

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОР ПО РАЗМЕРАМ В АЛЮМИНИИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ РАСТЯЖЕНИИ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ	123
<i>Д. С. Воронин, А. Е. Майер, В. С. Красников</i>	
INVESTIGATION OF THE PORE SIZE DISTRIBUTION IN ALUMINUM UNDER HIGH-RATE TENSION BY THE MOLECULAR DYNAMICS METHOD.	124
<i>D. S. Voronin, A. E. Mayer and V. S. Krasnikov</i>	
МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ	125
<i>С. Д. Гилев</i>	
FEW-PARAMETER EQUATION OF STATE	125
<i>S. D. Gilev</i>	
ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ МЕДИ ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ: РАВНОВЕСНАЯ МОДЕЛЬ И ГЕНЕРАЦИЯ ДЕФЕКТОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ	125
<i>С. Д. Гилев</i>	
ELECTRICAL RESISTIVITY OF COPPER UNDER SHOCK COMPRESSION: EQUILIBRIUM MODEL AND GENERATION OF CRYSTAL STRUCTURE DEFECTS	126
<i>S. D. Gilev</i>	
СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ПЛАСТИЧНОСТИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В АЛЮМИНИИ	126
<i>Н. А. Грачёва, А. Е. Майер</i>	
COMPARISON OF PLASTICITY MODELS FOR DESCRIPTION SHOCK WAVE PROCESSES IN ALUMINUM	126
<i>N. A. Grachyova, A. E. Mayer</i>	
ПРОЦЕССЫ САМООРГАНИЗАЦИИ И ЭВОЛЮЦИИ МИКРОСТРУКТУРЫ ПРИ СИЛЬНОМ ВНЕШНЕМ ВОЗДЕЙСТВИИ (СВАРКА ВЗРЫВОМ, КРУЧЕНИЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ)	127
<i>Б. А. Гринберг, В. П. Пилюгин, М. С. Пушкин</i>	
PROCESSES OF SELF-ORGANIZATION AND EVOLUTION OF THE MICROSTRUCTURE AT STRONG EXTERNAL ACTION (EXPLOSION WELDING, TORSION UNDER PRESSURE [QUASI-STATIC DEFORMATION TECHNIQUE])	127
<i>B. A. Greenberg, V. P. Pilyugin, M. S. Pushkin</i>	
ЛОКАЛЬНОЕ ПЛАВЛЕНИЕ МЕТАЛЛА В ОБОЛОЧКАХ В ПРОЦЕССЕ ВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ	128
<i>С. Г. Андреев, М. М. Бойко, Е. Ф. Грязнов, В. Ю. Клименко</i>	
LOCAL MELTING OF METAL IN SHELLS IN THE PROCESS OF EXPLOSIVE LOADING	128
<i>S. G. Andreev, M. M. Boyko, E. F. Gryaznov, V. Yu. Klimenko</i>	
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО СЖАТИЯ ВОДОРОДА	128
<i>С. А. Губин, И. В. Маклашова</i>	
THERMODYNAMIC MODELING OF SHOCK COMPRESSED HYDROGEN	129
<i>S. A. Gubin, I. V. Maklashova</i>	
НЕРАВНОПЛЕЧНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР С ЛИНЕЙНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ФИЗИКИ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА НА УСТАНОВКЕ ЛУЧ	129
<i>К. Л. Губский, А. В. Михайлюк, В. Н. Деркач, А. П. Кузнецов, В. В. Алексеев</i>	
LINE IMAGE VELOCIMETER FOR SHOCK EXPERIMENTS AT LUCH LASER FACILITY	130
<i>K. L. Gubskiy, A. V. Mikhailyuk, V. N. Derkach, A. P. Kuznetsov, V. V. Alekseev</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ СДВИГОВОЙ ПРОЧНОСТИ БЕРИЛЛИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ	130
<i>В. К. Баранов, А. М. Глыбин, П. В. Дудай, А. В. Ивановский, Д. А. Ирничев, А. А. Зименков, А. И. Краев, С. С. Надежин</i>	
STUDY OF SHEAR STRENGTH OF BERYLLIUM WITH THE USE OF EXPLOSIVE MAGNETIC GENERATORS	130
<i>V. K. Baranov, A. M. Glybin, P. V. Duday, A. V. Ivanovsky, D. A. Irinichev, A. A. Zimenkov, A. I. Krayev, S. S. Nadezhin</i>	

КОНТИНУАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ КАРБИДА БОРА И СТАЛИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ВЗРЫВНОМУ ОБЖАТИЮ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК	131
<i>С. А. Дьячков, С. Ю. Григорьев, В. В. Жаховский, А. Н. Паршиков</i>	
THE MODELS OF BORON CARBIDE AND STEEL FOR SIMULATIONS OF EXPERIMENTS ON EXPLOSIVE COMPRESSION OF SPHERICAL SHELLS USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS	131
<i>S. A. Dyachkov, S. Yu. Grigoryev, V. V. Zhakhovsky, A. N. Parshikov</i>	
РАСЧЕТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ ПО МЕТОДУ ЭФФЕКТИВНОГО ПОТЕНЦИАЛА МЕЖАТОМНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ, ЗАВИСЯЩЕГО ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ	131
<i>Д. А. Емелин, А. А. Рыкунов</i>	
CALCULATION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF METALS WITH THE TEMPERATURE DEPENDENT EFFECTIVE POTENTIAL METHOD	132
<i>D. A. Emelin, A. A. Rykounov</i>	
РЕГИСТРАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СХОЖДЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ И СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК МЕТОДОМ МНОГОКАНАЛЬНОГО ГЕТЕРОДИН-ИНТЕРФЕРОМЕТРА	132
<i>Д. А. Калашиников, А. В. Федоров, С. А. Финюшин, Е. А. Чудаков, И. В. Шмелев, И. С. Гнатов, Л. К. Антонюк, А. О. Яговкин, М. В. Жерноклетов, А. В. Дергунов, М. П. Калинин, М. Ю. Батюков</i>	
REGISTRATION OF CYLINDRICAL AND SPHERICAL SHELLS CONVERGENCE PARAMETERS WITH MULTICHANNEL PDV SYSTEM	133
<i>D. A. Kalashnikov, A. V. Fedorov, S. A. Finyushin, E. A. Chudakov, I. V. Shmelev, I. S. Gnatov, L. K. Antoniuk, A. O. Iagovkin, M. V. Zhernokletov, A. V. Dergunov, M. P. Kalinin, M. U. Batkov</i>	
ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ НА ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЯ	133
<i>А. И. Киселёв, В. Г. Шевченко, Н. А. Попов, Л. А. Акашев</i>	
EFFECT OF DISPERSION ON ELECTRONIC PROPERTIES OF ALUMINUM	133
<i>A. I. Kiselev, V. G. Shevchenko, N. A. Popov, L. A. Akashev</i>	
ОПИСАНИЕ СДВИГОВОЙ ПРОЧНОСТИ СТАЛИ 30ХГСА НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ МОДЕЛИ MTS	133
<i>Р. М. Кичигин, Д. М. Шалковский, А. В. Караваев, А. В. Петровцев, Е. А. Козлов, А. М. Брагин, А. К. Ломунов</i>	
30CGSA STEEL SHEAR STRENGTH DESCRIPTION WITH A MODIFIED MTS MODEL	134
<i>R. M. Kichigin, D. M. Shalkovsky, A. V. Karavayev, A. V. Petrovtsev, E. A. Kozlov, A. M. Bragin, A. K. Lomunov</i>	
ДВУХСТУПЕНЧАТАЯ ЛЕГКОГАЗОВАЯ ПУШКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ПРОЦЕССАХ	135
<i>А. Ю. Гармашев, Е. Б. Смирнов, Д. Т. Юсупов, А. И. Клёнов</i>	
TWO-STAGE LIGHT-GAS GUN FOR MATTER PROPERTIES STUDIES AT HIGH-INTENSITY PROCESSES	135
<i>A. Yu. Garmashev, E. B. Smirnov, D. T. Yusupov, A. I. Klyonov</i>	
РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ И ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ КВАРЦИТА	135
<i>М. Г. Коваленко, Д. М. Шалковский, А. В. Петровцев, А. В. Павленко, С. Н. Малюгина, Д. Т. Юсупов</i>	
EVALUTION OF DATA FROM SHOCK EXPERIMENTS TAKEN TO STUDY STRENGTH AND PHASE TRANSFORMATIONS IN QUARTZITE.	136
<i>M. G. Kovalenko, D. M. Shalkovsky, A. V. Petrovtsev, A. V. Pavlenko, S. N. Malyugina, D. T. Yusupov</i>	
АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ В СПЛАВЕ УРАН-МОЛИБДЕН ПРИ ПРОЛЕТЕ ОСКОЛКА ДЕЛЕНИЯ	137
<i>Л. Н. Колотова, С. В. Стариков</i>	
ATOMISTIC SIMULATIONS OF DEFECTS FORMATION AT SWIFT HEAVY ION IRRADIATION IN U-Mo ALLOY	137
<i>L. N. Kolotova, S. V. Starikov</i>	
СПОСОБ ОБНАРУЖЕНИЯ РАЗВИВАЮЩИХСЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН	137
<i>В. Г. Шевченко, Д. А. Еселевич, А. В. Конюкова, А. В. Рябина, И. А. Чупова, И. В. Конюков</i>	

METHOD FOR DETECTING DEVELOPING FATIGUE SURFACE CRACKS	137
<i>V. G. Shevchenko, D. A. Eselevich, A. V. Konyukova, A. V. Ryabina, I. A. Chupova, I. V. Konyukov</i>	
МНОГОКАНАЛЬНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ В УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ	138
<i>А. П. Кузнецов, К. Л. Губский, В. А. Пирог, Т. В. Казиева, И. Ю. Тищенко, Р. Д. Глухов</i>	
MULTICHANNEL LASER SYSTEMS FOR VELOCITY MEASUREMENTS IN SHOCK EXPERIMENTS	138
<i>A. P. Kuznetsov, K. L. Gubskiy, V. A. Pirog, T. V. Kazieva, I. Yu. Tishchenko, R. D. Glukhov</i>	
ОСОБЕННОСТИ РЕЛАКСАЦИИ ПЕРЕГРЕТОГО РАСПЛАВА ОКСИДА АЛЮМИНИЯ	138
<i>М. Н. Ларичев, А. М. Величко, Г. Е. Беляев, И. Г. Степанов</i>	
FEATURES OF RELAXATION OF SUPERHEATED MELT OF ALUMINA	138
<i>M. N. Larichev, A. M. Velichko, G. E. Belyaev, I. G. Stepanov</i>	
АТОМИСТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КОНТИНУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ДИСЛОКАЦИОННОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ	139
<i>А. Е. Майер, В. С. Красников, В. В. Погорелко</i>	
ATOMISTIC APPROACHES FOR CONSTRUCTION OF CONTINUUM DISLOCATION PLASTICITY MODEL	139
<i>A. E. Mayer, V. S. Krasnikov, V. V. Pogorelko</i>	
ЭВОЛЮЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОР ПО РАЗМЕРАМ В МЕТАЛЛАХ ПРИ ОТКОЛЬНОМ РАЗРУШЕНИИ	140
<i>П. Н. Майер, А. Е. Майер</i>	
EVOLUTION OF THE SIZE DISTRIBUTION OF PORES IN METALS DURING TENSILE FRACTURE	140
<i>P. N. Mayer, A. E. Mayer</i>	
ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛИ ЭК-181	141
<i>С. Н. Малюгина, А. В. Павленко, А. С. Майорова, С. С. Мокрушин, Д. Н. Казаков</i>	
TEMPERATURE-VELOCITY DEPENDENCES OF STEEL EK-181 STRENGTH PROPERTIES	141
<i>S. N. Malyugina, A. V. Pavlenko, A. S. Mayorova, S. S. Mokrushin, D. N. Kazakov</i>	
СОГЛАСОВАННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ДЛЯ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ В ОКРЕСТНОСТИ КРИВЫХ ПЛАВЛЕНИЯ И ИСПАРЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПЕРВОПРИНЦИПНЫХ РАСЧЕТОВ	141
<i>Д. В. Минаков, М. А. Парамонов, П. Р. Левашов</i>	
CONSISTENT INTERPRETATION OF DYNAMIC EXPERIMENTS FOR REFRACTORY METALS NEAR THE MELTING AND THE VAPORIZATION CURVES BY AB INITIO CALCULATIONS	142
<i>D. V. Minakov, M. A. Paramonov, P. R. Levashov</i>	
ГИБРИДНАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ	142
<i>С. С. Мокрушин, А. А. Тяктев, Н. Б. Аникин, А. В. Павленко</i>	
HYBRID INTERFEROMETRY SYSTEM FOR GAS DYNAMIC STUDIES	142
<i>S. S. Mokrushin, A. A. Tyaktev, N. B. Anikin, A. V. Pavlenko</i>	
МАКЕТ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ VISAR-LINE С ОРИГИНАЛЬНОЙ СХЕМОЙ ТРАНСЛЯЦИИ СИГНАЛОВ	142
<i>М. С. Мытарев, А. В. Павленко, С. Н. Малюгина, Н. Б. Аникин</i>	
THE PROTOTYPE OF INTERFEROMETRIC COMPLEX VISAR-LINE WITH ORIGINAL SCHEME OF RELAY	143
<i>M. S. Mytarev, A. V. Pavlenko, S. N. Malyutina, N. B. Anikin</i>	
ВЛИЯНИЕ ИСХОДНОЙ ЧИСТОТЫ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО U НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ ЕГО ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ	143
<i>А. В. Ольховский, Е. А. Козлов, Д. П. Кучко, А. Е. Широбоков, С. А. Бричков</i>	
THE EFFECT OF THE INITIAL PURITY OF FINE-GRAIN URANIUM ON ITS STRENGTH UNDER DYNAMIC LOADING	144
<i>A. V. Olhovskiy, E. A. Kozlov, D. P. Kuchko, A. E. Shirobokov, S. A. Brichikov</i>	
УДАРНО-ВОЛНОВЫЕ И РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНА И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ	144
<i>А. В. Павленко, С. Н. Малюгина, А. С. Майорова, С. С. Мокрушин, Д. Н. Казаков, С. Ю. Филатов</i>	

SHOCK-WAVE AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF TITAN AND TITANIUM ALLOYS	145
<i>A. V. Pavlenko, S. N. Malyugina, A. S. Mayorova, S. S. Mokrushin, D. N. Kazakov, S. Yu. Filatov</i>	
СТРУКТУРА И ПРОЧНОСТЬ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО Al-Zn-Mg-Fe-Ni СПЛАВАС РАЗНЫМ РАЗМЕРОМ ЗЕРНА	145
<i>A. Н. Петрова, И. Г. Бродова, Н. А. Белов, Т. К. Акопян, С. В. Разоренов, Е. В. Шорохов, З. С. Завьялов</i>	
STRUCTURE AND STRENGTH OF THE EUTECTIC Al-Zn-Mg-Fe-Ni ALLOY WITH DIFFERENT GRAIN SIZE	145
<i>A. N. Petrova, I. G. Brodova, N. A. Belov, T. K. Akopyan, S. V. Razorenov, E. V. Shorokhov, Z. S. Zavialov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕТОДОМ СОСТАВНЫХ СТЕРЖНЕЙ ГОПКИНСОНА В ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ 10^2 – 10^3 с ⁻¹	146
<i>A. Ю. Гармашев, С. М. Долгих, Е. А. Петухов, Е. Б. Смирнов, М. А. Шистириков, Д. Т. Юсупов, З. И. Завьялов, А. А. Борцов</i>	
INVESTIGATION INTO DEFORMATION OF STAINLESS STEEL FABRICATED WITH HELP OF ADDITIVE TECHNIQUES, BY METHOD OF HOPKINSON COMPOSITE RODS IN THE RANGE OF STRAIN RATES 10^2 – 10^3 s ⁻¹	146
<i>A. Yu. Garmashev, S. M. Dolgikh, E. A. Petukhov, E. B. Smirnov, M. A. Shistirikov, D. T. Yusupov, Z. I. Zavyalov, A. A. Bortsov</i>	
СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ГПУ-МЕТАЛЛАХ ПРИ МЕГАПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР 80–450 К	146
<i>В. П. Пилюгин, Л. Ю. Егорова, А. М. Пацелов, Т. Р. Суаридзе, Т. П. Толмачёв, П. Е. Панфилов, Ю. В. Хлебникова</i>	
STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS OF HCP-METALS UNDER SEVERE PLASTIC DEFORMATION AT 80–450 K TEMPERATURES	147
<i>V. P. Pilyugin, L. Yu. Egorova, A. M. Patselov, T. R. Suaridze, T. P. Tolmachev, P. E. Panfilov and Yu. V. Khlebnikova</i>	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОМАСШТАБНОГО ПОДХОДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ	147
<i>П. А. Покаташкин, Д. К. Ильницкий, А. В. Янилкин</i>	
USING OF MULTISCALE APROACH FOR STUDYING CRYSTAL PLASTICITY	148
<i>P. A. Pokatashkin, D. K. Ilnitsky, A. V. Yanilkin</i>	
ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ ГАФНИЕВОЙ БРОНЗЫ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ	148
<i>В. В. Попов, Е. Н. Попова, А. В. Столбовский, Р. М. Фалахутдинов, К. В. Гаан, Е. В. Шорохов</i>	
EVOLUTION OF STRUCTURE OF HAFNIUM BRONZE UNDER HIGH-SPEED DYNAMIC DEFORMATION	148
<i>V. V. Popov, E. N. Popova, A. V. Stolbovsky, R. M. Falahutdinov, K. V. Gaan, E. V. Shorohov</i>	
О ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ В НЕКОТОРЫХ ГАЛОГЕНПРОИЗВОДНЫХ МЕТАНА ПРИ ИХ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ	149
<i>Д. Г. Панкратов, А. К. Якунин, А. Г. Попоцов</i>	
ABOUT PHASE TRANSITIONS IN SOME HALOGENATED METHANE AT THE DYNAMIC LOADING	149
<i>D. G. Pankratov, A. K. Yakunin, A. G. Poptsov</i>	
КОМПЛЕКСЫ PDV, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ ОТДЕЛЕНИИ РФЯЦ – ВНИИТФ	149
<i>Д. П. Кучко, М. А. Ральников, А. Е. Широбоков</i>	
PDV COMPLEXES USED AT RFNC – VNIITF GAS-DYNAMICS DEPARTMENT	149
<i>M. A. Ralnikov, D. P. Kuchko, A. E. Shirobokov</i>	
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМЕСИ C-N-O-H В ОБЛАСТИ НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ	150
<i>А. А. Рыкунов, М. А. Воробьева</i>	
THERMODYNAMIC PROPERTIES OF C-N-O-H MIXTURE IN THE REGION OF NON-IDEAL PLASMA	150
<i>A. A. Rykounov, M. A. Vorobyova</i>	
ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЕВОЙ БРОНЗЫ НА ЕЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА	150
<i>Г. Г. Савенков, А. В. Кузнецов, А. М. Брагов, А. К. Ломунов</i>	

THE INFLUENCE OF LASER SURFACE ALLOYING OF ALUMINUM BRONZE ON ITS DYNAMIC PROPERTIES	151
<i>G. G. Savenkov, A. V. Kuznetsov, A. M. Bragov, A. K. Lomunov</i>	
ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	151
<i>Е. В. Кошелева, Н. И. Сельченкова, А. Я. Учаев</i>	
SUBSTANTIATION OF A CRITERION OF PREDICTABILITY OF SOLID STATES' BEHAVIOR UNDER EXTREME CONDITIONS AT HIGH-INTENSITY ACTION OF DIFFERENT TYPES	152
<i>Е. В. Kosheleva, N. I. Sel'chenkova, A. Ya. Uchaev</i>	
СИНХРОТРОННАЯ ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССОВ ДВУКРАТНОГО УДАРНОГО СЖАТИЯ	152
<i>Д. В. Петров, А. Ю. Гармашев, С. М. Долгих, Е. Б. Смирнов, Э. Р. Прууэл, К. А. Тен, А. О. Кашкаров, Б. П. Толочко</i>	
SYNCHRONOUS DIAGNOSTICS FOR THE PROCESSES OF TWOFOLD SHOCK COMPRESSION	153
<i>D. V. Petrov, A. Yu. Garmashev, S. M. Dolgikh, E. B. Smirnov, E. R. Prueel, K. A. Ten, A. O. Kashkarov, B. P. Tolochko</i>	
РТ -ДИАГРАММА ОЛОВА И СВИНЦА ПРИ ДАВЛЕНИЯХ В НЕСКОЛЬКО ТПА	153
<i>Н. А. Смирнов</i>	
РТ -DIAGRAM OF TIN AND LEAD AT PRESSURES OF SEVERAL TPA	153
<i>N. A. Smirnov</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В УДАРНО-СЖАТОЙ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ	154
<i>Ф. И. Тарасов, Е. Б. Смирнов, А. Ю. Николаев, Р. Н. Канунников, В. В. Малёв, А. С. Лобачёв, Д. В. Мухин</i>	
SOUND VELOCITY MEASUREMENTS OF SHOCK-COMPRESSED EPOXIDE RESIN BY THE PHOTOELECTRIC REGISTRATION TECHNIQUE	154
<i>F. I. Tarasov, E. B. Smirnov, A. Yu. Nikolaev, R. N. Kanunnikov, V. V. Malev, A. S. Lobachev, D. V. Mukhin</i>	
ДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ СИ	154
<i>К. А. Тен, Э. Р. Прууэл, А. О. Кашкаров, И. А. Рубцов, Б. П. Толочко</i>	
DYNAMIC STUDIES OF THE PROPERTIES OF NEW MATERIALS BY SR METHODS	155
<i>К. А. Тен, Е. Р. Prueel, А. О. Kashkarov, I. A. Rubtsov, B. P. Tolochko</i>	
ДЕСТРУКТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ – ДИНАМИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ И ДИСПЕРГИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОВ – КАК КРИТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ	155
<i>Е. В. Кошелева, Н. И. Сельченкова, С. С. Соколов, И. Р. Трунин, А. Я. Учаев</i>	
DESTRUCTIVE PROCESSES – DYNAMIC FAILURE AND METAL DISPERSION – AS CRITICAL PHENOMENA	156
<i>Е. В. Kosheleva, N. I. Sel'chenkova, S. S. Sokolov, I. R. Trunin, A. Ya. Uchaev</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАРОЖДЕНИЯ ДИСЛОКАЦИЙ НА ГРАНИЦЫ ЗЕРНА В ГЦК БИКРИСТАЛЛАХ	156
<i>Е. В. Фомин, А. Е. Майер</i>	
INVESTIGATION OF THE DISLOCATION NUCLEATION AT THE GRAIN BOUNDARY IN FCC VICRYSTALS	157
<i>Е. В. Fomin, А. Е. Mayer</i>	
МОБИЛЬНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ НА БАЗЕ БЕЗЖЕЛЕЗНОГО ИМПУЛЬСНОГО БЕТАТРОНА ДЛЯ РАДИОГРАФИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ	157
<i>В. А. Фомичёв, С. Г. Козлов, Ю. П. Куропаткин, В. И. Нижегородцев, И. Н. Романов, К. В. Савченко, В. Д. Селемир, Е. В. Урлин, А. А. Чинин, О. А. Шамро</i>	
MOBILE ACCELERATOR BASED ON IRONLESS PULSED BETATRON FOR DYNAMIC OBJECTS RADIOGRAPHING	158
<i>V. A. Fomichev, A. A. Chinin, S. G. Kozlov, Yu. P. Kuropatkin, V. I. Nizhegorodtsev, I. N. Romanov, K. V. Savchenko, V. D. Selemir, O. A. Shamro, E. V. Urlin</i>	
ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАННОЙ СТРУКТУРЫ В МЕДИ ПОСЛЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СХЛОПЫВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ	158
<i>Н. Ю. Фролова, В. И. Зельдович, А. Э. Хейфец, И. В. Хомская, К. В. Гаан, Е. В. Шорохов</i>	

FEATURES OF DEFORMED STRUCTURE IN COPPER AFTER HIGH-SPEED COLLAPSE OF THE CYLINDRICAL SHELL	159
<i>N. Yu. Frolova, V. I. Zel'dovich, A. E. Kheifets, I. V. Khomskaya, K. V. Gaan, E. V. Shorokhov</i>	
ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ГАФНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ	159
<i>К. В. Хищенко</i>	
PHASE TRANSFORMATIONS OF HAFNIUM AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES	159
<i>К. V. Khishchenko</i>	
СВОЙСТВА СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ДКУП	159
<i>И. В. Хомская, В. И. Зельдович, Е. В. Шорохов, С. В. Разоренов, Н. Ю. Фролова, А. Э. Хейфец, Д. Н. Абдуллина</i>	
PROPERTIES OF SUBMICROCRYSTALLINE ALLOYS BASED ON COPPER OBTAINED BY THE DCAP METHOD	160
<i>I. V. Khomskaya, V. I. Zeldovich, E. V. Shorokhov, S. V. Razorenov, N. Yu. Frolova, A. E. Kheifets, D. N. Abdullina</i>	
КОНЦЕПЦИЯ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА БАЗЕ БЕЗЖЕЛЕЗНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ БЕТАТРОНОВ ДЛЯ МАЛОРАКУРСНОЙ ТОМОГРАФИИ	160
<i>О. А. Шамро, Ю. П. Куропаткин, В. И. Нижегородцев, К. В. Савченко, В. Д. Селемир, В. А. Фомичёв, А. А. Чинин</i>	
CONCEPT OF RADIOGRAPHIC COMPLEX BASED ON IRONLESS PULSED BETATRONS FOR SMALL-ANGLE TOMOGRAPHY	161
<i>O. A. Shamro, A. A. Chinin, V. A. Fomichev, Yu. P. Kuropatkin, V. I. Nizhegorodtsev, K. V. Savchenko, V. D. Selemir</i>	
НОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО УДАРНО-ВОЛНОВЫМ СВОЙСТВАМ КВАРЦИТА, ПОЛУЧЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ НИЗКООМНЫХ МАНГАНИНОВЫХ ДАТЧИКОВ В ДИАПАЗОНЕ 20–50 ГПА	161
<i>А. Ю. Гармашев, Е. Б. Смирнов, Д. Т. Юсупов, К. С. Сидоров, М. А. Шистириков, А. И. Клёнов, Е. А. Петухов</i>	
NEW EXPERIMENTAL DATA ON SHOCK-WAVE PROPERTIES OF QUARTZ OBTAINED WITH THE HELP OF LOW-RESISTANCE MANGANIN GAUGES IN THE RANGE 20–50 GPA	161
<i>A. Yu. Garmashev, E. B. Smirnov, D. T. Yusupov, K. S. Smirnov, M. A. Shistirikov, A. I. Klenov, E. A. Petukhov</i>	
СКОРОСТИ ЗВУКА В УДАРНО-СЖАТОМ УРАНЕ В ДИАПАЗОНЕ 80–200 ГПА	162
<i>Д. Г. Панкратов, А. К. Якунин, А. Г. Попоцов</i>	
SOUND VELOCITIES OF SHOCK-COMPRESSED URANIUM IN THE PRESSURE RANGE FROM 80 TO 200 GPA	162
<i>D. G. Pankratov, A. K. Yakunin, A. G. Poptsov</i>	
АДАПТИВНЫЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ СКОРОСТИ ИЗ PDV-ДААННЫХ	162
<i>Н. Б. Аникин</i>	
ADAPTIVE TECHNIQUE OF VELOCITY PROFILE RECONSTRUCTION FROM PDV DATA	163
<i>N. B. Anikin</i>	
Секция 5	
НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ, КОНТРОЛЬ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ВОДО-	
РОДНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ	
Section 5	
SCIENTIFIC BASES OF NUCLEAR POWER ENGINEERING, NUCLEAR MATERIALS HANDLING	
AND HYDROGEN SAFETY	
ИМПУЛЬСНЫЕ НЕЙТРОННЫЕ/РЕНТГЕНОВСКИЕ ИСТОЧНИКИ С ЛАЗЕРНЫМ ИНИЦИИРОВАНИЕМ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ, СВЯЗАННЫХ С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ СОХРАННОСТИ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ	167
<i>А. Фавалли, С. Паланияппан, Р. Е. Рейновски</i>	
LASER-DRIVEN PULSE NEUTRON/X-RAY SOURCES FOR NUCLEAR MATERIAL SECURITY AND SCIENTIFIC APPLICATIONS	167
<i>A. Favalli, S. Palaniyappan, R. E. Reinovsky</i>	

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОХРАННОСТИ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ	167
<i>P. E. Reinovsky, A. Favalli</i>	
TECHNIQUES AND TECHNOLOGY OF NON-DESTRUCTIVE ANALYSIS FOR NUCLEAR MATERIAL SECURITY	168
<i>R. E. Reinovsky, A. Favalli</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ПАССИВНЫХ КАТАЛИТИЧЕСКИХ РЕКОМБИНАТОРОВ ВОДОРОДА	168
<i>E. B. Bezgodov, V. M. Kryukov, S. D. Pasyukov, M. V. Nikiforov, A. A. Tarakanov, V. N. Feduyshkin, I. A. Popov, D. L. Moshkin, Yu. F. Davletchin, V. G. Serebryak, H. V. Morozova, O. V. Titova</i>	
OPERATION CHARACTERISTICS AND PECULARITIES OF PASSIVE CATALYTIC HYDROGEN RECOMBINER	169
<i>E. V. Bezgodov, V. M. Kryukov, S. D. Pasyukov, M. V. Nikiforov, A. A. Tarakanov, V. N. Feduyshkin, I. A. Popov, D. L. Moshkin, Yu. F. Davletchin, V. G. Serebryak, N. V. Morozova, O. V. Titova</i>	
РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНСМУТАЦИИ МИНОРНЫХ АКТИНИДОВ В ЖИДКОСОЛЕВОМ РЕАКТОРЕ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ	170
<i>M. N. Belonogov, I. A. Volkov, D. G. Modestov, V. A. Simonenko, D. V. Khmel'nitskiy</i>	
CALCULATIONS OF MINOR ACTINIDE TRANSMUTATION IN MOLTEN SALT REACTOR BASED ON MODEL SYSTEM	171
<i>M. N. Belonogov, I. A. Volkov, D. G. Modestov, V. A. Simonenko, D. V. Khmel'nitskiy</i>	
РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПЕЧИ СПЕКАНИЯ МОДУЛЯ ФАБРИКАЦИИ НИТРИДНОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА	171
<i>E. A. Belonogova, A. A. Bochkareva, I. R. Makeeva, U. F. Sheremetyeva</i>	
DEVELOPMENT OF SINTERING FURNACE MODEL FOR THE NITRIDE NUCLEAR FUEL FABRICATION MODULE	172
<i>E. A. Belonogova, A. A. Bochkareva, I. R. Makeeva, U. F. Sheremetyeva</i>	
СИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ УСТРОЙСТВ, СОДЕРЖАЩИХ ДЕЛЯЩИЕСЯ И ВЗРЫВЧАТЫЕ МАТЕРИАЛЫ	172
<i>I. I. Kostenko, A. A. Yudov, S. S. Besov, Yu. A. Sokolov, S. Yu. Kas'yanov</i>	
IDENTIFICATION SYSTEM FOR THE DEVICES CONTAINING FISSILE AND EXPLOSIVE MATERIALS	173
<i>I. I. Kostenko, A. A. Yudov, S. S. Besov, Yu. A. Sokolov, S. Yu. Kas'yanov</i>	
РАЗРАБОТКА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПЯТЦ	173
<i>A. A. Bochkareva, I. R. Makeeva, U. F. Sheremetyeva, E. A. Belonogova, I. V. Peshkichev</i>	
THERMOPHYSICAL AND HYDRODYNAMIC MODELS DEVELOPMENT OF STATION NUCLEAR FUEL CYCLE TECHNOLOGY PROCESSES	174
<i>A. A. Bochkareva, I. R. Makeeva, U. F. Sheremetyeva, E. A. Belonogova, I. V. Peshkichev</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕННОГО И ЭЛЕКТРОННОГО АМПЛИТУДНОГО РАЗРЕШЕНИЯ ГАММА ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ LYSO СЦИНТИЛЛЯТОРОВ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УСТАНОВКАХ ОБНАРУЖЕНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ, ЯДЕРНЫХ ДЕЛЯЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ И РАБОТАЮЩИХ ПО МЕТОДУ МЕЧЕНОГО НЕЙТРОНА	174
<i>I. G. Vavilova, V. A. Solovei, A. S. Fedorova, Yu. K. Kolobov</i>	
SIMULATION OF THE TIME AND ELECTRONICS AMPLITUDE RESOLUTION GAMMA DETECTORS BASED ON LYSO SCINTILLATORS FOR USE IN SYSTEMS FOR THE DETECTION OF EXPLOSIVES, NUCLEAR FISSILE MATERIALS AND OPERATING BY THE TAGGED NEUTRON METHOD	175
<i>I. G. Vavilova, V. A. Solovei, A. S. Fedorova, Yu. K. Kolobov</i>	
ПРОБЛЕМЫ ТРАНСМУТАЦИИ МИНОРНЫХ АКТИНИДОВ В ЖИДКОСОЛЕВЫХ РЕАКТОРАХ	175
<i>M. N. Belonogov, I. A. Volkov, D. G. Modestov, V. A. Simonenko, D. V. Khmel'nitskiy</i>	
PROBLEMS OF TRANSMUTATION OF MINOR ACTINIDES IN MOLTEN-SALT REACTORS	175
<i>M. N. Belonogov, I. A. Volkov, D. G. Modestov, V. A. Simonenko, D. V. Khmel'nitskiy</i>	

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ С ПОЗИЦИЙ НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕЛЯЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ	176
<i>Н. Д. Дырда, У. Ф. Шереметьева, И. Р. Макеева, В. А. Симоненко</i>	
INVESTIGATION OF VARIOUS SCENARIOS FOR THE DEVELOPMENT OF RF NUCLEAR POWER ENGINEERING FROM FISSILE MATERIAL NONPROLIFERATION PERSPECTIVE	177
<i>N. D. Dyrda, U. F. Sheremetyeva, I. R. Makeeva, V. A. Simonenko</i>	
МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ И ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕСТЕХЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФАЗ UO_{2-x}	177
<i>А. Е. Галашев, К. А. Иванчикина</i>	
MOLECULAR DYNAMIC STUDY OF THE STRUCTURE AND PHYSICAL PROPERTIES OF NONSTOICHIOMETRIC PHASES UO_{2-x}	178
<i>A. Y. Galashev, K. A. Ivanichkina</i>	
РАДИОНУКЛИДНЫЙ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗ ПРИ КОНТРОЛЕ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗОТОПНЫХ ИСТОЧНИКОВ	178
<i>Н. В. Ивашкин</i>	
RADIONUCLIDE EXPRESS-ANALYSIS AT THE CONTROL OF NUCLEAR MATERIALS AND ISOTOPE SOURCES	179
<i>N. V. Ivashkin</i>	
О ВОЗМОЖНЫХ РАЗВИЛКАХ В РАЗВИТИИ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ КОМПЛЕКСА АТЭК	179
<i>И. Р. Макеева, Н. Д. Дырда, У. Ф. Шереметьева, С. В. Пчелинцева, Ю. Г. Сырцова</i>	
ABOUT POSSIBLE DIRECTIONS IN THE DEVELOPMENT OF NUCLEAR POWER ENGINEERING. THE RESULTS OF MODELING WITH THE HELP OF COMPLEX ATEK	180
<i>I. R. Makeyeva, N. D. Dyrda, U. F. Sheremetyeva, S. V. Pchelintseva, Yu. G. Syrtsova</i>	
ЯДЕРНЫЙ МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В МОНОНИТРИДЕ УРАНА	180
<i>В. В. Оглобличев, А. М. Потанов, С. В. Верховский</i>	
NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE IN URANIUM MONONITRIDE	181
<i>V. V. Ogloblichev, A. M. Potarov, S. V. Verkhovskii</i>	
ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ TEDY. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ПРИМЕНЕНИЕ	181
<i>А. Е. Паукова, И. Р. Макеева, А. А. Рыкунова, И. В. Пешикчев, В. Ю. Пугачев, О. В. Шульц</i>	
PROGRAM COMPLEX OF THERMO-DYNAMIC MODELING TEDY. FUNCTIONAL POSSIBILITIES AND APPLICATION	182
<i>A. E. Paukova, I. R. Makeyeva, A. A. Rykunova, I. V. Peshkichev, V. Yu. Pugachev, O. V. Shults</i>	
КОРРОЗИЯ МАТЕРИАЛА ОБОЛОЧКИ ТВЭЛА НИТРИДНОГО И ОКСИДНОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА	183
<i>И. В. Пешикчев, А. А. Бочкарева, Н. Д. Дырда, И. Р. Макеева, О. В. Шульц</i>	
NITRIDE AND OXIDE NUCLEAR FUELS CLADDING CORROSION	183
<i>I. V. Peshkichev, A. A. Bockhareva, N. D. Dyrda, I. R. Makeyeva, O. V. Shults</i>	
ХЛОРИРОВАНИЕ UN ХЛОРИДОМ СВИНЦА В РАСПЛАВЛЕННОЙ ЭВТЕКТИКЕ $LiCl-KCl$	184
<i>А. М. Потанов, В. Ю. Шишкин, Ю. П. Зайков</i>	
UN CHLORINATION WITH LEAD CHLORIDEIN MOLTEN $LiCl-KCl$ EUTECTIC	184
<i>A. M. Potarov, V. Yu. Shishkin, Yu. P. Zaykov</i>	
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ РАСПЛАВЛЕННЫХ СМЕСЕЙ ЭВТЕКТИКИ $LiCl-KCl$ С КОМПОНЕНТАМИ ОЯТ	184
<i>А. М. Потанов, А. Б. Салюлев, В. Ю. Шишкин</i>	
ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF MOLTEN MULTICOMPONENT MIXTURES OF $LiCl-KCl$ EUTECTIC WITH COMPONENTS OF SNF	185
<i>A. M. Potarov, A. B. Salyulev, V. Yu. Shishkin</i>	
ВЫБОР УЧАСТКОВ ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОДАХ	185
<i>А. М. Романов</i>	

THE SELECTION OF SITE FOR RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL IN CRYSTALLINE ROCKS	186
<i>A. M. Romanov</i>	
ДИСТАНЦИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПУТЕЙ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ В НЕДРАХ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА	187
<i>A. M. Романов</i>	
DISTANT DETERMINATION OF MIGRATION ROUTES OF RADIONUCLIDES IN THE DEPTHS OF THE SEMIPALATINSK TEST SITE	187
<i>A. M. Romanov</i>	
РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ДОИЗВЛЕЧЕНИЯ ДЕЛЯЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ ИЗ САО С ПОМОЩЬЮ ПК ВИЗАРТ	188
<i>A. A. Рыкунова, Ю. А. Евсюкова, А. Ю. Шадрин, О. В. Шмидт</i>	
ESTIMATED ASSESSMENT STAGE OF SUPPLEMENTARY FISSILE MATERIALS RETRIEVAL FROM INTERMEDIATE LEVEL WASTE WITH THE AID OF SOFTWARE COMPLEX VIZART	188
<i>A. A. Rykunova, Yu. A. Evsyukova, A. Yu. Shadrin, O. V. Shmidt</i>	
ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ВИЗАРТ КАК ИНСТРУМЕНТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА	189
<i>И. Р. Макеева, В. Ю. Пугачев, В. Г. Дубосарский, А. А. Рыкунова</i>	
SOFTWARE COMPLEX VIZART AS A TOOL FOR NUCLEAR FUEL CYCLE TECHNOLOGIES MODELLING	189
<i>I. R. Makeyeva, V. Yu. Pugachev, V. G. Dubosarsky, A. A. Rykunova</i>	
РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ БМ П И БМ ЛР	190
<i>А. А. Рякин, Е. С. Горбачева, О. В. Койнов, М. В. Никольшин, О. С. Путилин</i>	
COMPUTATIONAL ANALYSIS OF THE THERMAL STATES OF “BM-P” AND “BM-LR” EXPERIMENTAL FACILITIES	190
<i>A. A. Ryakin, E. S. Gorbachyova, O. V. Koynov, M. V. Nikulshin, and O. S. Putilin</i>	
РАЗРАБОТКА АБСОЛЮТНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНОСТИ ПЛОСКИХ РАДИОНУКЛИДНЫХ ИСТОЧНИКОВ БЕТА-ИЗЛУЧЕНИЯ	191
<i>Т. Е. Кузьмина, Е. В. Курешева, С. А. Пахомов, В. В. Сидоров, Г. В. Шахетов</i>	
DEVELOPMENT OF ABSOLUTE METHOD FOR MEASURING THE ACTIVITY OF FLAT BETA RADIONUCLIDE SOURCES	192
<i>Т. Е. Kuzmina, E. V. Kuryшева, S. A. Pakhomov, V. V. Sidorov, G. V. Chachetov</i>	
РЕЗУЛЬТАТЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ С ЦЕЛЬЮ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ТЯЖЕЛЫМ АВАРИЯМ НА АЭС С ВВЭР	192
<i>Е. В. Безгодов, А. С. Иванов, В. М. Крюков, В. А. Симоненко, О. В. Шульц, А. В. Павленко, Д. В. Фролов, А. В. Ушков</i>	
PURPOSES AND RESULTS OF THE STUDIES OF DYNAMIC PROCESSES IN HYDROGENOUS MEDIA AIMED AT SEVERE ACCIDENTS PREVENTION AT WWER-BASED NPP	193
<i>E. V. Bezgodov, A. S. Ivanov, V. M. Krukov, V. A. Simonenko, O. V. Shults, A. V. Pavlenko, D. V. Frolov, A. V. Ushakov</i>	
РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСПЫТАНИЯ СЕРИЙНЫХ ОБРАЗЦОВ РЕКОМБИНАТОРОВ СЖИГАНИЯ ВОДОРОДА НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЕ РФЯЦ – ВНИИТФ	194
<i>А. А. Тараканов, Е. В. Безгодов, Д. Л. Мошкин, М. В. Никифоров, С. Д. Пасюков, И. А. Попов, В. Г. Серебряк, Ю. С. Уфимцев, В. Н. Федюшкин</i>	
THE DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A TECHNOLOGY OF TESTING SERIAL SAMPLES OF HYDROGEN BURNING RECOMBINERS AT RFNC – VNIITF EXPERIMENTAL BASIS	194
<i>A. A. Tarakanov, E. V. Bezgodov, D. L. Moshkin, M. V. Nikiforov, S. D. Pasyukov, I. A. Popov, V. G. Serebryak, Yu. S. Ufimtsev, V. N. Feduyushkin</i>	
ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИИ ОБРАЩЕНИЯ С РАО НА МФР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИМИЗАЦИОННОГО МОДУЛЯ ПК ВИЗАРТ	195
<i>Л. Р. Файрушина, А. А. Рыкунова, И. Р. Макеева, В. Ю. Пугачев</i>	

THE CHOICE OF RADIOACTIVE WASTE TREATMENT OPERATION TECHNOLOGICAL PARAMETERS AT FABRICATION/REFABRICATION MODULE WITH USING OPTIMIZATION MODULE OF SOFTWARE PACKAGE VIZART	195
<i>L. R. Fayrushina, A. A. Rykunova, I. R. Makeeva, V. Yu. Pugachev</i>	
ГИБРИДНАЯ РЕАКТОРНАЯ УСТАНОВКА С Th-Pu-U ОКСИДНЫМ ТОПЛИВОМ И ПЛАЗМЕННЫМ ИСТОЧНИКОМ НЕЙТРОНОВ	196
<i>A. B. Аржанников, С. В. Беденко, А. А. Иванов, Д. Г. Модестов, В. В. Приходько, С. Л. Синицкий, И. В. Шаманин, В. М. Шмаков, Е. В. Серова, Н. В. Степанов, А. М. Титова</i>	
A HYBRID REACTOR FACILITY WITH Th-Pu-U-OXIDE FUEL AND A PLASMA NEUTRON SOURCE	196
<i>A. V. Arzhannikov, S. V. Bedenko, A. A. Ivanov, D. G. Modestov, V. V. Prikhodko, E. V. Serova, S. L. Sinitzky, N. V. Stepanov, A. M. Titova, I. V. Shamanin, V. M. Shmakov</i>	
КРИТИЧНОСТЬ СИСТЕМЫ И ЕЕ ОТДЕЛЬНЫХ ЧАСТЕЙ	197
<i>В. М. Шмаков</i>	
CRITICALITY OF A SYSTEM AND ITS COMPONENTS	197
<i>V. M. Shmakov</i>	
ОЦЕНКА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЯТЦ	198
<i>О. В. Шульц, И. Р. Макеева, А. А. Рыкунова, И. В. Пешкичев</i>	
EVALUATION OF THERMODYNAMICAL PROPERTIES OF PURE SUBSTANCES FOR THE NUCLEAR FUEL CYCLE TECHNOLOGICAL PROCESSES SIMULATION	199
<i>O. V. Shults, I. R. Makeyeva, A. A. Rykunova, I. V. Peshkichev</i>	
МЕТОДИКИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ УЧЕТА И КОНТРОЛЯ В РФЯЦ – ВНИИТФ	199
<i>И. И. Костенко, А. А. Юдов, Ю. А. Соколов</i>	
THE TECHNIQUES OF NUCLEAR MATERIALS NONDESTRUCTIVE CONTROL FOR THE PURPOSES OF CONTROL AND ACCOUNTABILITY AT RFNC – VNIITF	199
<i>I. I. Kostenko, A. A. Yudov, Yu. A. Sokolov</i>	

Секция 6

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ, ПРОГРАММЫ И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ

Section 6

NUMERICAL METHODS, ALGORITHMS, CODES AND ACCURATE SOLUTIONS

АДАПТАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ И ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА ЭРОЗИИ ДЛЯ ЗАДАЧ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО УДАРА	203
<i>П. А. Радченко, С. П. Батуев, А. В. Радченко</i>	
MESH ADAPTATION AND APPLICATION OF EROSION ALGORITHM TO THE HIGH-SPEED IMPACT PROBLEMS	203
<i>P. A. Radchenko, S. P. Batuev, A. V. Radchenko</i>	
ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ВОСХОДЯЩИХ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ	203
<i>С. П. Баутин, И. Ю. Крутова, А. Г. Обухов</i>	
GASDYNAMIC THEORY OF THE ASCENDING SWIRLING FLOWS AND ITS USE	204
<i>S. P. Bautin, I. Yu. Krutova, A. G. Obuhov</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ В ВОСХОДЯЩИХ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛНОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА	204
<i>С. П. Баутин, С. Н. Кононов, Э. С. Левунина</i>	
NUMERICAL MODELING OF FLOWS IN RISING SWIRLING FLOWS USING THE FULL SYSTEM OF NAVIER-STOKES EQUATIONS	205
<i>S. P. Bautin, S. N. Kononov, E. S. Levunina</i>	
СТАТИСТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ РАЗРУШИТЕЛЬНЫХ ВИХРЕЙ ДЛЯ РОССИИ	205
<i>А. А. Бугаенко, И. Ю. Крутова</i>	

STATISTICS DESTRUCTIVE WHIRLWINDS FOR RUSSIA	206
<i>A. A. Bugaenko, I. Yu. Krutova</i>	
АЛГОРИТМЫ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ МЕТОДИКИ ТИМ-3D	206
<i>A. A. Voropinov, I. G. Novikov</i>	
FINE-GRAINED PARALLEL ALGORITHMS IN THE TIM-3D CODE	206
<i>A. A. Voropinov, I. G. Novikov</i>	
РАЗНОСТНЫЕ СХЕМЫ ПОВЫШЕННОГО ПОРЯДКА АПРОКСИМАЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ПЕРЕНОСА ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	207
<i>A. D. Gadzhiev, V. V. Zavialov, D. A. Koshutin, A. A. Shestakov</i>	
DIFFERENCE SCHEMES OF HIGHER ORDER OF APPROXIMATION FOR HEAT TRANSFER EQUATIONS	207
<i>A. D. Gadzhiev, V. V. Zavialov, D. A. Koshutin, and A. A. Shestakov</i>	
РЕЗОНАНСЫ ДЛЯ ОДНОМЕРНОГО ОПЕРАТОРА ШРЕДИНГЕРА: АНАЛИТИЧЕСКИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ АСПЕКТЫ	207
<i>V. L. Geynits</i>	
RESONANCES FOR THE ONE-DIMENSIONAL SCHRÖDINGER OPERATOR: ANALYTICAL AND NUMERICAL ASPECTS	207
<i>V. L. Geynits</i>	
ВЕКТОРИЗОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ОДНОЙ РАЗНОСТНОЙ СХЕМЫ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ НА НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ МНОГОГРАННЫХ СЕТКАХ В ЛАГРАНЖЕВОЙ МЕТОДИКЕ ТИМ-3D	208
<i>F. O. Golomidov, A. A. Voropinov</i>	
VECTORIZED ALGORITHMS FOR ONE DIFFERENCE GAS DYNAMICS SCHEME USED ON NON-STRUCTURED POLYHEDRAL GRIDS IN THE LAGRANGIAN TIM-3D METHOD	208
<i>F. O. Golomidov, A. A. Voropinov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЗАДАЧ ПЕРЕНОСА ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	209
<i>A. S. Vershinskaya, S. A. Grabovenskaya, V. V. Zavialov, D. A. Koshutin, A. V. Urakova, I. S. Chubaresheko, A. A. Shestakov</i>	
STUDY OF DIFFERENT APPROXIMATIONS FOR SOLVING HEAT TRANSFER	209
<i>A. S. Vershinskaya, S. A. Grabovenskaya, V. V. Zavialov, D. A. Koshutin, A. V. Urakova, I. S. Chubaresheko, and A. A. Shestakov</i>	
УСТОЙЧИВОСТЬ СТАЦИОНАРНОГО КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ В ВЕРТИКАЛЬНОМ СЛОЕ С ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННЫМИ ГРАНИЦАМИ	210
<i>O. N. Dementev</i>	
THE STABILITY OF STEADY CONVECTIVE FLOW IN A VERTICAL LAYER WITH THERMALLY INSULATED BOUNDARIES	210
<i>O. N. Dementev</i>	
ПОСТРОЕНИЕ ДВУМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПОСЛЕ РАСПАДА СПЕЦИАЛЬНОГО РАЗРЫВА В ФИЗИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ	210
<i>S. L. Deryabin, A. S. Kiryanova</i>	
CONSTRUCTION OF TWO-DIMENSIONAL FLOWS ARISING AFTER THE COLLAPSE OF A SPECIAL DISCONTINUITY IN PHYSICAL SPACE	210
<i>S. L. Deryabin, A. S. Kiryanova</i>	
ПРЯМОЕ РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОДВОДНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА ОБЪЕКТ	211
<i>E. Yu. Emeljanova, V. V. Titov, V. V. Dotsenko, M. V. Nikulshin, O. S. Putilin</i>	
DIRECT SIMULATION OF THE UNDERWATER SHOCKWAVE EFFECT ON THE OBJECT	211
<i>E. Yu. Emeljanova, V. V. Titov, V. V. Dotsenko, M. V. Nikulshin, O. S. Putilin</i>	
МГД В ТРЕХМЕРНОЙ ПРОГРАММЕ ФОКУС	211
<i>A. V. Ershova, N. A. Mikhailov, K. S. Nazarov, I. V. Glazyrin</i>	

MHD IN 3D FOCUS CODE	212
<i>A. V. Ershova, N. A. Mikhailov, K. S. Nazarov, I. V. Glazyrin</i>	
О ДВУХ ПОДХОДАХ ЭФФЕКТИВНОГО ПониЖЕНИЯ РАЗМЕРНОСТИ ДЛЯ ЗАДАЧ ПЕРЕНОСА ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МНОГОМЕРНОЙ ГЕОМЕТРИИ	212
<i>A. С. Вершинская, С. А. Грабовенская, В. В. Завьялов, А. А. Шестаков</i>	
TWO METHODS TO EFFECTIVELY REDUCE DIMENSION FOR HEAT TRANSFER PROBLEMS IN MULTIDIMENSIONAL GEOMETRY	213
<i>A. S. Vershinskaya, S. A. Grabovenskaya, V. V. Zaviyalov, and A. A. Shestakov</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО КАНАЛЬНО-УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ МЕДНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ФИКСИРОВАННОМ ДАВЛЕНИИ	213
<i>С. А. Зелепугин, Д. В. Янов, А. С. Бодров, Н. В. Пахнутова</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF DYNAMIC CHANNEL-ANGULAR PRESSING OF COPPER SPECIMENS UNDER CONSTANT PRESSURE	214
<i>S. A. Zelepugin, D. V. Yanov, A. S. Bodrov, N. V. Pakhnutova</i>	
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИ СОГЛАСОВАННЫЕ ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО ТЕПЛОВОГО ПРОЦЕССА В ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ	214
<i>М. Я. Иванов, В. К. Мамаев</i>	
THERMODYNAMICALLY CORRELATED LAWS OF CONSERVATION OF HIGH-INTENSITY THERMAL PROCESS IN AIR-JET ENGINES	215
<i>М. Ya. Ivanov, V. K. Matayev</i>	
ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИИ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ	215
<i>С. П. Баутин, А. И. Коваленко</i>	
EXACT SOLUTIONS OF THE NONLINEAR EQUATION FOR FILTERING AND THERMAL CONDUCTIVITY	216
<i>S. P. Bautin, A. I. Kovalenko</i>	
СРАВНЕНИЕ ST, DDAD И ATVDR СХЕМ В ПРИБЛИЖЕНИИ КВАЗИПЕРЕНОСА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	216
<i>Д. А. Кошутин, А. В. Уракова, А. А. Шестаков</i>	
COMPARISON OF ST, DDAD, AND TVDR SCHEMES IN QUASI-TRANSPORT APPROXIMATION FOR HEAT TRANSFER PROBLEMS	217
<i>D. A. Koshutin, A. V. Urakova, and A. A. Shestakov</i>	
МЕТОД РАСЧЕТА ДВИЖЕНИЯ АБСОЛЮТНО ТВЕРДОГО ТЕЛА В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ СРЕДЕ НА НЕПОДВИЖНОЙ СЧЕТНОЙ СЕТКЕ	217
<i>А. А. Краюхин, А. Л. Стадник, Ю. В. Янилкин</i>	
A METHOD FOR CALCULATING THE MOTION OF A RIGID BODY IN AN ELASTOPLASTIC MEDIUM ON A FIXED MESH	217
<i>A. A. Krayukhin, A. L. Stadnik, Yu. V. Yanilin</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ	217
<i>А. А. Кулешов, Е. Е. Мышецкая</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF FOREST FIRE PRROGATION	218
<i>A. A. Kuleshov, E. E. Myshetskaya</i>	
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНТЕНСИВНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ С ВЕЩЕСТВОМ	218
<i>А. Я. Лейви, А. П. Яловец</i>	
MATHEMATICAL MODELING OF THE INTERACTION OF INTENSE PLASMA FLOWS ON A SUBSTANCE	219
<i>А. Ya. Leyvi, A. P. Yalovets</i>	
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГРАНИЦЫ «ГАЗ–ВАКУУМ» ВОСХОДЯЩЕГО ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ВНЕШНЕЙ СИЛЫ	219
<i>А. В. Мезенцев</i>	

MATHEMATICAL MODELING OF THE MOVEMENT OF THE BORDER “GAS–VACUUM” OF THE UPWARD SWIRLING FLOW UNDER THE ACTION OF HORIZONTAL EXTERNAL FORCES	220
<i>A. V. Mezentsev</i>	
РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ИСКРОВОГО ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ ВЗВЕСИ ПОРОШКА АЛЮМИНИЯ В ВОЗДУХЕ	220
<i>К. М. Моисеева, А. Ю. Крайнов</i>	
SOLVING PROBLEMS OF SPARK IGNITION AND BURNING OF ALUMINUM POWDER SUSPENSION IN THE AIR	221
<i>К. М. Moiseeva, A. Yu. Krainov</i>	
РАСЧЕТЫ СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЧЕНИЙ ГАЗА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ОГНЕННЫХ ВИХРЕЙ	221
<i>А. Г. Обухов</i>	
CALCULATIONS OF HIGH SPEED CHARACTERISTICS GAS FLOWS IN MODELING CONCENTRATED FIRE VORTEX	222
<i>A. G. Obukhov</i>	
РАСЧЕТ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТРЕХМЕРНЫХ СТАЦИОНАРНЫХ ПОТОКОВ В ПРИДОННОЙ ЧАСТИ ТОРНАДО	223
<i>И. Ю. Крутова, О. В. Опрышко</i>	
CALCULATION OF GAS-DYNAMIC PARAMETERS AND KINETIC ENERGY OF SPECIAL THREE-DIMENSIONAL STATIONARY FLOWS OF BOTTOM PARTS OF TORNADOES	223
<i>I. Yu. Krutova, O. V. Opryshko</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕННОГО ШАГА В НЕЯВНОЙ РАЗНОСТНОЙ СХЕМЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НА ТРЕХМЕРНОЙ НЕСТРУКТУРИРОВАННОЙ СЕТКЕ	224
<i>М. А. Писклова, И. В. Глазырин, Н. А. Михайлов</i>	
THE DETERMINATION OF TIME STEP IN AN IMPLICIT DIFFERENCE SCHEME FOR THE SOLUTION OF THE NONLINEAR HEAT CONDUCTION EQUATION ON UNSTRUCTURED THREE-DIMENSIONAL MESH	224
<i>M. A. Pisklova, I. V. Glazyrin, and N. A. Mikhaylov</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ НАГРУЗКАХ	225
<i>П. А. Радченко, С. П. Батуев, А. В. Радченко</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF CONTAINMENT STRUCTURES UNDER THE IMPULSE LOADING	225
<i>P. A. Radchenko, S. P. Batuev, A. V. Radchenko</i>	
ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД КОНЕЧНОГО ОБЪЕМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ НЕКОНСЕРВАТИВНЫХ СИСТЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ	225
<i>А. А. Серёжкин</i>	
FINITE VOLUME METHOD FOR NON-CONSERVATIVE HYPERBOLIC SYSTEMS OF DIFFERENTIAL EQUATIONS	225
<i>A. A. Serezhkin</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КВАРЦЕВОЙ ЧАСТИЦЫ В ЦЕЛЯХ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДАТИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД	226
<i>В. С. Шейнкман, О. А. Симонов</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF QUARTZ PARTICLE THERMOLUMINESCENCE FOR THE PROBLEM DATING	226
<i>V. S. Sheinkman, O. A. Simonov</i>	
РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ПЕРЕНОСА ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЯХ	226
<i>А. В. Уракова, И. С. Чубарешко, А. А. Шестаков</i>	
SOLUTION OF RADIATIVE HEAT TRANSFER EQUATIONS IN DIFFERENT APPROXIMATIONS	226
<i>A. V. Urakova, I. S. Chubareshko, A. A. Shestakov</i>	

ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ СЕТОК В ОБЪЕМАХ, ОБРАЗОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯМИ ВРАЩЕНИЯ	227
<i>A. I. Anuchina, N. A. Artemova, V. A. Gordeichuk, O. V. Ushakova</i>	
GRID GENERATION TECHNOLOGY FOR VOLUMES FORMED BY THE SURFACES OF ROTATION	228
<i>A. I. Anuchina, N. A. Artemova, V. A. Gordeichuk, O. V. Ushakova</i>	
ОПЫТ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АЭРОГАЗОГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В РАБОТАХ ГОСУДАРСТВЕННОГО РАКЕТНОГО ЦЕНТРА	228
<i>V. I. Khlybov, A. D. Cheshko</i>	
EXPERIENCE ON SUPERCOMPUTER SIMULATION MODELING OF AEROGASHYDRODYNAMICS AND HEAT EXCHANGE IN THE WORKS OF MAKEYEV SRC	229
<i>V. I. Khlybov, A. D. Cheshko</i>	
СХЕМА УРАЛ ДЛЯ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В P_1 -ПРИБЛИЖЕНИИ	229
<i>I. S. Chubareshko, A. A. Shestakov</i>	
URAL SCHEME FOR SOLVING THE HEAT TRANSFER EQUATION IN P_1 APPROXIMATION	230
<i>I. S. Chubareshko, A. A. Shestakov</i>	
ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАЗРЫВОВ В РЕШЕНИИ	230
<i>D. A. Varfolomeev, E. A. Shatalova</i>	
AN APPROXIMATE METHOD OF RECONSTRUCTING DISCONTINUITIES IN SOLUTION	230
<i>D. A. Varfolomeev, E. A. Shatalova</i>	
ЧИСЛЕННЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПЕРЕНОСА ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	231
<i>A. A. Shestakov</i>	
NUMERICAL EFFECTS IN HEAT TRANSFER SIMULATIONS	231
<i>A. A. Shestakov</i>	
ВОССТАНОВЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ПО НЕЛОКАЛЬНЫМ ДАННЫМ	231
<i>M. A. Shishlenin</i>	
RECOVERING THE COEFFICIENTS OF THE PARABOLIC EQUATIONS BY NON-LOCAL DATA	232
<i>M. A. Shishlenin</i>	
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ	233
INDEX	239

Забабахинские научные чтения:

Сборник тезисов докладов XIV Международной конференции 18–22 марта 2019. – РФЯЦ – ВНИИТФ, Снежинск

**Тезисы докладов публикуются в авторском изложении
без корректорской и редакторской правок.**

Подписано в печать 15.02.2019
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 32,085
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