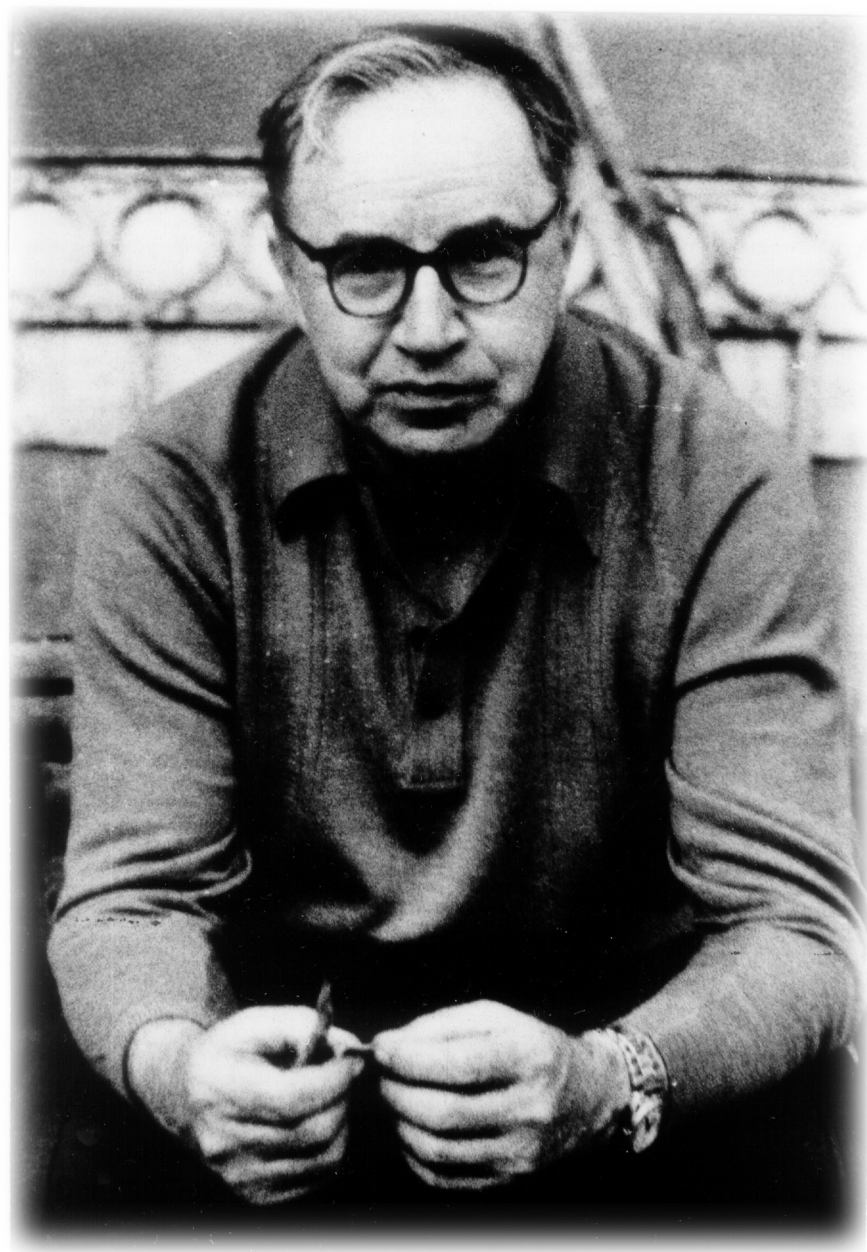


«Писать надо о результатах, а уж они пусть говорят сами за себя».



Забабакхинские научные чтения

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
16–20 АПРЕЛЯ 2012 ГОД

ТЕЗИСЫ

Zababakhin Scientific Talks

INTERNATIONAL CONFERENCE
APRIL 16–20, 2012

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 XI Международной конференции 16–20 апреля 2012. — Снежинск: Издательство РФЯЦ–ВНИИТФ, 2012. — 406 с, ил.

ISBN 978-5-902278-59-7

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 международного комитета

академик Аврорин Евгений Николаевич,
почетный научный руководитель РФЯЦ–ВНИИТФ, Россия

Председатель программного комитета

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

Программный комитет

СЕКЦИЯ 1

Анучин Михаил Геннадьевич,
Музыря Александр Кириллович,
Ногин Владимир Николаевич

СЕКЦИЯ 2

Алексей Леонидович Жеребцов,
Олег Владимирович Костицын

СЕКЦИЯ 3

Глазырин Игорь Валерьевич,
Лобода Петр Анатольевич

СЕКЦИЯ 4

Петровцев Александр Васильевич
Таржанов Владислав Иванович

СЕКЦИЯ 5

Соколов Вячеслав Петрович,
Хмельницкий Дмитрий Владимирович

СЕКЦИЯ 6

Брагин Алексей Анатольевич
Шестаков Александр Александрович

ISBN 978-5-902278-59-7

© РФЯЦ–ВНИИТФ, 2012

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

PLENARY SESSION

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ПЛАЗМЫ НА ЗЕМЛЕ И В КОСМОСЕ

В.Е. Фортов

Объединенный Институт Высоких Температур РАН,
Москва, Россия

E-mail: fortov@fcrp.ac.ru

Исследования плазмы при экстремально высоких давлениях и температуре играют важную роль для понимания структуры и эволюции астрофизических объектов: нейтронных звезд, странных кварков, черных дыр, пульсаров, сверхновых, гигантских планет, экзопланет, а также многих технологий. Обсуждаются импульсные методы генерации экстремально высоких давлений в плотной неидеальной плазме, основанные на сжатии и нагреве материи интенсивными ударными волнами. Для генерации ударно-волновых импульсов в мегабарной области давлений широко используются заряды мощных взрывчатых веществ цилиндрической и сферической формы, высоко скоростные удары, лазерные и корпускулярные пучки, рентгеновское излучение. Рассмотрены экспериментальные результаты и модели для определения физических свойств сильно неидеальной плазмы в области высоких давлений и температур: металлизация и диэлектризация сильно сжатой плазмы, высокотемпературная термодинамика и фазовые переходы, деформация спектров сжатых ионов и атомов. Представлены новые данные о физических свойствах плазмы и фазовых превращениях в широкой области давлений, соответствующих нескольким микросекундам после Большого Взрыва. Проведен анализ свойств плазмы в астрофизических объектах и их трансформация. Анализируется также поведение кварк глюонной плазмы, генерируемой в результате столкновения релятивистских ионов. На основе экспериментальных данных конструируются широко диапазонные полумпирические уравнения состояния и модели транспортных свойств плазмы. Эти полумпирические модели использованы для многомерного моделирования импульсных высоко энергетических процессов.

EXTREME STATES OF PLASMAS ON THE EARTH AND IN COSMOS

V.E. Fortov

Joint Institute for High Temperature, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

E-mail: fortov@fcrp.ac.ru

Plasma at extremely high pressures and temperatures plays an important role for understanding the structure and evolution of astrophysical objects: neutron and quark "strange" stars, black holes, pulsars, supernovas, magnetars, giant-planets, exoplanets, and many technologies. Pulsed methods for generation of extremely high pressures in the dense nonideal plasma based on the compression and heating of matter in intense shock waves and waves of adiabatic expansion, are discussed. To generate shock impulses in the megabar pressure range the cylindrical and spherical condensed high explosive charges, laser and corpuscular beams, high velocity impacts, and soft X-rays

are broadly used. The experimental data obtained by the shock wave techniques and the physical models of strongly coupled plasma physical properties at high pressures, temperatures and energy densities are discussed: the metallization and dielectrization of strongly compressed plasma, high temperature thermodynamics and phase transitions, deformation of energy spectrum of compressed ions and atoms. We present the plasma physical properties and phase transformation in a broad range of pressure – few microseconds after Big-Bang. The analysis of plasma properties in the astrophysical objects and their transformation are presented. The properties of quark-gluon plasma which is generated as a result of relativistic ion collisions are analyzed. Based on the experimental data the wide-range semi-empirical equations of state and the states and models of plasma transport properties are constructed. These semi-empirical models were used for multidimensional numerical simulation of pulsed high-energy processes.

ЧИСЛОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОНКОСТЕННЫХ КАПСУЛ НАПОЛНЕННЫХ DHe³ С ПРЯМЫМ ОБЖАТИЕМ

А.Р. Майлс¹, Х.-К. Чун¹, Р. Хеетер¹, В. Хсин¹,
Дж.А. Кох¹, Р.В. Лее¹, Х.-С. Парк¹, Джесси Пино¹,
Х.Ф. Роби¹, Х.А. Скотт¹, А. Смит¹, Р. Томасини¹,
Дж. Френье², С.К. Ли², Р. Петрассо², В. Глебов³

¹Ливерморская национальная лаборатория им. Лоуренса,
Ливермор, Калифорния, США

²Исследовательский центр плазмы и термоядерного синтеза,
Массачусетский технологический институт,
Кэмбридж, США

³Лаборатория лазерной энергетики, Университет Рочестера,
Рочестер, Нью-Йорк, США

Тонкие стеклянные капсулы, наполненные дейтерием и гелием (DHe³), обеспечивают на лазерной установке Омега экспериментальную платформу для быстрой имплозии с целью проведения измерений с временным разрешением отдельно для ионов, электронов и радиационных температур в неравновесной плазме. Важные с точки зрения динамики условия НЛТДР (нелокальное термодинамическое равновесие) создаются путем добавления в DHe³ ксенона в количестве, достаточном для воздействия на значения энерговыделения, сжатия и скорости охлаждения. Добавка материалов с высоким атомным номером (Z) существенно увеличивает скорость излучательного охлаждения в плазме, позволяя схлапываться при сжатии, что может быть на порядок величины выше, чем у капсул без такой добавки. Базовая модель моделирования LASNEX, использующая учет детальной конфигурации (DCA) атомарной физики НЛТДР, демонстрирует хорошее согласие с данными для капсул с добавкой и без нее, в то время как другие модели либо переоценивают, либо недооценивают усиление излучательного охлаждения. Базовая модель описывает поведение капсулы, если отношение D:He³ сильно отличается от эквимолярного, и говорит об отсутствии аномального энерговыделения для наполнения и чистым дейтерием, и He³. Изменение связи электрон-ион

в базовой модели демонстрирует согласие с данными по множителю связи, который находится в пределах 20% от единицы. Надежно интерферирующая сила связи электрон-ион из наших данных осложняется неопределенностями, связанными с гидродинамическим перемешиванием и другими параметрами, но многие неопределенности могут быть уменьшены в последующих экспериментах на Национальном зажигательном комплексе (NIF).

Данная работа была выполнена при поддержке Департамента Энергетики США в Ливерморской Национальной Лаборатории им. Лоуренса частично в рамках Контракта W-7405-Eng-48 и частично в рамках Контракта DE-AC52-07NA27344.

NUMERICAL SIMULATION OF THIN SHELL DIRECT DRIVE DHe³ FILLED CAPSULES

A.R. Miles¹, H.-K. Chung¹, R. Heeter¹, W. Hsing¹,
J.A. Koch¹, R.W. Lee¹, H-S. Park¹, Jesse Pino¹,
H.F. Robey¹, H.A. Scott¹, A. Smith¹, R. Tommasini¹,
J. Frenje², C.K. Li², R. Petrasso², V. Glebov³

¹Lawrence Livermore National Laboratory,
Livermore, California, USA

²Plasma Science and Fusion Center, Massachusetts
Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA

³Laboratory for Laser Energetics, University of Rochester,
³Rochester, New York, USA

Thin-shell deuterium-helium-3 (DHe³) filled glass capsules on the Omega laser provide a fast-implosion experimental platform for developing separate time-resolved measurements of ion, electron, and radiation temperatures in nonequilibrium plasmas. Dynamically significant NLTE (non-local thermodynamic equilibrium) conditions are created by the addition of xenon dopant to the DHe³ gas fill, in quantities sufficient to have an impact on yields, compression, and cooling rates. The high-Z dopant dramatically increases the radiative cooling rate in the plasma, allowing it to collapse in compressions that can be an order of magnitude higher than in undoped capsules. A baseline LASNEX simulation model using detailed configuration accounting (DCA) NLTE atomic physics shows very good agreement with the data for doped as well as undoped capsules, while other models either underpredict or overpredict the radiative cooling enhancement. The baseline model captures the behavior of the capsule when the D:He³ ratio is varied well away from equimolar, suggesting no yield anomaly with either nearly pure deuterium or He³ fills. Variation of the electron-ion coupling in the baseline simulation model shows agreement with the data for a coupling multiplier that is within 20% of unity. Reliably inferring electron-ion coupling strength from the data is complicated by uncertainties in the hydrodynamic mix and other parameters, but many of these can be mitigated in follow-on experiments at the National Ignition Facility (NIF).

This work was performed under the auspices of the U.S. Department of Energy by Lawrence Livermore National Laboratory in part under Contract W-7405-Eng-48 and in part under Contract DE-AC52-07NA27344.

СЛОЖНЕЙШИЕ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ: ОТ ТЕРМОЯДЕРНОГО ЗАЖИГАНИЯ ДО ЭКЗА-ВЫЧИСЛЕНИЙ

Д. Кузнецов

Национальная Администрация по ядерной безопасности,
МЭ США

На Национальной установке по термоядерному зажиганию проводятся эксперименты со все более изощренными диагностическими системами. Сложность физических процессов предопределяет потребность во все более полном моделировании и расчетах. В то же время сложность вычислений требует переосмысления нашего подхода к компьютерным архитектурам и моделям программирования. В следующие несколько лет нужно добиться прогресса в обеих областях. В докладе будут обсуждаться трудности, взаимосвязи и текущие стратегии поэтапного прогресса.

CHALLENGES IN PREDICTION: FROM IGNITION TO EXASCALE

Dimitri Kusnezov

National Nuclear Security Administration, DOE, USA

The National Ignition Facility is conducting experiments with increasingly detailed diagnostics. The complex physics is driving the need for more complete modeling and simulation. At the same time, challenges in computing are requiring a rethinking of our approach to computer architectures and programming models. Progress in both areas will be needed in the next few years. The challenges and relationships will be discussed and the current strategies to make progress detailed.

ЖИДКО-СОЛЕВОЙ РЕАКТОР – ПЕРЕЖИГАТЕЛЬ С БЫСТРЫМ СПЕКТРОМ НЕЙТРОНОВ

А.М. Дегтярев, Л.И. Пономарев

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

E-mail: mucatex.leonid@relcom.ru

Измерения растворимости фторидов Th, U, Pu и Am в расплаве соли LiF-NaF-KF эвтектического состава продемонстрировали их аномально высокие значения (от ~10 до 40 моль %). Эти результаты позволяют поставить вопрос о создании жидко-солевых ядерных реакторов с быстрым спектром нейтронов. Один из примеров – жидко-солевой реактор – пережигатель минорных актинидов с высокой производительностью (~300 кг/год. ГВт).

MOLTEN SALT REACTOR (MSR) WITH THE FAST NEUTRON SPECTRUM

A.M. Degtyarev¹, L.I. Ponomarev¹

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia
E-mail: mucatex.leonid@relcom.ru

The future of atomic energy is dubious without fast reactors (FR) and closed nuclear fuel cycle (CNFS). There are definite advantages in developing CNFS for MSR but up to date the small solubility (~1 mol%) of the fissioned nuclei in the fuel salts did not allow to develop MSR with the fast neutron spectrum. Recently the high solubility of UF₄ (~10 mol%), PuF₃ (~30 mol%) and AmF₃ (~40 mol%) in LiF-NaF-KF eutectics was discovered. This results allows to develop molten-salt reactor with the fast neutron spectrum (MSR-FR). One example of such reactor – the subcritical MSR-burner of minor actinides was developed and this result will be presented in the report.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РФЯЦ-ВНИИТФ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЕЙ ЭНЕРГИИ

Г.Н. Рыкованов

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Являясь одним из крупнейших мировых научных центров, РФЯЦ – ВНИИТФ ведет широкомасштабные фундаментальные и прикладные исследования в нескольких направлениях, относящихся к области физики высоких энергий, включая взрывные и лазерные технологии, экспериментальные и теоретические исследования свойств материалов в экстремальных условиях, методики диагностики быстропротекающих процессов. Ключевым моментом современного подхода к исследованиям, развиваемым в РФЯЦ – ВНИИТФ, является разработка прецизионных компьютерных моделей исследуемых материалов и процессов. Построение таких моделей стало возможным с выходом вычислительных мощностей современных суперкомпьютеров на петафлопный уровень. Перспективные модели создаются с учетом реалистичных прогнозов о росте вычислительных мощностей. В докладе дан обзор современных ме-

тодик изучения профилей волн напряжений с высоким амплитудным и временным разрешением, методов изучения кристаллической и электронной структуры материалов, данных экспериментов по изучению теплофизических свойств плотной плазмы, получению лазерной генерации в рентгеновском диапазоне. Также обсуждаются вопросы расчетно-теоретической оптимизации постановки сложных дорогостоящих экспериментов. Показано, как в результате комплексного объединения различных экспериментальных и теоретических методов оказывается возможным построение многоуровневого (multi-scale) микро-мезо-макро подхода к исследованию процессов, который необходим для обоснования новых технических и технологических решений.

RFNC-VNIITF RESEARCH IN THE AREA OF HIGH ENERGY DENSITY PHYSICS

G.N. Rykovanov

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

RFNC – VNIITF as one of the largest science centers on a global scale pursues extensive basic and applied research in several fields of high energy density physics, including explosion related and laser technologies, experimental and theoretical studies of material properties under extreme conditions, and techniques of fast process diagnostics. A key component of the state-of-the-art RFNC – VNIITF approach is creation of high-accuracy computer models of materials and processes under study. Construction of these models was enabled by petaflops performance of advanced supercomputers. The promising models are developed with due account for reasonable estimates of the computational capability growth.

The talk overviews modern methods of studying stress wave profiles with high amplitude and time resolution, methods of research into crystalline and electronic structure of materials, experimental data on thermo-physics properties of dense plasmas and laser generation in X-ray region. It also discusses computation-based optimization of setting up expensive complex experiments. Combination of different experimental and theoretic methods allows development of multi-scale micro-meso-macro approach to research into processes, necessary for validation of new engineering and technology related solutions.

«Главное направление в научных трудах Е.И. Забабахина составляют исследования явлений неограниченной кумуляции. Им был открыт новый тип кумулятивных газодинамических течений, приводящий к наиболее высоким показателям степени кумуляции. Такие течения осуществляются в периодических системах, получивших название "слойки Забабахина", которые все шире применяются в экспериментальной практике».

Академик РАН Е.Н. Аврорин

Секция 1

**ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ,
КУМУЛЯТИВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ
И ТУРБУЛЕНТНОСТЬ**

Section 1

**HIGHT-INTENSIVE PROCESSES,
CUMULATIVE PHENOMENA
AND TURBULENCE**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ КУМУЛЯЦИИ
ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ШАРОВ
С ПОМОЩЬЮ ФИГУР АЛЬТШУЛЕРА**

В.И. Зельдович¹, Н.Ю. Фролова¹, А.Э. Хейфец¹,
И.В. Хомская¹, Б.В. Литвинов², Н.П. Пурыгин²,
А.К. Музыря², А.Ю. Симонов²

¹Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия
²Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

При взрывном нагружении сплошных металлических шаров ударные волны распространяются от поверхности к центру, взаимодействуют между собой и фокусируются в центре шара. Процессы происходят в миллионные доли секунды, и их прямое наблюдение представляет собой сложную и трудоемкую задачу. Однако информация об этих быстропротекающих процессах может быть получена сравнительно простыми методами исследования стальных шаровых образцов, если они сохранены после нагружения. Металлографические исследования выявляют картину распространения, столкновения и фокусировки ударных волн с помощью фигур травления, которые мы назвали фигурами Альтшулера. (Л.В. Альтшулер с сотр. впервые наблюдал фигуры травления при взрывном нагружении стального цилиндра.) Геометрия этих фигур и исследование структуры в разных участках образца позволяют установить затухание ударных волн, тип взаимодействия соседних волн (маховский или регулярный), найти область фокусировки, определить разновременность инициирования зарядов, найти величину давления и остаточной температуры в центре шара, изучить образование центральной полости.

Работа выполнена по плану РАН (тема «Структура», № г.р. 01201064335), при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-03-00047) и Президиума РАН (проект № 12-П-2-1009).

**STUDY OF CUMULATION PHENOMENON
AT EXPLOSIVE LOADING OF METAL BALL
BY MEANS OF THE ALTSHULER'S FIGURES**

V.I. Zeldovich¹, N.Yu. Frolova¹, A.E. Kheifets¹,
I.V. Khomskaya¹, B.V. Litvinov², N.P. Purygin²,
A.K. Muzyrya², A.Yu. Simonov²

¹Institute of Metal Physics RAS, Yekaterinburg, Russia
²Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

At explosive loading of a solid massive balls the shock waves propagate from the surface to the center, interact with each other and are focused in the center of the ball. Processes occur in millionths of a second, and the direct observation is a complex and difficult task. However, information about these fast processes can be obtained by relatively simple methods of investigation of steel balls samples, if they

are preserved after loading. Metallographic studies reveal a picture of the spread, impact and focus of shock waves by means of etch figures which we have called the Altshuler's figures (firstly the such etching figures were observed by L.V. Altshuler et al. at explosive loading of steel cylinder). Geometry of these figures and the study of the structure in different parts of the sample allow us to establish the attenuation of shock waves, the type of interaction between neighboring waves (Mach or regular), determine the area of focus and unsynchronism of the initiation of charges, find the value of the residual pressure and temperature at the center of the ball, to study the process of formation of the central cavity.

This work was performed according to Plan of the Russian Academy of Sciences (theme «Structure», № 01201064335), and was partially supported by RFBR (project No 11-03-00047) and Presidium of RAS (project No 12-P-2-1009).

**ДАЛЬНЕЙШЕЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ОТРАЖЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ
ОТ ЦЕНТРА СИММЕТРИИ
С ИЗМЕНЕНИЕМ ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ
НА ОТРАЖЕННОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЕ**

Х.Ф. Валиев, А.Н. Крайко

Центральный институт авиационного моторостроения
им. П.И. Баранова, Москва, Россия
E-mail: akraiko@ciam.ru

Среда рассматривается в приближении невязкого нетеплопроводного совершенного газа с показателем адиабаты γ . В отличие от классических постановок [1–4] в задаче об отражении ударной волны (УВ) от центра симметрии (ЦС) допускается уменьшение в распространяющейся от ЦС (отраженной) УВ показателя адиабаты совершенного газа γ [5]. Пока уменьшение γ не достигло некоторого порога, структура автомодельного решения не претерпевает качественных изменений. При превышении указанного порога в автомодельном решении с момента отражения УВ из ЦС по специальному закону расширяется сферический поршень. При этом отраженная УВ конечной интенсивности движется по газу перед ней со скоростью звука, а плотность на поршне равна нулю при отличном от нуля монотонно убывающем со временем давлении. При отсутствии поршня течение за отраженной волной сразу становится неавтомодельным. Для выяснения структуры такого течения методом характеристик с явным выделением отраженной УВ решается неавтомодельная задача об отражении УВ от сферы малого радиуса. Вначале отраженная УВ распространяется по автомодельному «фону» с уменьшающейся со временем сверхзвуковой скоростью. После того, как ее скорость становится звуковой, УВ остается звуковой и далее, а перед ней распространяется неавтомодельная волна разрежения.

Литература

1. Guderley G. Starke kugelige und zylindrische Verdichtungss-töße in der Nähe des Kugelmittelpunktes bzw. der Zylinderachse // Luftfahrtforschung, 1942. Bd 19. Lfg. 9. S. 302–312.
2. Брушлинский К.В., Каждан Я.М. Об автомодельных решениях некоторых задач газовой динамики // Успехи математических наук, 1963. Т. 18. Вып. 2 (110). С. 3–23.
3. Lazarus R.B. Self-similar solutions for converging shocks and collapsing cavities // SIAM J. Numer. Anal. 1981. V. 18. No. 2. P. 316–371.
4. Валиев Х.Ф. Отражение ударной волны от центра или оси симметрии при показателях адиабаты от 1.2 до 3 // Прикладная математика и механика, 2009. Т. 73. Вып. 3. С. 397–407.
5. Валиев Х.Ф., Крайко А.Н. Автомодельные нестационарные течения совершенного газа с изменением показателя адиабаты на «отраженной» ударной волне // Прикладная математика и механика, 2011. Т. 75. Вып. 6. С. 961–982.

FURTHER EXAMINATION OF THE REFLECTION OF THE SHOCK WAVE FROM THE CENTRE OF SYMMETRY WITH ADIABATIC EXPONENT CHANGE ON THE REFLECTED SHOCK WAVE

A.N. Kraiko, Kh.F. Valiyev

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

E-mail: akraiko@ciam.ru

The medium is considered in approximation of inviscid non heat-conducting perfect gas with adiabatic exponent γ . Unlike classical formulations [1-4] in the problem on reflection of the shock wave (SW) from the centre of symmetry (CS) decrease in adiabatic exponent of perfect gas γ in expanding from CS (reflected) SW [5] is supposed. While the decrease of γ has not reached some threshold, the structure of the self-similar solution does not undergo qualitative changes. At excess of the specified threshold in the self-similar solution spherical piston expands under the special law from CS from the moment of SW reflection. Thus reflected SW of finite intensity propagates through gas with speed of sound, and the density on the piston is equal to zero with monotonously decreasing in the course of time nonzero pressure. In the absence of the piston the flow behind the reflected wave becomes at once not self-similar. For finding-out of such flow structure by the method of characteristics with reflected SW explicit allocation not self-similar problem on reflection SW from sphere of small radius is solved. In the beginning reflected SW is expanding through self-similar «background» with decreasing in the course of time supersonic velocity. After its velocity becomes sonic, SW remains to be sonic and further, and before it not self-similar rarefaction wave expands.

References

1. Guderley G. Starke kugelige und zylindrische Verdichtungss-töße in der Nähe des Kugelmittelpunktes bzw. der Zylinderachse // Luftfahrtforschung, 1942. Bd 19. Lfg. 9. S. 302–312.
2. Brushlinskii K.V., Kazdan Ya.M. Self-similar solutions of some problems of gas dynamics // Usp. Mat. Nauk, 1963. V. 18. No. 2 (110). Pp. 3–23.
3. Lazarus R.B. Self-similar solutions for converging shocks and collapsing cavities // SIAM J. Numer. Anal. 1981. V. 18. No. 2. Pp. 316–371.

4. Valiyev H.F. The reflection of a shock wave from a centre or axis of symmetry at adiabatic exponents from 1.2 to 3 // J. appl. math. mech., 2009. V. 73. No. 3. Pp. 397–407.

5. Valiyev H.F., Kraiko A.N. Self-similar non-stationary flows of perfect gas with change of the adiabatic exponent on the «reflected» shock wave. J. appl. math. mech., 2011. V. 75. No. 6. Pp. 961–982.

1-3

ИССЛЕДОВАНИЕ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ С МЕТАЕМЫМИ АКТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

А.А. Мокеев, А.А. Марсов, И.Ф. Садыков

ФГБОУ ВПО Казанский национальный исследовательский
технологический университет, Казань, Россия

E-mail: alexander_mokeev@mail.ru

Важнейшей научно-технической проблемой в области разработки месторождений является обеспечение высоких темпов добычи углеводородного сырья при наиболее полном извлечении его из недр. При существующих способах освоения и разработки месторождений более половины установленных запасов остается в недрах. В связи с этим нефте- и газодобывающими компаниями значительное внимание уделяется разработке новых комплексных методов воздействия на пласты с целью интенсификации добычи углеводородов. В работе [1] впервые предложена технология комплексной перфорации с одновременным термогазохимическим воздействием на пласт, которая заключалась использовании кумулятивного заряда с дополнительным химически-активным элементом на основе твердого топлива, метаемого кумулятивным зарядом и образующего в процессе взрывчатого превращения активные кислоты. Данное направление получило развитие в работах [2, 3], где были представлены результаты разработки устройства для осуществления комплексной перфорации и исследованы составы генерирующие при взрывчатом превращении галогеноводороды, которые химически воздействуют на призабойную зону, улучшая ее фильтрационные характеристики. Исследования показали высокую эффективность предложенной технологии и составов метаемого активного элемента. Однако заряды метаемого активного элемента, изготовленные из предложенных составов, оказались физически нестабильными в процессе хранения. Было установлено, что причиной нестабильности является использование в качестве хлоробразующего компонента гексахлорэтана, который сублимирует в процессе хранения, вызывая рост прессованных шашек и разрыхление структуры заряда.

В настоящей работе предложены альтернативные хлоробразующие компоненты поливинилхлорид хлорированный марки ПСХ-ЛС и гексахлорбензол. Выполнены исследования по оптимизации рецептур составов активных элементов и проведены эксперименты, позволяющие произвести сравнительную оценку эффективности действия кумулятивных зарядов с активными элементами различных рецептур. Установлено, что эффективность разработанных рецептур активных

элементов с использованием ПСХ-ЛС значительно уступает по эффективности базовой рецептуры. Составы, содержащие гексахлорбензол обладают эффективностью на уровне базовой рецептуры и могут быть рекомендованы к применению в комплексной технологии перфорации и одновременной химической обработки нефтяных и газовых пластов.

Литература

1. Мокеев А.А., Садыков И.Ф., Марсов А.А. Технология перфорации нефтяных скважин кумулятивным зарядом с металлом и химически активными элементами // VII Заббахинские научные чтения / тезисы международной конференции – г. Снежинск, РФЯЦ – ВНИИТФ, 2003 – С. 29.
2. Чипига С.В., Садыков И.Ф., Марсов А.А. и др. Устройство и технология для комплексной кумулятивной перфорации и термогазокислотной обработки нефтяной скважины // X Заббахинские научные чтения / тезисы международной конференции – г. Снежинск, РФЯЦ – ВНИИТФ, 2010 – С. 48.
3. Мокеев А.А., Садыков И.Ф., Марсов А.А. и др. Изучение составов, образующих в процессе взрывчатого превращения галогеноводороды // X Заббахинские научные чтения / тезисы международной конференции – г. Снежинск, РФЯЦ – ВНИИТФ, 2010 – С. 98.

INVESTIGATION OF CUMULATIVE CHARGES WITH HURLED ACTIVE ELEMENTS

A.A. Mokeev, A.A. Marsov, I.F. Sadikov

Kazan National Research Technological University,
Russia, Kazan

E-mail: alexander_mokeev@mail.ru

The major scientific and technical problem in the field of working out of deposits is maintenance high rates of extraction of hydrocarbonic raw materials at its fullest extraction from bowels. At existing ways of development and working out of deposits more than half of established stocks remains in the depths of. In this connection petro- and the gas companies the considerable attention is given to working out of new complex methods of influence on layers for the purpose of an intensification of extraction of hydrocarbons. In work [1] the technology of complex punching with simultaneous thermal and gas-chemical exposure on a layer which consisted use of a cumulative charge with an additional chemically-active element on the basis of firm fuel, throwed a cumulative charge and forming in the course of explosive transformation active acids for the first time is offered. This line of research has had development in works [2, 3] where results of working out of the device for realisation of complex punching have been presented and structures generating at explosive transformation halogen compounds with hydrogen which chemically influence on bottomhole a zone are investigated, improving its filtrational characteristics. Researches have shown high efficiency the offered technology and composition throwed an active element. However charges throwed is active th element, made of the offered composition, have appeared physically astable in process storage. It has been established that the reason of instability is use in quality forming chlorine a component hexachloroethane which changes from solid to gas статье in the course of storage, causing growth of the pressed draughts and a loosening of structure of a charge.

In this paper we propose an alternative component to chlorinated PVC and hexachlorobenzene. Researches on optimisation of compoundings an active of elements are executed and the experiments are made, allowing to make a comparative estimation of efficiency of action of cumulative charges with active elements of various compoundings. It is established that efficiency the developed compoundings of active elements with use chlorinated PVC considerably concedes on efficiency a base compounding. The composition containing hexachlorobenzene possess efficiency at level basic compoundings and can be recommended to application in complex technology of punching and one-time chemical processing of oil and gas layers.

References

1. Mokeev A.A., Sadykov I.F., Marsov A.A. technology of punching of oil wells a cumulative charge with throwed and chemically active elements //VII Zababahinsky scientific readings / theses of the international conference – Snezhinsk, RFJATS – VNIITF, 2003 – С. 29.
2. Chipiga S.V., Sadykov I.F., Marsov A.A., etc. the Device and technology for complex cumulative perforation and thermal and gas-chemical exposure processings of an oil well // X Zababahinsky scientific readings / theses international conference – Snezhinsk, RFJATS – VNIITF, 2010 – С. 48.
3. Mokeev A.A., Sadykov I.F., Marsov A.A., etc. Studying of the composition forming in process explosive transformation transformations halogen compounds with hydrogen // X Zababahinsky scientific readings / theses of the international conference – Snezhinsk, RFJATS – VNIITF, 2010 – С. 98.

1-4

КУМУЛЯЦИИ ЭНЕРГИИ ПРИ ДОДЕКАЭДРИЧЕСКОМ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ ШАРОВЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

В.И. Зельдович¹, Н.Ю. Фролова¹, А.Э. Хейфец¹,
Б.В. Литвинов², А.К. Музыря², А.Ю. Симонов²

¹Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия
²Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Заббахина,
Снежинск, Россия

Два шаровых образца диаметром 40 мм из метастабильной аустенитной хромоникелевой стали 12Х18Н10Т были подвергнуты квазисферическому взрывному нагружению. Каждый образец был окружен сферическим слоем ВВ ТГ5/5 толщиной 20 мм. На одном образце заряд ВВ подрывался в 12 точках, симметрично расположенных на поверхности ВВ в центрах граней виртуального додекаэдра. Разновременность инициирования ВВ составляла $0,8 \cdot 10^{-7}$ с. На другом образце одна из 12 точек инициирования была отключена, вследствие чего симметрия опыта была нарушена. Разновременность инициирования была почти на порядок больше и составляла $5 \cdot 10^{-7}$ с. Давление на поверхности шаров было по оценке 40 ГПа. Вся система нагружения помещалась в массивный корпус, предотвращающий разрушение образцов.

В первом (симметричном) опыте реализуются как регулярный, так и нерегулярный режимы взаимодействия ударных волн. При столкновении трех ударных

волн в вершинах додекаэдра формируются маховские конфигурации. При столкновении двух ударных волн на ребрах додекаэдра наблюдается регулярный режим столкновения. Маховская волна, возникающая при столкновении трех ударных волн, имеет форму шестилучевой звезды. Формирование маховских конфигураций в вершинах додекаэдра превращает первоначально додекаэдрическую форму ударно-волнового фронта в икосаэдрическую. Вследствие более высокой температуры в волне Маха в областях маховского взаимодействия микротвердость стали имеет более низкие значения по сравнению с соседними участками. Остаточная температура в центральной части шара превышает температуру плавления стали, 1770 К. Давление на внешней границе области плавления достигает 200 ГПа.

Во втором опыте, несмотря на нарушение симметрии, кумуляция тем не менее имеет место, однако максимальное значение давления достигается не в геометрическом центре шара, а в точке схождения ударных волн, смещенной относительно геометрического центра на 2 мм.

Работа выполнена по плану РАН (тема «Структура», № г.р. 01201064335), при поддержке Программы Президиума РАН «Теплофизика и механика экстремальных энергетических воздействий» и РФФИ (проект № 11-03-00047).

ENERGY CUMULATION AT DODECAHEDRAL EXPLOSIVE LOADING OF SPHERICAL STAINLESS STEEL SAMPLES

V.I. Zeldovich¹, N.Yu. Frolova¹, A.E. Kheifets¹,
B.V. Litvinov², A.K. Musyara², A.Yu. Simonov²

¹Institute of physics of metals, Ural Branch
of Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

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

Two spherical metastable austenitic chromium-nickel steel 12Kh18N10T samples with 40 mm in diameter have been subjected to quasispherical explosive loading. Each sample has been surrounded by a spherical layer of Explosive Substance (ES) TG5/5 with 20 mm in thickness. On the one sample the charge of ES was initiated in 12 points symmetrically located on the surface of ES in the centers of sides of a virtual dodecahedron. Unsynchronism of initiation was $0.8 \cdot 10^{-7}$ s. On the other sample one of 12 points of initiation has been disconnected, owing to what symmetry of experience has been broken. Unsynchronism of initiation was almost 10 times more and was $5 \cdot 10^{-7}$ s. Pressure upon surfaces of spheres was according to 40 GPa. The loading system was located in the massive case preventing destruction of samples.

In the first (symmetric) experience the both regular and irregular modes of shock waves interaction are realized. At collision of three shock waves in dodecahedron tops the Mach configuration are formed. At collision of two shock waves on dodecahedron edges the regular mode of collision is observed. The Mach wave arising at collision of three shock waves, has the form of a six-beam star. Formation of Mach configurations in dodecahedron tops transforms the originally dodecahedral form of the shock-wave front

in an icosahedral form. Owing to more high temperature in the Mach wave in the areas of Mach interactions the microhardness of steel has lower values in comparison with the next areas. The residual temperature in the central part of the ball exceeds temperature of a steel melting, 1770 K. The pressure on external border of the area of the melting reach 200 GPa.

In the second experience, despite symmetry infringement, the cumulation nevertheless takes place, however the maximum value of pressure is reached not in the geometrical center of a sphere, but in a point of a convergence of the shock waves, displaced concerning the geometrical center on 2 mm.

The work was performed according to Plan of the Russian Academy of Sciences (theme «Structure», № 01201064335), and was supported by the Program of Presidium of the Russian Academy of Sciences «Thermophysics and mechanics of extreme power influences» and RFBR (grant № 11-03-00047).

1-5

К УСТОЙЧИВОСТИ ИНЕРЦИОННОГО СХЛОПЫВАНИЯ ОБОЛОЧЕК, НАПОЛНЕННЫХ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТЬЮ

Ю.Г. Губарев, Н.А. Соколов

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

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «Новосибирский
государственный университет», Новосибирск, Россия

E-mail: gubarev@hydro.nsc.ru

Реалии сегодняшнего дня убедительно свидетельствуют о том, что в различных сферах жизни человеческого общества все в большей и большей степени находят себе применение разного рода высокоэнергетические процессы. К числу одних из самых ярких их представителей стоит, бесспорно, отнести так называемые кумулятивные процессы, которые сопровождаются концентрацией в точке, вдоль прямой или на плоскости силы, энергии либо иной физической величины [1, 2].

К сожалению, до сих пор кумулятивные процессы используются в приложениях, как правило, без осознания специфики всех их закономерностей и предельных возможностей [1]. Естественно, такое положение дел совершенно неприемлемо и требует скорейшего устранения, поскольку препятствует эффективному применению кумулятивных процессов.

В настоящей работе посредством прямого метода Ляпунова [3] и с позиций математической теории устойчивости [4] как раз и предпринимается попытка научиться получать нужную информацию о свойствах кумулятивных процессов на примере двух классических задач гидродинамики – инерционного схлопывания сферической и цилиндрической оболочек, наполненных однородной по плотности вязкой несжимаемой жидкостью.

На этом пути для первой задачи удалось установить необходимое и достаточное условие устойчивости сферически симметричного инерционного схлопывания

толстой сферической же оболочки относительно конечных возмущений того же типа симметрии, а для второй – доказать абсолютную устойчивость цилиндрически симметричного инерционного схлопывания цилиндрической же оболочки по отношению к конечным возмущениям той же симметрии.

Кроме того, на примере первой задачи проведено сопоставление полученных результатов с известными результатами, которые установлены асимптотическим методом [2]. Обнаружено, что результаты, полученные в настоящем докладе прямым методом Ляпунова, свободны от ограничения принципиального характера, которое присуще результатам, установленным асимптотическим методом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 2.1.1/9896).

Литература

1. Забабахин Е. И., Забабахин И. Е. Явления неограниченной кумуляции. М.: Наука, 1988. 173 с.
2. Тришин Ю. А. Физика кумулятивных процессов. Новосибирск: Изд-во Ин-та гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 2005. 324 с.
3. Ла-Салль Ж., Лэфшец С. Исследование устойчивости прямым методом Ляпунова: Пер. с англ. М.: Мир, 1964. 168 с.
4. Демидович Б. П. Лекции по математической теории устойчивости. М.: Наука, 1967. 472 с.

ON THE STABILITY OF INERTIAL COLLAPSE OF SHELLS FILLED WITH A VISCOUS FLUID

Yu.G. Gubarev, N.A. Sokolov

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia
Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia
E-mail: gubarev@hydro.nsc.ru

The realities of this day bring out clearly that high-energy processes of all kinds find an application for themselves in different fields of human society to an increasing extent. Among some of the brightest their representatives it is worth, no doubt, include the so-called cumulative processes, which are accompanied by concentration of force, energy or other physical quantities at a point, along a straight line or in a plane [1, 2].

Unfortunately, so far the cumulative processes are used in applications, as a rule, without understanding the specificity of all their laws and limit opportunities [1]. Naturally, this situation is totally unacceptable and requires the fastest removal as preventing the effective use of cumulative processes.

In the present work, by the direct Lyapunov method [3] and from standpoints of the mathematical stability theory [4], it is just an attempt to learn to get the necessary information about the properties of the cumulative processes on the example of two classical problems in hydrodynamics – the inertial collapse of spherical and cylindrical shells filled with a homogeneous in density viscous incompressible fluid.

In this way, for the first problem it was to establish the necessary and sufficient condition for stability of the spherically symmetric inertial collapse of a thick shell (spheri-

cal too) with respect to finite perturbations of the same type of symmetry, and for the second one – to prove the absolute stability of the cylindrically symmetric inertial collapse of a shell (cylindrical too) in relation to finite perturbations of the same symmetry.

In addition, by the example of first problem, we compare the results with the known results, which are established by the asymptotic method [2]. It was found that the results, obtained in the present report by the direct Lyapunov method, are free from the restriction of a fundamental nature, which is inherent in the results set by the asymptotic method.

This work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (the project No. 2.1.1/9896).

References

1. Zababakhin E. I., Zababakhin I. E. Phenomena of unlimited cumulation. Moscow: Nauka, 1988. 173 pp. (in Russian).
2. Trishin Yu. A. Physics of cumulative processes. Novosibirsk: Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Division of RAS Press, 2005. 324 pp. (in Russian).
3. La Salle J., Lefschetz S. Stability by Liapunov's direct method with applications. New York, London: Academic Press, 1961. 134 pp.
4. Demidovich B. P. Lectures on mathematical stability theory. Moscow: Nauka, 1967. 472 pp. (in Russian).

1-6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РАЗРАБОТКА ГИПЕРЗВУКОВОЙ ПУСКОВОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ КУМУЛЯТИВНОЙ ВЗРЫВНОЙ УДАРНОЙ ТРУБЫ

Дж. Луазо, Дж. Гюно, А.Дж. Хиггинс, С. Горошин

Университет МакДжилл, Монреаль, Канада
E-mail: jason.loiseau@mail.mcgill.ca

Высокая плотность энергии и удельная мощность взрывчатых веществ делают их привлекательными для разгона снарядов до очень высоких конечных скоростей. Типичным недостатком пусковых установок с взрывным разгоном является то, что снаряд, случайно или намеренно, подвергается воздействию очень сильного нагружения. Пусковая установка, представленная в настоящем исследовании, изолирует и амортизирует снаряд от прямого воздействия ВВ посредством газодинамического цикла, подобного тому, который используется в двухфазной газовой пушке.

Для газодинамического цикла пусковой установки метательное вещество с высокой энтальпией под высоким давлением подается ударной трубой [1, 2]. Эта ударная труба состоит из тонкостенной стальной трубки, находящейся в атмосфере гелия под давлением, и окруженной цилиндром ВВ, который в свою очередь заключен в толстостенную стальную трубу. Детонация ВВ приводит к последовательной имплозии тонкостенной трубы, что в свою очередь создает кумулятивную газовую струю и вводит ударную волну в газ перед взрывным пинчем. Этот газ поступает в массивную стальную секцию, которая динамически ограничивает метательное вещество по мере его расширения и выталкивания снаряда по пусковой трубе.

Модель лабораторного масштаба данного устройства успешно разогнала 0,6-граммовый снаряд до 7,9 км/с. Конструкция была также увеличена в масштабе для разгона 15-граммового снаряда до 7,6 км/с. Новые режимы работы, состоящие из частичной имплозии массивной стальной секции и продолжения имплозии пусковой трубы за снарядом были разработаны в Physics International Company в 1960-х гг. и продемонстрировали способность достичь даже более высоких скоростей – 12 км/с для 2-граммовых снарядов [3]. В данном исследовании представлены расчеты и эксперименты выполненные в ходе продолжающейся разработки пусковой установки.

Литература

1. «Explosion-driven shock-tubes (review)». High Temperature. V.B. Mintsev, V.E. Fortov. 1982. No. 4. (Vol. 20). 623.
2. «Dynamics of explosively imploded pressurized tubes». J. Appl. Phys. D. Szirti, J. Loiseau, A.J. Higgins, V. Tanguay. 2011. No. 8. (Vol. 109).
3. «High-velocity explosively driven guns». NASA CR-1533. J.D. Watson, 1970.

EXPERIMENTAL DEVELOPMENT OF A HYPERVELOCITY LAUNCHER EMPLOYING A CUMULATIVE EXPLOSIVE SHOCK TUBE

J. Loiseau, J. Huneault, A.J. Higgins, S. Goroshin

McGill University, Montreal, Canada

E-mail: jason.loiseau@mail.mcgill.ca

The large energy and power densities of high explosives make them attractive for use in launching projectiles up to very high terminal velocities. A typical drawback of explosively driven launchers is that very high loadings are exerted on the projectile, either incidentally or by design. The launcher presented in this study isolates and cushions the projectile from direct action of the high explosive by means of a gasdynamic cycle similar to that of a two stage light gas gun.

High pressure, high enthalpy propellant for the gasdynamic cycle of the launcher is provided by an explosive shock tube [1, 2]. This shock tube consists of a thin-wall steel tube pressurized with helium and surrounded by a cylinder of high-explosive that is in turn confined by a thick-wall steel pipe. Detonation of the explosive results in the sequential implosion of the thin-wall tube, which in turn produces a cumulative gas jet and drives a shockwave into the gas ahead of the explosive pinch. This gas is fed into a massive steel section which acts to dynamically confine the propellant as it expands against the projectile during its travel down the launch tube.

A laboratory scale version of this device has successfully launched a 0.6 gram projectile to 7.9 km/s. The design has also been scaled up to launch a 15 gram projectile to 7.6 km/s. Novel modes of operation, consisting of partially imploding the massive steel section and continuing to implode the launch tube behind the projectile, were developed by the Physics International Company in the 1960ies and demonstrated the ability to reach even higher velocities of 12 km/s for 2 gram projectiles [3]. This

study presents the computational and experimental work performed in the ongoing development of the launcher.

References

1. «Explosion-driven shock-tubes (review)». High Temperature. V.B. Mintsev, V.E. Fortov. 1982. No. 4. (Vol. 20). 623.
- 2.»Dynamics of explosively imploded pressurized tubes». J. Appl. Phys. D. Szirti, J. Loiseau, A.J. Higgins, V. Tanguay. 2011. No. 8. (Vol. 109).
3. «High-velocity explosively driven guns». NASA CR-1533. J.D. Watson, 1970.

1-7

МИКРОСКОПИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫБРОСА ЧАСТИЦ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ УДАРНО-НАГРУЖЕННОГО СВИНЦА

Н.В. Невмержицкий, А.Л. Михайлов, В.А. Раевский,
В.С. Сасик, Ю.М. Макаров, Е.А. Сотсков, А.В. Руднев,
В.В. Бурцев, С.А. Лобастов, А.А. Никулин,
Е.Д. Сеньковский, С.А. Абакумов, О.Л. Кривонос,
А.А. Половников, О.Н. Априлков

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

E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

При выходе достаточно сильной ударной волны на свободную поверхность конденсированного материала, происходит выброс частиц материала с этой поверхности. Этот процесс называют еще «пылением» материала. Процесс «пыления» может существенно влиять на работу мишеней инерциального термоядерного синтеза.

В работе представлены результаты микроскопической электронно-оптической регистрации процесса выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженного свинца, имеющей разную степень шероховатости (Rz80, Rz20, Rz5), после выхода на поверхность ударной волны с давлением ≈ 15 ГПа.

Регистрация процесса осуществлялась через систему с относительно большим коэффициентом оптического увеличения. Для подсветки процесса использовался короткий (4 нс) лазерный импульс. Частицы измерялись на ПЭВМ в двух взаимоперпендикулярных направлениях.

В экспериментах зарегистрированы частицы размером от 3 мкм, движущиеся со скоростью $\approx 1,5$ мм/мкс.

Показано, что:

- с уменьшением шероховатости свободной поверхности свинца от 80 до 5 мкм, средний размер частиц уменьшается от 30 до 15 мкм;
- при шероховатости поверхности ≈ 20 и ≈ 5 мкм происходят откольные явления, частицы находятся и между откольными фрагментами.

**MICROSCOPIC
ELECTRON-OPTICAL RECORDING
OF PARTICLE EJECTA FROM FREE SURFACE
OF SHOCK-LOADED LEAD**

N.V. Nevmerzhitsky, A.L. Mikhailov, V.A. Raevsky,
V.S. Sasik, Yu.M. Makarov, E.A. Sotskov, A.V. Rudnev,
V.V. Burtsev, S.A. Lobastov, A.A. Nikulin,
E.D. Senkovskiy, S.A. Abakumov, O.L. Krivonos,
A.A. Polovnikov, O.N. Aprel'kov

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

E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

It is known that after relatively strong shock wave arrival to the free surface of condensed matter, particle ejecta occurs from this surface. This process is also called «dusting» of material. The process of particle ejecta can significantly effect on the processes in the targets of inertial thermonuclear fusion.

The authors present results of microscopic electron-optical recording of particle ejecta from free surface of shock-loaded lead with different roughness levels (Rz80, Rz20, Rz5), after shock wave arrival to the surface at pressure of ≈ 15 GPa.

The process was recorded by video camera through a system with relatively high optical magnification coefficient. Short laser pulse (4 ns) was used for illumination of the process. The particles were measured in two perpendicular directions using PC.

Moving particles with sizes of 3 μm and more and velocities of ≈ 1.5 mm/ μm were recorded.

It is shown that:

- when free surface roughness of lead decreases from 80 μm to 5 μm , the average particle size decreases from 30 μm to 15 μm ;
- in experiments with the surface roughness ≈ 20 μm and ≈ 5 μm spall phenomena can be observed; there are particles between spall fragments при шероховатости.

1-8

**ЛОКАЛИЗАЦИЯ ТЕПЛА
ПРИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ
КОНСОЛИДАЦИИ ПОРОШКОВ**

Е.Г. Григорьев¹, Е.А. Олевский^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», Москва, Россия

²Государственный университет Сан-Диего, Сан-Диего, Мексика

E-mail: eggrigoryev@mephi.ru, eolevsky@mail.sdsu.edu

Уникальные возможности электроимпульсных методов консолидации порошковых материалов обусловлены широким диапазоном электрофизических параметров воздействия на порошковую заготовку. Достоинства этих методов удается реализовать при оптимальных параметрах электроимпульсной консолидации, так как интенсивное электротепловое воздействие на порошковый материал способно приводить к неустойчивости процесса уплотнения, формированию неоднородной

структуры материала и даже к разрушению получаемого изделия и технологической оснастки. Ключевую роль в электроимпульсной консолидации играют нестационарные тепловые процессы на межчастичных контактах порошкового материала. Электрическое сопротивление контактов нелинейно зависит от свойств поверхностных пленок на частицах, прикладываемого к ним давления и параметров импульсов тока. Характер тепловых процессов в межчастичных контактах оказывает существенное влияние на распределение температуры во всем объеме консолидируемого материала. В результате проведенных исследований выявлены различные тепловые режимы межчастичных контактов при электроимпульсной консолидации. Напряжение, приложенное к образцу в начале процесса, должно обеспечивать пробой поверхностных окисных пленок во всем объеме образца. Величина внешнего приложенного давления определяет начальное сопротивление межчастичных контактов и, следовательно, мощность тепловых источников в контактах между частицами порошка. При оптимальных параметрах процесса происходит очистка порошковых частиц от поверхностных пленок посредством электрических микровзрывов первичных контактных пятен. Критическая плотность тока j^* зависит от размера первичного контактного пятна а следующим образом: $j^* \sim a^{3/2}$. При этом реализуется достаточно однородный нагрев всего объема образца. При более низких давлениях в порошковом материале происходит формирование локальных токопроводящих каналов, имеющих более высокую температуру по сравнению с остальным объемом образца. Это приводит к формированию неоднородной структуры консолидируемого материала на заключительной стадии процесса. При давлениях, превышающих оптимальные значения, температура межчастичных контактов недостаточна для того, чтобы разрушить поверхностные пленки на частицах, что негативно сказывается на свойствах консолидируемого образца. В настоящей работе проведен расчет тепловых процессов в межчастичных контактах при электроимпульсной консолидации порошков и определены параметры процесса, при которых реализуются режимы локализации тепла в контактной зоне. Действие мощных источников тепла приводит к локальному плавлению межчастичных контактов с последующей высокоскоростной кристаллизацией расплава. Действие источников меньшей мощности локально повышает пластичность материала в межчастичных контактах и вызывает последующую интенсивную деформацию контактных областей. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными данными.

**HEAT LOCALIZATION DURING ELECTRIC
PULSE POWDER CONSOLIDATION**

E.G. Grigoryev¹, E.A. Olevsky^{1,2}

¹National Research Nuclear University «MEPhI»,
Moscow, Russia

²San Diego State University, San Diego, Mexico

The unique capabilities of the electric pulse consolidation methods are rendered by a broad range of electric-physical parameters of the powder specimen treatment. The advantages of these approaches can be utilized under

optimal values of the electric pulse consolidation parameters, since the intense electro-thermal treatment of powder materials may lead to the instability of the densification process, to the formation of a heterogeneous material structure, and even to the destruction of the processed part or of the tooling. Heat processes at the inter-particle contacts play a key role in the electric pulse consolidation. The electric resistance of the contacts depends non-linearly on the properties of the particle surface films, on the applied pressure, and on the electric current pulse parameters. The nature of the thermal processes occurring within inter-particle contacts significantly influences the temperature distribution in the whole consolidated volume. As a result of the conducted studies, various inter-particle contact heating regimes are identified. The initially applied voltage has to provide the dielectric breakdown of the surface oxide films in the specimen's volume. The magnitude of the externally applied pressure controls the initial resistance of the inter-particle contacts, and in turn, the power of the heat sources between powder particles. Under optimal process conditions, powder particle surface film cleansing takes place through the electric micro-explosions of initial contact spots. The critical electric current density j^* depends on the size of the initial contact spot as: $j^* \sim a^{3/2}$. Thereby a sufficiently uniform heating of the whole specimen's volume occurs. Under lower pressures, local conductive channels, having higher temperature compared to the rest of the specimen's volume, are formed. This causes the formation of the heterogeneous structure of the consolidated material at the final stage of the process. For the pressure levels exceeding the optimal values, the inter-particle contact temperature is insufficient to destroy the particle surface films, which has a negative impact on the consolidated specimen properties. In the present study, a numerical analysis of the thermal processes occurring within the inter-particle contacts under electric pulse consolidation is carried out, and the process parameters, for which the heat localization in contact zones takes place, are determined. The engagement of powerful heat sources causes local melting of the inter-particle contacts followed by high-rate melt crystallization. The involvement of the heat sources of the lower power level locally increases the ductility of the material within the inter-particle contacts and causes the intensive deformation of the contact zones. The results of the numerical calculations are compared to experimental data.

1-9

ПРОЦЕССЫ ФРАГМЕНТАЦИИ, ПЕРЕМЕШИВАНИЯ И РАСПЛАВЛЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

Б.А. Гринберг¹, М.А. Иванов²,
В.В. Рыбин³, А.В. Иноземцев¹

¹Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова,
НАН Украины, Киев, Украина

³Санкт-Петербургский государственный политехнический
университет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: bella@imp.uran.ru; maivanov@imp.ua;
rybin.spb@gmail.com

При всем многообразии материалов и режимов сварки центральной является проблема перемешивания в переходной зоне вблизи границы раздела. Именно структура переходной зоны определяет возможность сцепления обоих материалов. Но до сих пор остается неясным, каким образом успевает произойти перемешивание за столь короткое время (10^{-6} – 10^{-7} с), пока длится сварка. Были исследованы соединения разнородных металлов (титан-орторомбический алюминид титана разных составов, медь-тантал, железо-серебро), которые сильно отличаются друг от друга и по температурам плавления, и по твердости, и по взаимной растворимости. Для пар (медь-тантал, железо-серебро) она практически отсутствует. Использовались разные режимы сварки. Исследование структуры переходной зоны проводилось посредством электронной микроскопии (сканирующей и просвечивающей). Наблюдались границы раздела различных типов: как плоские, так и волнообразные. Общим процессом для всех исследуемых соединений является фрагментация типа дробления (ФТД), впервые обнаруженная авторами. Мы полагаем, что ФТД представляет собой бездиффузионный процесс разбиения на разориентированные микрообъемы, которые испытывают стыковку. Для всех исследуемых соединений ФТД наблюдается вблизи границы раздела, в отличие от традиционной фрагментации вне переходной зоны, включающей накачку дислокаций и последующие структурные превращения. Мы полагаем, что ФТД успевает произойти за времена порядка времени взрыва, тогда как традиционная фрагментация происходит при остаточных температурах и напряжениях. Возможным сценарием формирования зон локального расплавления является следующий: вблизи границы раздела в местах, где внешнее воздействие является особо сильным, происходит ФТД обоих металлов. Трение между фрагментами инициирует превращение вводимой при взрыве энергии в тепло. Расплавление же испытывает только легкоплавкий материал. Циркуляция обеспечивает перемешивание расплава. В результате, как показал химический СЭМ анализ, зоны локального расплавления при наличии взаимной растворимости – истинные растворы; в отсутствии взаимной растворимости – коллоидные растворы типа суспензий. При этом могли бы образовываться вихри, как например, для соединений титан-алюминид титана. Но для пар медь-тантал, железо-серебро вихри не наблюдались, возможно, из-за

эффективного повышения вязкости расплава, благодаря твердым частицам. Зоны локального расплавления представляют собой «вставки», имеющие другую структуру по сравнению с окружением. В зависимости от структуры «вставок», они могут представлять или, напротив, не представлять опасность для прочности сварного соединения.

FRAGMENTATION, MIXING AND MELTING PROCESSES DURING EXPLOSION WELDING

B.A. Greenberg¹, M.A. Ivanov²,
V.V. Rybin³, A.V. Inozemtsev¹

¹Institute of metal physics RAS UB, Yekaterinburg, Russia

²Kurdyumov Institute of Metal Physics, NAS of Ukraine,
Kiev, Ukraine

³State Polytechnical University, St. Petersburg, Russia

E-mail: bella@imp.uran.ru; maivanov@imp.ua;
rybin.spb@gmail.com

With all variety of materials and welding regimes, the main problem is intermixing in the transition zone near the interface. It is the structure of the transition zone that determines bonding of materials in welding. But how the metals have time to mix in such short (10^{-6} – 10^{-7} s) welding time still remains unclear. We investigated the junction of dissimilar metals (titanium-titanium orthorhombic aluminide with different compositions, copper-tantalum, iron-silver, etc.) that are very different from each other both by melting point and hardness. Also, welded pairs differ from each other by mutual solubility of metals. For some of them (copper-tantalum, iron-silver) there is no mutual solubility. We used different modes of welding. The study of the transition zone microstructure was conducted employing both transmission and scanning electron microscopy. Different types of interfaces were observed: flat boundaries and wavy boundaries. A common process for all the studied joints is fragmentation of granulation type (FGT) that was first observed by the authors. We think that FGT is a diffusionless process of decomposition into disoriented microvolumes, that experience linkage. FGT is observed near the interface for all the studied joints unlike the traditional fragmentation (outside the transition zone) that includes both pumping of dislocations and their transformation. We believe that FGT has time to take place during the explosion, while the traditional fragmentation occurs at residual stresses and temperatures. A possible scenario for the local melting zones formation is as follows: near the interface, in areas where external influence is particularly strong, FGT of both metals occurs. Friction between the fragments initiates transformation of the input explosion energy into heat. Melting occurs only for a low melting material. Circulation provides mixing of the melt. As a result the electron-probe analysis of the chemical composition has shown that those local melting zones, where metals have mutual solubility, form true solutions; in the absence of solubility, these zones represent colloidal solutions (suspensions). In this case the vortices could be formed, as for example, for titanium-titanium aluminide junctions. But for pairs of copper-tantalum and iron-silver vortices were not observed, possibly due to an effective increase in the melt viscosity, due to hard particles. The local melting zones are sort of «inserts» with a different structure in comparison with the surrounding ma-

terial. Depending on the structure of the «inserts», they may represent or, conversely, may not represent a danger to the strength of welded joints.

1-10

ОБ УСЛОВИЯХ ФРАГМЕНТАЦИИ ПРОТОЗВЕЗДНЫХ ОБЛАКОВ

А.Е. Дудоров, С.Н. Замоздра
Челябинский государственный университет,
Челябинск, Россия
E-mail: sezam@csu.ru

С помощью трехмерного численного моделирования исследуются изотермические стадии коллапса замагниченных вращающихся турбулентных протозвездных облаков. Основное внимание в работе уделяется эволюции возмущений плотности, создаваемых МГД турбулентностью внутри облаков. Предполагается, что в процессе коллапса облака наиболее массивные уплотнения в его центральной части могут стать гравитационно связанными, что может вызывать фрагментацию (деление) облака.

Расчеты показывают, что фрагментация происходит при выполнении двух условий:

1. Эффективный диаметр каждого уплотнения превосходит критическую длину гравитационно неустойчивых быстрых магнитозвуковых волн.

2. Отношение вращательной энергии группы уплотнений к модулю гравитационной энергии группы превышает $\sim 0,1$.

Условие 1 достигается при увеличении плотности на 2 и более порядков. Условие 2 может достигаться как раньше, так и позже условия 1, в зависимости от значений крупномасштабной и турбулентной составляющих скорости вращения.

ABOUT FRAGMENTATION CONDITIONS OF PROTOSTELLAR CLOUDS

A.E. Dudorov, S.N. Zamozdra
Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia
E-mail: sezam@csu.ru

The isothermal collapse of magnetized rotating turbulent protostellar clouds is investigated with the help of three-dimensional numerical modeling. The most attention in the work is paid to the evolution of density perturbations, created by MHD turbulence inside the clouds. It is suggested that most massive clumps in the central region of the cloud may become gravitationally bound that can initiate the fragmentation (fission) of the cloud.

The computations show that fragmentation occurs under two conditions:

1. The effective diameter of every clump exceeds the critical wavelength of gravitationally unstable fast magnetosonic waves.

2. The ratio of rotational energy of clumps to the absolute value of their gravitational energy exceeds ~ 0.1 .

The condition 1 is reached when density increases by 2 and more orders of magnitude. The condition 2 can be achieved both before and after conditions 1, depending

on the values of large-scale and turbulent components of rotational velocity.

1-11

О ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЯХ ПАДЕНИЙ КРУПНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ

А.А. Баренбаум¹, М.И. Шпекин²

¹Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия

²Казанский федеральный университет, Казань, Россия

E-mail: azary@mail.ru; Michael.Shpekin@ksu.ru

Согласно современным теоретическим моделям импактного кратерообразования, при падении крупных космических тел: астероидов и комет на твердую поверхность планет всегда возникает многокилометровый кратер. При этом у очень высоко энергетических ударников основная часть кинетической энергии (~80%) расходуется на образование кратерной воронки, ~10–20% энергии идет на плавление пород и ~1–5% на их испарение [1]. Потери энергии на многие другие сопровождающие удар процессы считаются малыми, и в теоретических моделях кратерообразования обычно не учитываются.

В сообщении обращается внимание на то, что космические тела, обладающие очень высокой энергией, значительную ее часть расходуют на создание под местом импакта крупных магматических камер, функционирующих миллионы лет после падения тела. В качестве примера приведен современный вулкан [2], обнаруженный нами в кратере Циолковский на обратной стороне Луны. Кратер диаметром 180 км залит застывшей лавой. Возраст кратера по нашим данным 1–2 млн лет. На днище кратера имеется ~10 м плюмовое возвышение диаметром 36 км, в центре которого находится действующий вулкан высотой 102 м. Согласно нашим оценкам, под днищем кратера в настоящее время имеется активная магматическая камера объемом ~100 км³ [3].

В докладе также обсуждаются другие геологические процессы [4], которые могут явиться тектоническими последствиями падений на планеты крупных космических тел.

Литература

1. Мелош Г. Образование ударных кратеров. Геологический процесс. М.: Мир. 1994. 336 с.
2. Shpekin M.I. The Last «Apollo» Orbit Pass over the Tsiolkovsky Crater // Intern. Conf.: Astronomy and World. Heritage: Across Time and Continents, Kazan. Russia. 2009. P. 219–221.
3. Баренбаум А.А., Шпекин М.И. Плюмовая тектоника на Луне и на Земле: сравнительный анализ // Геология морей и океанов: Материалы XIX Межд. науч. конф. (школы) по морской геологии. Т. V. М.: ГЕОС. 2011. С. 23–27.
4. Barenbaum A.A., Shpekin M.I. About the time formation relief of surface the Moon and terrestrial planets // Труды Международного астрономического конгресса «ASTROKAZAN-2011». Казань: Изд. КФУ. 2011. С. 266–267.

ABOUT THE TECTONIC AFTEREFFECTS OF FALLINGS LARGE COSMIC BODIES

A.A. Barenbaum¹, M.I. Shpekin²

¹Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Science (OGRI RAS), Moscow, Russia

²Kazan Federal University, Kazan, Russia

E-mail: azary@mail.ru; Michael.Shpekin@ksu.ru

According to current theoretical models in result fallings of large cosmic bodies: asteroids and comets onto solid surface planets always appear crater by diameter in several kilometers. At thus very high energy bodies are losing most part of its kinetic energy (~80%) on creating of crater, ~10–20% of energy goes into melting the rocks and ~1–5% into their evaporation [1]. Energy losses of most other processes accompanying strike are small, and in theoretical models of impact cratering is usually not taken into account.

The report draws attention to the fact that the cosmic bodies, which have very high energy, consume its significant part on generation large magma chambers, which operate for millions of years after the fall of the body. We make example modern volcano detected by us in the crater Tsiolkovsky on the reverse side of the Moon [2]. Crater diameter of 180 km is filled solidified lava. Crater's age on our data is 1–2 million years. At the bottom of the crater there is the plume rise of height 10 m and diameter 36 km with the active volcano of height 102 m in centered. According to our estimates, active magmatic chamber in volume ~100 km³ is located at the present time under crater's bottom [3].

The report also discusses other geological processes [4] that may be initiated by tectonic aftereffects of fallings large cosmic bodies onto solid surface planets.

References

1. Melosh H.J. Impact Cratering. A Geologic process. Oxford University Press. New York. 1989.
2. Shpekin M.I. The Last «Apollo» Orbit Pass over the Tsiolkovsky Crater // Intern. Conf.: Astronomy and World. Heritage: Across Time and Continents, Kazan. 2009, p. 219–221.
3. Barenbaum A.A., Shpekin M.I. Plume tectonics on the Moon and Earth: Comparative analysis // Geology of Seas and Oceans: XIX Intern. Sci. Conf. (School) on Marine Geology. V. 5. Moscow: GEOS. 2011, p. 23–27.
4. Barenbaum A.A., Shpekin M.I. About the time formation relief of surface the Moon and terrestrial planets // Proceedings of the International Astronomical Congress «ASTROKAZAN-2011». Kazan. Publish. Kazan Univ. 2011, p. 266–267.

1-12

**ДИНАМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ
РАСПЛАВЛЕННОГО И ТВЕРДОГО МЕТАЛЛОВ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПАДАЮЩИХ
ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН**

Жан Чонгью, Ху Хайбо, Тан Тъеган,
Ван Янпин, Ли Кинжон

Лаборатория физики ударных волн и детонации,
Научно-исследовательский институт физики жидких сред,
КАИФ, Китай

Изучается динамическое поведение свинца под воздействием падающих детонационных волн в сравнении с поведением сплавов Cu и W.

Высокоскоростная покадровая съемка и импульсная радиография показали, что в районе столкновения свинцового фляера образуется струеобразный выброс.

Длина выброса стремительно увеличивается от миллиметрового до сантиметрового размера из-за существенных градиентов скорости материальных частиц внутри тела выброса.

Регистрируются многослойные структуры выброса, которые отражают элементы ударноволновых фронтов внутри фляера и параметры разрушения и плавления. Типичные массовые плотности внутри структуры выброса, зафиксированные импульсной радиографией, оцениваются примерно в 1–10% от начальной плотности свинца.

Динамическая прочность и ударное плавление должны играть решающую роль на начальном этапе формирования выброса. Процессы кавитации и фрагментации внутри расплавленного или почти расплавленного свинцового фляера в области столкновения протекают в субмикросекундном интервале, во время которого сплошная среда переходит в пористое и дисперсное состояние под воздействием интенсивной волны растяжения при разгрузке, и предварительно определяется картина дальнейшей эволюции выброса на более поздних этапах экспериментальной диагностики. Вертикальные пучки в короновидной форме выброса, вызванные неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца в свинцовом фляере, могут ясно наблюдаться при более интенсивном нагружении. В районе столкновения фляера из Cu и W также наблюдается струевидный выброс, что отражает многомерный механизм откола в нерасплавляющемся металле с его собственными сопротивлением разрушению и текучести.

**DYNAMIC BEHAVIOR
OF MOLTEN AND SOLID METALS DRIVEN
BY HEAD-ON DETONATION WAVES**

Zhang Chongyu, Hu Haibo, Tang Tiegang,
Wang Yanping, Li Qinzhang

Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics
Research, Institute of Fluid Physics, CAEP,
Mianyang, China

The dynamic behavior of Pb driven by head-on sweeping detonation waves is studied in comparison with the behavior of Cu and W alloy. High-speed frame

photography and pulsed X-ray radiography records have shown that a jet-like spiking is formed in the collision region of Pb flyer and the length of spiking extends rapidly from mm to cm size because of the significant speed gradients of mass particles inside the spiking body. Multi-layered structures of the spiking are recorded, which reflect the details of shock wave fronts inside the flyer and the melting, fracture related parameters. The typical mass densities inside the spiking structure fixed by the pulsed X-ray radiography are evaluated as about 1%–10% of the initial density of Pb. The dynamic strength and shock melting should have played a dominant role in the initial spiking formation stage. The cavitation and fragmentation process inside the molten or near molten Pb flyer in the collision region elapse only in sub-microsecond, during which the continuum of shocked Pb turns into porous and dispersed state under intense tensional release wave and the later evolution pattern of the spiking at the late stages of experimental diagnostics is preliminarily defined. The vertical bundles in the crown-like spiking pattern caused by K-H instabilities in Pb flyer can be clearly observed under more intense loading. In the collision region of Cu and W flyer jet-like spiking is also observed, which reflects multi-dimensional spalling mechanism in un-melting metal with its own flow strength and fracture strength.

1-13

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЫБРОСОВ (ПЫЛЕНИЯ) НА ПОВЕРХНОСТИ
СВИНЦА**

Чен Йонтао, Ху Хайбо, Тан Тъеган,
Рен Гуову, Ли Чинжон

Лаборатория физики ударных волн и детонации,
Научно-исследовательский институт физики жидких сред,
КАИФ, Китай

Работа посвящена исследованию динамических свойств выбросов (пыления) с поверхности мишени из расплавленного свинца под действием взрывной ударной волны. В исследовании показано, что облако выбросов, которое распространяется с поверхности, подвергшейся ударно-волновому воздействию, характеризуется высокой плотностью и низкой скоростью слоя фрагментов между свободной поверхностью и высокоскоростными частицами выбросов типа микроструй. Этот слой медленных, плотных выбросов является частицами жидкости типа микрооткола. Свойства этого слоя микрооткола, такие как масса, плотность и скорость диагностировались при помощи новой методики (окно Asay), а частицы микроструй – пьезоэлектрическими штырьками из ниобата лития и высокоскоростной фотографией. Представлено общее массоскоростное распределение выбросов, включая фрагменты микрооткола и частицы микроструй.

EXPERIMENTAL STUDY OF EJECTA ON LEAD SURFACE

Chen Yongtao, Hu Haibo, Tang Tiegang,
Ren Guowu, Li Qingzhong

Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research.
Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang, Sichuan, China

This effort investigates the dynamic properties of ejecta from explosively shocked, molten Pb target surface. The study shows that the ejecta cloud that expands beyond the shocked surface is characterized by a high density and low velocity fragment layer between the free-surface and the high velocity micro-jetting type ejecta particles. This slow, dense ejecta layer is micro-spall type liquid particles. The properties of micro-spall layer, such as the mass, density and velocity, were diagnosed in a novel application of the Asay window, while micro-jetting particles by lithium niobate piezoelectric pins and high speed photography. The total mass-velocity distribution of ejecta, including micro-spall fragments and micro-jetting particles, is presented

1-14

ОБ УНИВЕРСАЛЬНОСТИ И МНОГООБРАЗИИ ТЕЧЕНИЙ С ОДНОРОДНОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ НА ПРИМЕРЕ ИДЕАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ

А.Д. Зубов, М.А. Зубов

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: adzubov@mail.ru

В докладе рассматриваются многомерные течения сплошной среды с однородной деформацией (ОД), характеризующиеся аффинной связью эйлеровых и лагранжевых координат, которая сводится к полю скоростей, пропорциональных координатам. Получающиеся в результате динамические системы обладают целым рядом нетривиальных свойств, приводящих к многообразию классов точных, в известном смысле, решений.

Первыми в большом числе работ, посвященных движениям сплошной среды с ОД, были классические работы Дирихле, Дедекинда, Римана и Ляпунова по динамике несжимаемых гравитирующих жидких эллипсоидов (см. [1]). Класс таких решений постоянно расширялся, появлялись новые применения. Оказалось, что такие решения допускают обобщения, выходящие за рамки идеального гидродинамического течения, с включением различных физических полей (гравитационного, электромагнитного), с учетом неадиабатических процессов (энерговыведения, теплопроводности, электропроводности и т. д.).

Движения с ОД могут приводить к разлету вещества, пульсациям (в том числе хаотическим [2], даже в случае бездиссипативной сплошной среды) или к несимметричному (в общем случае) коллапсу. Таким образом, этот класс решений является еще одним примером того, что неограниченная кумуляция может иметь место и для многомерных течений (см. [3]).

Перспективным представляется нетривиальное применение таких решений в качестве локальной, кусочно-линейной (по скорости) аппроксимации произвольного неоднородного течения сплошной среды (по крайней мере, непрерывного или регулярного, т. е. без ударных волн) и развития на этой основе принципиально нового численного метода решения задач механики сплошной среды [4].

Литература

1. А.Д. Зубов, В.А. Симоненко. Магнитогазодинамические течения с однородной деформацией. / Препринт РФЯЦ – ВНИИТФ № 56, г. Снежинск, 1997 г., 32 с.
2. А.Д. Зубов, В.А. Симоненко. О стохастичности движений с однородной деформацией. / ВАНТ, сер. Теоретическая и прикладная физика, 1987 г., № 2, с. 45–56.
3. Е.И. Забабахин, И.Е. Забабахин. Явления неограниченной кумуляции. – М.: Наука, 1988. 173 с.
4. А.Д. Зубов, К.Е. Хатунцев. Метод решения многомерных задач механики сплошной среды на основе теории движений с однородной деформацией. / Тезисы Междунар. Конференции «VII Забабахинские научные чтения». – Снежинск: Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2005, с. 203–204.

ABOUT UNIVERSALITY AND VARIETY OF FLOWS WITH HOMOGENEOUS DEFORMATION ON THE EXAMPLE IDEAL MAGNETIC GASDYNAMICS

A.D. Zubov, M.A. Zubov

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

E-mail: adzubov@mail.ru

The paper considers multidimensional continuous flows with homogeneous deformation (HD), characterized by the affine relationship between Eulerian and Lagrangian coordinates, which reduces to a field of velocities proportional to coordinates. The resulted dynamic systems have a number of nontrivial properties which give a diversity of solutions that are exact in a way.

Classical works by Dirichlet, Dedekind, Riemann and Lyapunov on dynamics of incompressible gravitating liquid ellipsoids (see [1]) were the first in the great number of studies devoted to continuous flows with HD. The class of these solutions and their application continuously extended. It has been found that they allow generalizations which are beyond the ideal hydrodynamic flow and include different physical fields (gravitational, electromagnetic) and non-adiabatic processes (energy release, heat conduction, electrical conduction etc).

Flows with HD may lead to matter expansion, pulsations (including chaotic [2] even if continuum is dissipation free), or (generally) asymmetric collapse. Thus this class of solutions is one more example that unbounded cumulation may also occur in multidimensional flows (see [3]).

It seems promising and nontrivial to apply these solutions as a local piece-wise linear (with respect to velocity) approximation of non-uniform continuum flows (at least, continuous or regular, i. e., without shocks) and use them for the development of an essentially new method for continuous mechanics calculations [4].

References

1. A.D. Zubov, V.A. Simonenko. Magnetogasdynamic flows with uniform deformation. / Preprint RFNC – VNIITF № 56, Snezhinsk, Russia, 1997, 32 p. (In Russian).
2. A.D. Zubov, V.A. Simonenko. On stochasticity of motions with uniform deformation. / VANT, ser. Theoretical and Applied Physics, 1987, № 2, p. 45–56. (In Russian).
3. E.I. Zababachin, I.E. Zababachin. The phenomena of unlimited cumulation. – Moscow: Nauka, 1988. 173 p. (In Russian).
4. A.D. Zubov, K.E. Khatuntsev. A method of the solution of multi-dimensional continuum mechanics problems / Abstracts of «VII Zababachin Scientific Talks». – Snezhinsk, Russia, 2005, p. 203–204.

1-15

ПАРАДОКСЫ СИЛЬНЫХ ВЗРЫВНЫХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ

С.Н. Куличков, С.И. Косяков

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,
Москва, Россия

E-mail: ksi1972.02@mail.ru

На основе систематизации опытных данных, полученных при взрывах в атмосфере зарядов различной мощности W , лазерном и электрическом пробое, делается вывод о существовании значимого эффекта расширения фронтальной области взрывной волны по мере ее распространения в атмосфере. Констатируются факты энергетического подобия ширины фронтальной области Δ_R в очень широком диапазоне энергии $W \sim (10^{-8} \dots 10^7)$ кг ТНТ и ее значительный линейный размер, превышающий теоретические оценки Ландау, Зельдовича и Тейлора на 4 порядка.

Указанные экспериментальные данные противоречат хорошо известному эффекту опрокидывания волны конечной амплитуды по Риману, полученному в рамках классических уравнений газовой динамики. Второй парадокс состоит в том, что вступление сильной взрывной волны, являющееся слабым разрывом, распространяется со сверхзвуковой скоростью D по покоящейся среде. Однако в соответствии с классической газовой динамикой слабый разрыв должен распространяться с местной скоростью звука c_0 . С непрерывностью сжатия газа и большой шириной фронтальной области ΔR связан еще один парадокс – в рамках классических представлений об адиабатическом процессе в идеальной или вязкой среде невозможно объяснить эффект возрастания энтропии на фронте сильной взрывной волны.

Приведенные опытные факты нельзя объяснить в рамках молекулярно-кинетического механизма, турбулентного перемешивания в сдвиговом течении, присутствием частиц пыли в воздухе или влиянием пограничного слоя. Предполагается, что физический механизм, приводящий к расширению фронтальной области состоит в развитии специфической неустойчивости Кельвина-Гельмгольца при быстром сжатии газа во фронте волны. В результате развития неустойчивости происходит нелокальное перемешивание (мезодиффузия) воздуха, которое и является непосредственной причиной расширения фронта волны сжатия. Данный

механизм индифферентен по отношению к природе источника волновых возмущений, поскольку связан со свойствами и природой высокоскоростного деформирования газов. Учет предлагаемого механизма диффузионно-конвективного обмена на мезоуровне позволяет разрешить рассмотренные парадоксы, в том числе и парадокс энтропии.

PARADOXES OF THE STRONG BLAST WAVES IN ATMOSPHERE

S.N. Kulichkov and S.I. Kosyakov

A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics,
Moscow, Russia

E-mail: ksi1972.02@mail.ru

The results of statistical processing of the available experimental data for explosion sources of various power W , for laser induced breakdown and electrical discharge in air revealed essential effect of blast wave front region expansion during wave propagation. The facts of power W similarity of the width of front region Δ_R over a wide energy range $W \sim (10^{-8} \dots 10^7)$ kg TNT and its significant linear size Δ_R exceeding theoretical estimations Landau, Zel'dovich and Taylor on 4 orders are marked.

These experimental data contradict the well-known finite-amplitude wave breaking according to Riemann. This form a first paradox. The second paradox consists that the continuous strong blast wave arrival represents a weak jump and propagate with supersonic speed D on a based environment. However in accordance with classical theory a weak jump must propagate with local sonic speed c_0 . The third paradox follows from the fact that gas parameters continuously (not shock!) changed in front region and the fact of great size Δ_R of front region. Namely, using these facts and usual assumption about adiabatic process we cannot explain the entropy growth in front of strong blast wave in a gas in terms of ideal or viscous (Navier-Stokes) mediums.

We cannot explain mentioned paradoxes using also classical molecular-kinetic approach as well turbulence mixing in shear flow or dust particle presence in air, or by boundary-layer approach (for strong blast wave). It is supposed, that the hypothetic mechanism of blast wave front region expansion consists in development of specific Kelvin-Helmholtz instability during gas rapid compression in front region. As a result of development of instability the process of organized nonlocal mixing (mesodiffusion) is generated which results in a expanding of the wave front region. This mechanism does not depend by nature a source of wave indignations as it is connected with properties and the nature of high-speed deformation of gases. Proposed mechanism can resolve observed paradoxes including the entropy paradox.

1-16

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
ГИБРИДНОЙ МИШЕНИ ИНЕРЦИАЛЬНОГО
ТЯЖЕЛОИОННОГО СИНТЕЗА С УЧЕТОМ
НЕЙТРОННО-ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ**

Л.П. Басс¹, В.Т. Жуков¹, Е.А. Забродина¹,
В.С. Имшенник², М.В. Масленников¹,
О.В. Николаева¹, М.Д. Чуразов²

¹Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,
Москва, Россия

²Институт теоретической и экспериментальной физики
им. А.И. Алиханова, Москва, Россия

E-mail: zhukov@kiam.ru, imshennik@itep.ru

Для гибридной энергетической мишени инерциального тяжелоионного синтеза (ИТИС) ранее было получено теоретическое и расчетное обоснование использования урановой оболочки (пушера) для существенного увеличения энерговыделения в такой мишени. Указанное обоснование включало учет нейтронно-ядерных реакций в пушере, сформулированный в виде обобщения решения Ахиезера и Померанчука на случай цилиндрической симметрии. В данном докладе представлены результаты исследования такой мишени на основе более полной математической модели с описанием нейтронно-ядерных процессов в многогрупповом приближении. Процесс сжатия мишени описывается в трехтемпературном гидродинамическом приближении с учетом полной кинетики термоядерных реакций в дейтериево-тритиевом топливе. Проведенные оптимизационные расчеты подтверждают перспективность гибридных мишеней ИТИС при использовании природного урана в качестве материала пушера.

Модель мишени формулируется на основе принципа безударного сжатия слоистой цилиндрической мишени, облучаемой с открытых торцов пучками ионов, движущихся параллельно оси симметрии. Торможение ионов вызывает разогрев и разлет вещества в радиальном направлении, приводящий в свою очередь к кумуляции вещества на ось мишени и началу термоядерных реакций. Образующиеся в этих реакциях нейтроны, взаимодействуя с мишенью, передают ей часть своей энергии и вызывают деление в окружающей топливо урановой оболочке с дополнительным энерговыделением, приводящим к дальнейшему обжатию, разогреву и выгоранию топлива. Нестационарные уравнения переноса нейтронов решаются методом дискретных ординат по сеточной схеме второго порядка точности в цилиндрической геометрии на структурированных четырехугольных криволинейных сетках. Сечения взаимодействия нейтронов с веществом мишени определяются с учетом плотности среды, полученной на этапе газодинамического расчета. Рассчитанные потоки нейтронов позволяют найти пространственные распределения плотности энергии и импульса, передаваемых нейтронами веществу мишени.

Приведены результаты моделирования двумерных мишеней с урановым (^{238}U) и золотым пушером с учетом и без учета нейтронно-ядерных процессов. Представлены результаты оптимизации размеров мишени

с целью увеличения термоядерного энерговыделения и снижения необходимых энергозатрат.

**SIMULATION OF THE HYBRID TARGET
OF INERTIAL HEAVY ION FUSION
AND NEUTRON-INDUCED FISSION**

L.P. Bass¹, V.T. Zhukov¹, E.A. Zabrodina¹,
V.S. Imshennik², M.V. Maslennikov¹,
O.V. Nikolaeva¹, M.D. Churazov²

¹Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia

²Alikhanov Institute for Theoretical and Experimental Physics,
Moscow, Russia

E-mail: zhukov@kiam.ru, imshennik@itep.ru

For hybrid inertial heavy-ion fusion target (HIF) it was previously obtained by the theoretical and numerical study that the use of uranium shell (pusher) provides a substantial increase of energy-release. This study is included consideration of the neutron-nuclear reactions in the pusher, formulated as a generalization of Akhiezer and Pomeranchuk solutions to the case of cylindrical symmetry. This report presents the results of the investigation of such a hybrid target, based on more complete mathematical model describing neutron-nuclear processes in the multigroup approach. The process of compression of the target is simulated by three temperature hydrodynamic model supplemented by the complete kinetics of fusion reactions in deuterium-tritium fuel. The results obtained by optimization calculations confirm the promise of the hybrid target using natural uranium as a material pusher.

The model is based on representation of shock-free compression of a layered cylindrical target. This target irradiated with the open ends by the ion beams moving parallel to the axis of symmetry. Inhibition of ions causes heating and expansion of the substance in the radial direction, which leads in turn to the accumulation of energy on the axis of the target and the beginning of thermonuclear reactions. Generated in these reactions, neutrons transfer their energy and cause fission of uranium shell surrounding of deuterium-tritium fuel. It leads to further compression, heating and burning fuel. Time-dependent neutron transport equation is solved by the discrete ordinates method. The second order accuracy scheme is written down on structured quadrilateral curvilinear grids in the cylindrical geometry. The cross sections for neutron interactions are determined by the density of the medium obtained at the stage of gas-dynamic calculations. The calculated neutron fluxes allow us to find the spatial distribution of the density of energy and momentum transferred to the target material by neutrons. The results of 2D simulations of the two targets are presented. The first target is supplemented by the uranium pusher where neutron-nuclear fission is simulated. The second target contains the gold pusher (no neutron-nuclear fission).

The results of the target optimization to increase the energy-release and reduce the required energy-input are discussed.

1-17

**ЯДЕРНЫЙ DD СИНТЕЗ В СХЕМЕ
С ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ УДЕРЖАНИЕМ
НА ОСНОВЕ НАНОСЕКУНДНОГО
ВАКУУМНОГО РАЗРЯДА С PD АНОДОМ**

Ю.К. Куриленков¹, С.Ю. Гуськов², В.П. Тараканов¹

¹Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
Москва, Россия

E-mail: yukurilenkov@rambler.ru

Недавно были продемонстрированы генерация быстрых ионов и DD нейтронов в межэлектродном пространстве наносекундного вакуумного разряда малой энергии (~1 Дж) с дейтерированным Pd анодом [1]. Чтобы лучше понять физику процесса ядерного синтеза, детальное моделирование эксперимента было проведено методом частиц с использованием электродинамического кода КАРАТ [2]. В частности, была воспроизведена во времени динамика электронов и ионов в пространстве анод–катод (А–С). Была выявлена принципиальная роль образования виртуального катода (ВК) и соответствующей ему потенциальной ямы (ПЯ) в межэлектродном пространстве. Рассчитанная глубина квазистационарной потенциальной ямы виртуального катода составила 50–60 кВ. Ионы D⁺ захватываются ямой и ускоряются ее полем до энергий в десятки кэВ, что и обеспечивает DD синтез при встречных столкновениях ионов D⁺ (их коллапсе) на оси разряда (обзор эксперимента и PIC моделирования представлены в [3]). В частности, ионы в ПЯ могут совершать и высокочастотные (~80 МГц) гармонические колебания, сопровождающиеся соответствующим пульсирующим режимом DD нейтронного выхода. Частота наблюдавшихся колебаний совпадает с экстраполяцией выражений, полученных для исследуемой в Лос-Аламосе (LANL) схемы инерционного электростатического удержания (ИЭУ) с периодически осциллирующими плазменными сферами (ПОПС) (см. [4], и имеющиеся там ссылки по ИЭУ). Действительно, как PIC моделирование, так и эксперимент с миниатюрным ВК ($r_{VC} \sim 0,1$ см) и довольно глубокой ПЯ ($\phi \approx 50$ кВ) в представленной схеме ИЭУ, основанной на компактном вакуумном разряде [1–3], иллюстрируют благоприятный скейлинг [4] плотности мощности ядерного синтеза ($\sim \phi^{2\theta}/r_{VC}^4$) с уменьшением размеров ВК (θ – степень сжатия при коллапсе ионов на оси). Отметим, что эрозия дейтерированного анода может обеспечить частичное заполнение ПЯ дейтериевыми кластерами (межэлектродные ансамбли). Частичное или полное запираение быстрых ионов дейтерия ансамблями кластеров, наблюдаемое в эксперименте, может заметно увеличить нейтронный выход (до $\sim 10^7/4\pi$) [1, 2]. Кроме этого, представляет отдельный интерес и самая начальная стадия разряда, когда электронный пучок, вытягиваемый приложенным полем из катода, облучает пористую поверхность Pd анода, и, возможно, реализуется случай, близкий к предельному $r_{VC} \rightarrow 0$.

Литература

1. Yu.K. Kurilenkov, M. Skowronek and J. Duffy. *J.Phys.A: Math&Gen* т. 39 (2006)4375; *Plasma Physics Reports*, **36**, No. 13 (2010) 1219-1234.
2. Yu.K. Kurilenkov, V.P. Tarakanov, S. Yu. Gus'kov et al. *J.Phys.A: Math&Theor* т. 42 (2009) 214041; V.P. Tarakanov. User's Manual for Code KARAT (BRA Inc., Va, USA, 1992).
3. Yu.K. Kurilenkov, V.P. Tarakanov et al. *Contrib. Plasma Phys.* т. 51, No. 5(2011) 427 – 443
4. R.A. Nebel and D.C. Barnes, *Fusion Technology* т. 38 (1998) 28; J. Park, R.Nebel et al. *Physics of Plasmas* т. 12 (2005) 05631.

**ON DD SYNTHESIS AT INERTIAL
ELECTROSTATIC CONFINEMENT SCHEME
BASED ON NANOSECOND VACUUM DISCHARGE
WITH DEUTERIUM-LOADED PD ANODE**

Yu.K. Kurilenkov¹, V.P. Tarakanov¹, S.Yu. Guskov²

¹Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia

²Lebedev Physics Institute, Moscow, Russia

E-mail: yukurilenkov@rambler.ru

The generation of energetic ions and DD neutrons from microfusion at the interelectrode space of a low energy (~1 J) nanosecond vacuum discharge with deuterium-loaded Pd anode has been demonstrated recently [1]. To understand better the physics of fusion processes the detailed particle-in-cell (PIC) simulation of the discharge experimental conditions have been developed using a fully electrodynamic code KARAT [2]. The dynamics of all charge particles was reconstructed in time and anode-cathode (A-C) space. The principal role of a *virtual cathode* (VC) and the corresponding single and double potential well formed in the interelectrode space are recognised. The calculated depth of the *quasistationary potential well* (PW) of the VC is about 50–60 kV, and the D⁺ ions being trapped by this well accelerate up to energy of few tens keV that provides DD nuclear synthesis under head-on D⁺ collisions (the partial review of experimental data and modelling results related are presented at [3]). In particular, ions in the potential well may undergo high frequency (~80 MHz) harmonic oscillations accompanied by a corresponding regime of oscillatory DD neutron yield. This value of high frequency ion oscillations observed coincides with extrapolation of expressions obtained for inertial electrostatic confinement fusion (IECF) scheme with periodic oscillating plasma spheres (POPS) (see [4], and IECF references therein). In fact, both PIC simulations and experiment (with the miniature size of VC, $r_{VC} \sim 0.1$ cm, and rather deep PW like $\phi \approx 50$ kV at the present scheme of IECF based on tabletop vacuum discharge [1-3]) illustrate favourable *scaling of the fusion power density* ($\sim \phi^{2\theta}/r_{VC}^4$) discussed earlier [4] (θ – ions compression level). Remark, the anode erosion may provide the partial fulfillment of PW by deuterium clusters also (interelectrode ensembles). The total trapping of fast ions D⁺ by cluster ensembles observed in experiment would increase the neutron yield essentially (up to $\sim 10^7/4\pi$) [1, 2]. Meanwhile, at very initial stage of discharge when the voltage is applied and electron beam extracting from cathode irradiates the surface of porous deuterium-loaded Pd anode, the limiting case $r_{VC} \rightarrow 0$ might be realized probably also.

References

1. Yu.K. Kurilenkov, M. Skowronek and J. Dufty. *J.Phys.A: Math&Gen* **39** 4375 (2006); *Plasma Physics Reports*, **36**, No. 13 (2010) 1219-1234.
2. Yu.K. Kurilenkov, V.P. Tarakahov, S.Yu. Gus'kov et al. *J.Phys.A: Math & Theor* **42** 214041 (2009); V.P.Tarakanov. User's Manual for Code KARAT (BRA Inc., Va, USA, 1992).
3. Yu.K. Kurilenkov, V.P. Tarakanov et al. *Contrib. Plasma Phys.* **51**, No. 5, 427 – 443 (2011)
4. R.A. Nebel and D.C. Barnes, *Fusion Technology* **38**, 28 (1998); J. Park, R.Nebel et al. *Physics of Plasmas* **12** (2005) 05631.

1-18

ОБ ОДНОЙ КОНСТРУКЦИИ МИШЕНИ И ВОЗМОЖНЫХ РАСЧЕТАХ ЕЕ СЖАТИЯ

С.П. Баутин, А.В. Рошчупкин

Уральский государственный университет путей сообщения,
Екатеринбург, Россия

E-mail: SBautin@math.usurt.ru

В работах [1, 2] предложена одна конструкция мишени для реализации управляемого термоядерного синтеза: объем мишени ограничен конечным числом граней, выпуклых во внутрь ее. Представляется, что процесс сильного сжатия подобных мишеней будет более устойчивым, чем процесс сжатия шаровых или цилиндрических мишеней. Кроме этого в окрестностях линий пересечения граней возможно возникновение дополнительной кумуляции.

Для уменьшения значения внешнего энерговложения, реализующего требуемое сжатие, предлагается использовать режим безударного сжатия [3, 4], а также применить эффект самоторможения сжимаемого газа [4].

Получение закона внешнего воздействия, реализующего в одномерном случае оба указанных эффекта, используется следующий подход [4, 5]. Для моделирования сжатия внутри цилиндрического или шарового слоя расчет ведется от момента сильного сжатия в обратном направлении изменения времени до момента прихода разделяющей звуковой характеристики на поверхность, ограничивающую исходный несжатый слой. При таком численном построении искомого течения, в том числе определяется и закон движения непроницаемого поршня, реализующего требуемое сжатие. Для проверки полученных результатов с использованием полученного закона движения поршня и других вычислительных алгоритмов требуемое течение нужно построить в прямом направлении изменения времени. Реализация этой схемы позволила получить плотность сжатого слоя в 1000–10 000 раз превышающую исходную плотность несжатого газа.

С использованием полученных законов движения сжимающего поршня в различных одномерных случаях и методик расчета двумерных и трехмерных течений необходимо в прямом направлении изменения времени рассчитывать сжатие мишеней с описанными конфигурациями.

Исследование поддержано РФФИ, проекты 08-01-00052, 11-01-00198.

Литература

1. Баутин С.П. Об одной конструкции мишени для управляемого термоядерного синтеза // Забыхинские научные чтения: сборник материалов X Международной конференции. Снежинск: издательство РФЯЦ – ВНИИТФ, 2010. С. 30–31.
2. Баутин С.П. Мишень для получения термоядерных реакций. Патент РФ 2432627, МПК G21B 1/19(2006.01). Заявка 2010113417/07 от 06.04.2010. Опубликовано 27.10.2011 Бюллетень № 30.
3. Баутин С.П. Математическая теория безударного сильного сжатия идеального газа. Новосибирск: Наука, 1997. 160 с.
4. Баутин С.П. Математическое моделирование сильного сжатия газа. Новосибирск: Наука, 2007. 312 с.
5. Николаев Ю.В. Численное решение задачи А.Н. Крайко // Вычислительные технологии. – 2005. – Т. 10, № 1. С. 90–102.

ABOUT ONE CONSTRUCTION OF THE TARGET AND POSSIBLE CALCULATIONS OF IT COMPRESSION

S.P. Bautin, A.V. Roshchupkin

Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia

E-mail: SBautin@math.usurt.ru

In [1, 2] proposed a design target for the implementation of controlled thermonuclear fusion: target volume is limited to a finite number of faces, convex inside it. It seems that the process of strong compression of such targets will be more stable than the compression of spherical or cylindrical targets. In addition, in the vicinity of the intersection lines of faces may be provided additional accumulation.

To decrease the value of the external energy input, which implements the required compression, it is proposed to use the shock-free compression mode [3, 4], and apply self-braking effect of a compressible gas [4].

Getting the law of external influence, which implements in a one-dimensional case both of these effects, we use the following approach [4, 5]. To simulate the compression inside a cylindrical or a spherical shell, calculation is carried out from the moment of strong compression in the opposite direction changes the time until the arrival of separating the sound characteristic on the surface bounding the original uncompressed layer. With such a numerical construction of the required flow, including the law of motion is determined and an impermeable plunger, which implements the required compression. To verify the results obtained using the law of motion of the plunger and other computational algorithms required for a need to build a forward time changes. The implementation of this scheme has provided the density of the compressed layer in the 1.000–10,000-fold higher than the initial density of uncompressed gas.

Using the obtained laws of motion of the piston compressing a different one-dimensional cases and methods for calculating the two- and three-dimensional flows in the forward direction to change the time to calculate compression targets with this configuration.

The study was supported by RFBR, projects 08-01-00052, 11-01-00198.

References

1. Bautin S.P. A construction targets for controlled thermonuclear fusion // Zababahinski scientific reading: compendium of the X International Conference. Snezhinsk: publishers, Russian Federal Nuclear Center – VNIITF, 2010. P. 30–31.
2. Bautin S.P. The target for fusion reactions. Russian Federation Patent 2432627, IPC G21B 1 / 19 (2006.01). Application 2010113417/07 from 06.04.2010. Posted on 10/27/2011 Bulletin number 30.
3. Bautin S.P. The mathematical theory of shock less compression of ideal gas. Novosibirsk: Nauka, 1997. 160 p.
4. Bautin S.P. Mathematical modeling of the strong compression of the gas. Novosibirsk: Nauka, 2007. 312 p.
5. Nikolaev Y.V. Numerical solution of AN Kraiko // Computational technologies. 2005. T. 10. № 1. P. 90–102.

1-19

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ В СВЕРХНОВЫХ ТИПА Ia

С.И. Глазырин

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия
E-mail: s.i.glazyrin@itmf.vniief.ru

Сверхновые типа Ia являются важными космологическими объектами, сыгравшими большую роль в определении состава Вселенной. Несмотря на четыре десятилетия исследований, нет полного понимания механизма взрыва. Одна из основных задач состоит в описании распространения волны горения по предсверхновой – белому карлику. Из наблюдений известно, что изначально медленное пламя по мере движения ускоряется и переходит в детонацию. Механизм ускорения, который реализуется в сверхновых не известен до сих, но считается, что оно происходит за счет различных неустойчивостей. В работе исследована неустойчивость Ландау–Даррье тонкого фронта дефлаграционного термоядерного горения, распространяющегося по предсверхновой. Представлено прямое численное моделирование горения с помощью метода уровней. Показано, что малые возмущения на фронте через некоторое время сливаются в одну большую угловую точку. При движении пламени ограниченных размеров это приводит только к незначительному росту скорости, что не позволяет ему разогнаться до скорости звука.

STUDY OF BURNING IN SUPERNOVA Ia

S.I. Glazyrin

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific
Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia
E-mail: s.i.glazyrin@itmf.vniief.ru

Supernovae Ia (SNIa) are outstanding cosmological objects, that have been of primary importance in determination of the composition of the Universe. Despite four decades of investigation the clear understanding of an explosion mechanism is absent. One of the principal problem is the description of propagation of a burning flame in the presupernova – white dwarf. Observations tell us that initially slow flame accelerates and pass into detonation.

The mechanism of acceleration in SNIa is still unknown, but is considered to be due to different instabilities. In this work the Landau–Darrieus instability of thin thermonuclear burning front, spreading over presupernova, is studied. The direct numerical simulation using level-set method is presented. It is shown that all small perturbations of the front merge into one cusp. For the flame with limited sizes it leads only to insignificant speed increase and do not permit to achieve the speed of sound.

1-20

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ ОТ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ УДАРНИКОВ МЕТАЕМЫМИ ИМ НАВСТРЕЧУ ПЛАСТИНАМИ И СТЕРЖНЯМИ

А.В. Герасимов, С.В. Пашков

НИИ прикладной математики и механики
Томского государственного университета, Томск, Россия

E-mail: ger@mail.tomsknet.ru

Создание надежной системы защиты диктует необходимость исследования различных способов противодействия высокоскоростным удлиненным ударникам. В работе рассматривается взаимодействие ударника с пластинами и стержнями, метаемыми ему навстречу взрывом ВВ. Деформация и разрушение ударника резко снижают его проникающую способность и возможность поражения объекта.

Задача решается в трехмерной постановке с учетом естественной неоднородности структуры материала, влияющей на распределение прочностных характеристик по объему тела и являющейся одним из факторов, влияющих на характер разрушения последнего. Учет этого фактора в уравнениях механики деформируемого твердого тела реализуется применением вероятностных законов распределения прочностных характеристик по объему исследуемого объекта.

Для описания процессов деформирования и дробления твердых тел используется модель прочного сжимаемого идеально упругопластического тела. Основные соотношения, описывающие движение среды, базируются на законах сохранения массы, импульса и энергии и замыкаются соотношениями Прандтля–Рейса при условии текучести Мизеса. Уравнение состояния берется в форме Ми–Грюнайзена.

Методика для расчета пространственных упругопластических течений, реализуемая на тетраэдрических ячейках, использует метод Уилкинса для расчета внутренних точек тела и метод Джонсона для расчета контактных взаимодействий.

Для моделирования процесса фрагментации в прочностные характеристики тела вносится случайное распределение начальных отклонений этих свойств от номинального значения, а именно, варьируется предельное значение эквивалентной пластической деформации.

Результаты расчетов показали, что воздействие стальной пластины приводит к небольшому искривлению ударника и не отражается существенно на пробитии

преграды. В итоге ударник пробивает преграду и за ее тыльной поверхностью формируется значительный осколочный поток. Использование пластин из вольфрамового сплава приводит к рикошетированию ударников.

Совершенно другую картину мы наблюдаем при метании по ударнику стержней из вольфрамового сплава. В этом случае происходит интенсивное дробление, как стержней, так и ударника. Оставшаяся хвостовая часть ударника рикошетирует от поверхности преграды, которая получает относительно небольшие повреждения лицевой поверхности.

NUMERICAL MODELING OF PROTECTION OBJECT FROM HIGH-VELOCITY ELEMENTS THROWING TOWARDS PLATES AND RODS

A.V. Gerasimov, S.V. Pashkov

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

E-mail: ger@mail.tomsknet.ru

Creation of the reliable protective system dictates necessity of research of different ways of counteraction to high-velocity elongated strikers. Interaction a striker with plates and rods, which are throwing towards by HE is investigated. The strain and fracture of a striker reduces its penetrating ability and a capability of defeat object.

The problem is decided in three-dimensional statement in view of the natural inhomogeneity of structure of a material influencing distribution of strength properties by volume of a body and being one factor, influencing on body fracture character. The account of this factor in solid mechanics equations is implemented by application of probability distributions of strength properties by volume a concerned system.

For calculation of deformation and fragmentation the model strength compressed ideally elastic-plastic solids will be used. The fundamental relations for problem description of moving solids are founded on law of conservation of mass, pulse and energy and close Prandtl-Reuses relations under Mises flow condition. The equation of state was used in Mie-Gruneisen form.

The technique for calculation 3-D elastic-plastic flows, implemented on tetrahedral cells, will use Wilkins method for calculation of body internal points and Johnson method for calculation of contact interactions.

For modeling fragmentation process in body strength properties is introduced random distribution of initial properties divergence from a nominal value, namely, the limiting value of an equivalent plastic deformation is varied.

Apparently from results of calculations affecting of a steel plate results in a bending of a striker and is not reflected on piercing barriers. In a summary the striker punches a barrier and behind its back surfaces the intense fragmental stream is formed. Use of plates from tungsten alloy results in rebounding strikers.

We observed completely other picture at a throwing on a striker of tungsten alloy rods. In this case there is an intensive splitting, both rods, and a striker. The stayed tail part of a striker ricochet from a barrier surface which has received rather small faults of a front face.

1-21

О МОДЕЛИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ТРАКТЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ НАЛИЧИИ ИНТЕНСИВНОГО ПОТОКА ИЗЛУЧЕНИЯ

Г.Б. Жестков, М.Я. Иванов

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

E-mail: ivanov@ciam.ru

Предложенная в данной работе модель течения представляет собой замкнутую систему термодинамически согласованных законов сохранения массы, импульса и энергии двухкомпонентной среды излучающего теплопроводного газа с массовой фотонной составляющей и позволяет выполнить аккуратное согласование совместной работы турбины высокого давления и основной камеры сгорания высокотемпературного ГТД.

В работе использовано приближение «массового» фотонного газа [1], для которого, следуя «нулевому» началу термодинамики, введена температура T как параметр состояния. Фотонный газ в космическом пространстве при этом имеет аккуратно замеренную температуру $T_0 = 2,735$ К.[2]

Применение к фотонному газу первого и второго начал термодинамики позволяет определить показатель адиабаты к фотонного газа и связь давления p с температурой:

$$p = cT^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}, \kappa = 4/3.$$

Из вышесказанного делаем вывод, что фотонный газ с термодинамической точки зрения следует рассматривать как газообразную среду с показателем адиабаты $\kappa = 4/3$.

Третье начало термодинамики, известное как теорема Нернста, позволяет определить величину давления фотонного газа p_0 в космическом пространстве при температуре $T_0 = 2,735$ К

$$p_0 = (\kappa - 1)\sigma T_0^4.$$

С помощью полученной системы уравнений рассмотрим в качестве примера стационарное течение излучающего газа в сопле Лавала. Можно показать, что при условии термодинамического равновесия между радиационной и газовой составляющих течение двухфазной среды сводится к течению обычного идеального газа с газовой постоянной, зависящей от начальных значений давления и температуры, и остающейся постоянной вдоль линий тока [3]. При температурах $T = 1000 \dots 2000$ К показатели адиабат газодинамической и радиационной составляющих практически совпадают, и для определения приведенной газовой постоянной можно воспользоваться упрощенной зависимостью:

$$\bar{R} = R_g \frac{p}{p - p_f}; p_f = 1,79 \cdot 10^{-8} T^4 \text{ Па.}$$

Известно, что при одномерном адиабатическом течении идеального газа в сопле Лавала расход газа определяется формулой:

$$G = m \frac{p^0 F q(\lambda)}{\sqrt{(R_g T^0)^{k+1}}}; \quad m = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k-1}};$$

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

где p^0 и T^0 – давление и температура торможения; F – площадь поперечного сечения канала. Будем считать данный расход газа идеальным. При течении двухкомпонентной смеси для вычисления расхода газа нужно использовать приведенную газовую постоянную. Для отношения расходов газа в указанных случаях справедлива формула:

$$\mu = \frac{G}{G_{ид}} = \sqrt{1 - p_f/p}.$$

Отметим, что в рассматриваемой модели течения газа не учитываются необратимые диссипативные потери энергии. Коэффициент μ характеризует подобие потоков. Для сохранения заданного расхода газа поперечное сечение канала достаточно увеличить в $1/\mu$ раз.

Литература

1. Иванов М.Я. Термодинамически согласованные законы сохранения в модели излучающего теплопроводного газа. Журнал вычислительной математики и математической физики, 2011, т. 51, № 1, с. 142–151.
2. Смут Дж. Ф. III. Анизотропия реликтового излучения: открытие и научное значение. Успехи физических наук, 2007, т. 177, № 12, с. 1284–1317.
3. Жестков Г.Б., Иванов М.Я. К вопросу согласования турбины высокого давления и основной камеры сгорания высокотемпературного ГТД с учетом тепловых радиационных эффектов. Международный семинар «Проблемы авиационного двигателестроения» МАКС 2011.

ON THE WORKING PROCESS MODEL IN A HIGH TEMPERATURE GAS TURBINE ENGINE WITH INTENSIVE RADIATION FLUX

M.J. Ivanov, G.B. Zhestkov

FGUP «CIAM under P.I. Baranov», Moscow, Russia

E-mail: ivanov@ciam.ru

Proposed in this paper model is a closed system of thermodynamically consistent laws of conservation of mass, momentum and energy for a two-component medium of radiative thermal conductivity gas with the mass photon component. Application of the proposed approach to modeling workflow in high-temperature CCD allows us to perform accurate coordination of joint work of the high-pressure turbine and the main combustion chamber.

In the approximation of «mass» photon gas [1] for which, following the «zero» law of thermodynamics, introduced the temperature T as a state parameter. In this case the photon gas in outer space has the carefully measured temperature $T_0 = 2.735$ K. [2]

Application to the photon gas of the first and second laws of thermodynamics allows us to determine the adiabatic index κ of the photon gas and the connection pressure p with temperature:

$$p = cT^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}, \quad \kappa = 4/3.$$

From the above, we conclude that the photon gas from a thermodynamic point of view should be considered as a gaseous medium with an adiabatic index $\kappa = 4/3$.

The third law of thermodynamics, known as the Nernst theorem, allows us to determine the pressure of the photon gas in outer space p_0 at a temperature $T_0 = 2.735$

$$p_0 = (\kappa - 1)\sigma T_0^4.$$

With the resulting system of equations we consider an example of a steady radiating gas flow in a Laval nozzle. It can be shown that under the condition of thermodynamic equilibrium between the radiative and gas components for two-phase medium is reduced to the normal flow of an ideal gas with gas constant, independent of the initial values of pressure and temperature, and remains constant along streamlines [3]. At temperatures $T = 1000...2000$ K adiabatic index gas and radiation components are practically the same, and to determine the reduced gas constant, we can use the simplified relation:

$$\bar{R} = R_g \frac{p}{p - p_f}; \quad p_f = 1.79 \cdot 10^{-8} T^4 \text{ Pa}.$$

It is known that the one-dimensional adiabatic flow of ideal gas in a Laval nozzle flow rate is determined by the formula:

$$G = m \frac{p^0 F q(\lambda)}{\sqrt{(R_g T^0)^{k+1}}}; \quad m = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k-1}};$$

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

where p^0 and T^0 is the pressure and stagnation temperature; F – cross-sectional area of the channel. We consider that this is an ideal gas flow. During the two-component mixture for calculation the gas flow need to use the reduced gas constant. For the ratio of gas flow rates in these cases, valid formula of fuels:

$$\mu = \frac{G}{G_{ид}} = \sqrt{1 - p_f/p}.$$

Note that in this model of gas flow it is not considered irreversible dissipative energy loss. Coefficient μ characterizes the similarity flows. To maintain a given gas flow cross-section of the channel is sufficient to increase to $1/\mu$ times.

References

1. Ivanov M.J. Thermodynamically consistent conservation laws in the model of radiative heat-conducting gas. Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics, 2011, v. 51, № 1, p. 142–151.
2. John F. Smoot III. The anisotropy of the cosmic microwave background radiation: the discovery and scientific importance. Successes of physical sciences, 2007, v. 177, № 12. p. 1284–1317.
3. Ivanov M.J., Zhestkov G.B. On the question of harmonization of high-pressure turbine and main combustion chamber of the high-temperature CCD based thermal radiation effects. International seminar «Problems of aircraft engine» MAX 2011.

1-22

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В НАНОЧАСТИЦАХ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

С.П. Киселев

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

В работе представлены результаты численных расчетов деформации и разрушения наночастиц при динамических нагрузках. Численные расчеты проводились методом молекулярной динамики с использованием известных многочастичных EAM, MEAM, AIREBO потенциалов.

Решены следующие задачи:

- Сжатие сферической наночастицы сходящейся к центру ударной волной и ее разрушение в сферической волне разгрузки. Обнаружено влияние структуры атомной решетки на форму сходящейся ударной волны и разрушение наночастицы.
- Косое соударение металлических нанопластинок, и исследование эффектов вонообразования и образования кумулятивных струй. Результаты расчетов согласуются с известными экспериментальными данными.
- Разрушение пластин молибдена и графена при высокоскоростном одноосном растяжении. Обнаружено, что разрушению молибдена предшествует мартенситное превращение, в результате которого образуется поликристаллическая структура с чередованием старой и новой фаз. Получены прочностные характеристики графена и исследовано влияние дефектов на его разрушение.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта РФФИ № 11-01-00357.

NUMERICAL MODELING OF FRACTURE OF THE METAL NANOCOMPOSITES UNDER DYNAMICAL LOADS

S.P. Kiselev

Khristianovich Institute of Theoretical
and Applied Mechanics, Novosibirsk, Russia
E-mail: kiselev@itam.nsc.ru

The results of numerical calculations and experiments of the deformation and fracture under dynamic loading of nanoparticles are presented. Numerical calculations were performed using molecular dynamics with EAM, MEAM, AIREBO many-body potentials. Following tasks:

- The compression of the spherical composite nanoparticle by converging toward the center of the shock wave and its fracture after reflection of the shock wave. The depending of the converging shock wave shape and the destruction of nanoparticle from the atomic lattice are investigated.

- The oblique collision of metal plates, wave formation and structure of the jet are investigated. A comparison of experimental results with calculations was performed. The results of calculations coincide with the experiments.
- The molybdenum and graphene fracture under uniaxial tension are investigated. The polymorphous transformation in the molybdenum take place. As a result, a single crystal of Mo, who had a bcc lattice, there is a polycrystalline structure. It consists of crystallites having a new body-centered tetragonal lattice with the old and the crystallites of bcc. Strength properties of graphene are obtained and the influence of defects on its destruction.

This work was partially supported by RFBR № 11-01-00357.

1-23

АНАЛИТИКО-ЧИСЛЕННОЕ ПРИБЛИЖЕННОЕ ОПИСАНИЕ ТЕЧЕНИЙ СЖИМАЕМОГО ВЯЗКОГО ТЕПЛОПРОВОДНОГО ГАЗА

С.П. Баутин¹, В.Е. Замыслов¹,
Н.А. Первушина², Д.В. Перминова¹

¹Уральский государственный университет
путей сообщения, Екатеринбург, Россия
²СФТИ НИЯУ МИФИ,
Снежинск, Россия

E-mail: SBautin@math.usurt.ru, p-n-a100678@yandex.ru

Использование для описания движения вязкой теплопроводной среды традиционной системы уравнений Навье-Стокса в случае постоянства плотности среды $\rho = \text{const}$ [1] приводит к тому, что для построенных решений этой системы уравнений не выполняются либо закон сохранения энергии (при отсутствии в системе уравнения для температуры), либо основное термодинамическое тождество (при включении в систему уравнения для температуры).

Для описания течений сжимаемого вязкого теплопроводного идеального газа в случае постоянных значений коэффициентов вязкости и теплопроводности в работе рассматривается полная система уравнений Навье-Стокса (ПСУНС) [2]. При этом в качестве независимых термодинамических переменных берутся удельный объем $\delta = 1/\rho$ и давление p [3–5]. В этом случае PSUНС записывается в нормальном виде относительно производных по времени от искомым функций, а правые части имеют полиномиальный вид с квадратичными нелинейностями. Это дает возможность строить приближенные решения PSUНС с использованием идеи метода Галеркина [6].

Для простоты изложения далее рассматривается случай одномерных течений. Газодинамические параметры представляются в виде

$$\delta = 1 + \sum_{k=1}^K \delta_k(t) \cos(kx),$$

$$u = \sum_{k=1}^K u_k(t) \sin(kx),$$

$$p = 1 + \sum_{k=0}^K p_k(t) \cos(kx),$$

где u – скорость газа. В этом случае при $x = 0$ и $x = \pi$ выполняются условия прилипания и теплоизоляции. Подстановка представления (1) в ПСУНС и последующая процедура проецирования каждого из трех уравнений ПСУНС на соответствующую систему базисных функций приводит к записанной в нормальном виде замкнутой системе обыкновенных дифференциальных уравнений (СОДУ) для $(3K+1)$ неизвестных коэффициентов $\delta_k(t)$, $u_k(t)$, $p_k(t)$.

В работе численно строятся решения этой СОДУ при различных значениях входных данных. И тем самым определяются различные одномерные течения сжимаемого вязкого теплопроводного газа. В частности описано движение бегущего ударного перехода, не имеющего осцилляций в районе его фронта. Также приводятся результаты двумерных нестационарных расчетов.

Исследование поддержано РФФИ, проекты 08-01-00052, 11-01-00198.

Литература

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1970. 904 с.
2. Баутин С.П. Характеристическая задача Коши и ее приложения в газовой динамике. Новосибирск: Наука, 2009. 368 с.
3. Титов С.С. Пространственно-периодические решения полной системы Навье-Стокса // Доклады РАН. 1999. Т. 356, № 6. С. 761–763.
4. Титов С.С. Решение нелинейных уравнений в аналитических полиалгебрах. I. // Известия вузов. Математика. 2000. Т. 1(452). С. 66–77.
5. Титов С.С. Решение нелинейных уравнений в аналитических полиалгебрах. II. // Известия вузов. Математика. 2000. Т. 6(457). С. 45–52.
6. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галеркина. М.: Мир, 1988. 352 с.

ANALYTICAL AND NUMERICAL APPROXIMATE DESCRIPTION OF FLOWS OF COMPRESSIBLE VISCOUS HEAT-CONDUCTIVE GAS

S.P. Bautin¹, V.E. Zamyslov¹,
N.A. Pervushyna², D.V. Perminova¹

¹Ural State University of Railway Transport,
Yekaterinburg, Russia

²Snezinskiy Physical-Technical Institute, Snezhinsk, Russia

E-mail: SBautin@math.usurt.ru, p-n-a100678@yandex.ru

To describe the motion of a viscous environment is used the traditional system of Navier-Stokes equations in the case of constant density of the environment $\rho = \text{const}$ [1] leads to the fact that the builded solutions of this system are not fullfill to the law of conservation of energy (in the absence of a system of equations for temperature), or

to the basics of thermodynamic identity (for inclusion in the system of equations for temperature).

To describe the flow of a compressible viscous heat-conducting ideal gas in the case of constant coefficients of viscosity and thermal conductivity in this paper we examine a complete system of Navier-Stokes equations (CSNSE) [2]. At the same time as the independent thermodynamic variables are taken specific volume $\delta = 1/\rho$ and pressure p [3–5]. In this case CSNSE written in normal form with respect to time derivatives of the unknown functions, and the right sides have a polynomial form with quadratic nonlinearities. This makes it possible to construct approximate solutions CSNSE using ideas of the Galerkin method [6].

For simplicity, we further consider the case of one-dimensional flows. Gasdynamic parameters are presented at such forms:

$$\delta = 1 + \sum_{k=1}^K \delta_k(t) \cos(kx),$$

$$u = \sum_{k=1}^K u_k(t) \sin(kx),$$

$$p = 1 + \sum_{k=0}^K p_k(t) \cos(kx),$$

where u is velocity of the gas. In this case there are the conditions of adhesion and thermal insulation. Substituting the representation (1) and the subsequent procedure CSNSE projection of each of the three equations PSUNS on an appropriate system of basis functions leads to recorded in the normal form of a closed system of ordinary differential equations (SODE) for the unknown coefficients $(3K+1)$.

We numerically construct solutions of SODE at different values of the input data. And thus defines the various one-dimensional flow of a compressible viscous heat-conducting gas. In particular, describe the motion of a traveling shock transition, which has no oscillations in the vicinity of its front. Also, the results of two-dimensional unsteady calculations.

The study was supported by RFBR, projects 08-01-00052, 11-01-00198.

References

1. Loitsyansky L.G. Fluid Mechanics. Moscow: Nauka, 1970. 904 p.
2. Bautin S.P. The characteristic Cauchy problem and its applications in gas dynamics. Novosibirsk: Nauka, 2009. 368 p.
3. Titov S.S. Spatially periodic solutions of the full Navier-Stokes equations // Doklady Physics. 1999. V. 365. N. 6. P. 761–763.
4. Titov S.S. The nonlinear equations in analytical polyalgebras. I // Proceedings of universities. Mathematics. 2001. V. 1 (452). P. 66–77.
5. Titov S.S. The nonlinear equations in analytical polyalgebras. II // Proceedings of universities. Mathematics. 2001. V. 6 (457). P. 45–52.
6. Fletcher C. 6. Computational methods based on the Galerkin method. Springer-Verlag, 1988. 352 p.

1-24

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАДЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ В ВОДНУЮ АКВАТОРИЮ

В.А. Симоненко¹, Н.А. Скоркин², С.Ю. Филатов¹¹Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия²СФТИ НИЯУ МИФИ, Снежинск, Россия

E-mail: otdeldou@vniitf.ru, sfti@mephi.ru

Предложена методика расчета падения одиночного каменного астероида диаметром 60, 100, 300 и 1000 м со скоростью 12 и 22 км/с. Расчет проведен в два этапа: сначала SPH-метод, затем – теория мелкой воды. Получено удовлетворительное совпадение работами других авторов. Полученную методику можно применить для расчетов распространения цунами по суше.

1-25

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОЛКНОВЕНИЯ АСТЕРОИДА С ЗЕМЛЕЙ

Д.А. Краснослабодцев, В.П. Елсуков, В.А. Симоненко

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

В докладе представлены результаты численного моделирования движения каменного астероида в атмосфере и дальнейшее его взаимодействие с поверхностью Земли. В качестве материала астероида и земной коры использовался гранит. Диаметр астероида 1 км, скорость – 12 км/с, его кинетическая энергия ≈ 24 Гт в тротиловом эквиваленте. Расчет проводился в осесимметричной постановке в газодинамическом приближении по программе МЕС.

Представлена картина течения на последовательные моменты времени до 3 с после удара. Проведены оценки масс и скоростей испаренного, жидкого и твердого веществ, поднявшихся над поверхностью Земли, а также аналогичные оценки для веществ, вылетевших на высоту выше 10 км. Определены приблизительные размеры образовавшегося кратера. В зоне удара для ряда выделенных элементов среды получены траектории их движения и изменение в них давления со временем. Проведено сравнение некоторых результатов расчета с данными других работ.

SIMULATION OF AN ASTEROID IMPACT ON EARTH

D.A. Krasnoslabodtsev, V.P. Elsukov, V.A. Simonenko

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

The paper presents results obtained in the simulation of a stone asteroid's motion in the atmosphere and its impact on the earth surface. Granite is taken for the asteroid and

earth material. The asteroid is 1 km in diameter and moves with a velocity of 12 km/s; its kinetic energy is about 24 Gt of trinitrotoluene. The calculation was done for axially symmetric geometry in a hydrodynamic approximation by the code МЕСН.

Flow patterns for successive times up to 3 seconds after impact are presented. Estimates were obtained for masses and velocities of vaporized, liquid and solid materials near the surface and at an altitude above 10 km. The size of the impact crater is determined approximately. For some elements of the medium in the impact region, we determined trajectories and inner pressures versus time. Some of the results are compared with data provided by other authors.

1-26

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОГО КОМПАКТИРОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.А. Горельский, М.Ю. Орлов, Ю.Н. Орлов

НИИ прикладной математики и механики, Томск, Россия

E-mail: orloff_m@mail.ru

Введение

Проблема исследования нелинейных физико-химических процессов в конденсированных средах (инертных и химически активных) в условиях прессования сухим способом порошкообразных материалов в настоящее время является одним из важных направлений исследований. Однако исследования поведения конденсированных химически активных систем при динамических нагрузках, как в России, так и за рубежом, посвящены, в основном, работы экспериментального плана, а аналитические и численные исследования ограничивались моделированием лишь в одномерной постановке. Качество получаемых таблеток зависит от морфологии и других свойств порошка. Большое влияние на готовую таблетку оказывают технологические приемы смешения, прессования, спекания порошка.

Как показывает практика изготовления таблеток для тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) прямым их прессованием из порошков диоксида урана, полученным после осаждения и прокалки полиуранатов аммония, восстановления до диоксида урана, структура исходных порошков может изменяться от партии к партии и заметно влиять на свойства таблеток. Поскольку производство порошков полиуранатов аммония не устойчиво по своей природе, эта нестабильность при сухом прессовании может приводить к невоспроизводимости свойств таблеток. Поэтому некоторые партии диоксида урана нуждаются в специальной подготовке перед прессованием таблеток. Следствием прессования жестких порошков диоксида урана является образование поперечных микротрещин [1].

Физико-математическая модель и метод расчета

В настоящее время ощущается острая необходимость при рассмотрении подобных задач использо-

вать численное моделирование в двух- и трехмерных постановках. Также необходимы методы непрерывной диагностики вещества в экспериментах по компактированию. При этом большое значение приобретает численное моделирование исследуемых процессов в 2-х и 3-мерной постановках, которое позволит более детально интерпретировать результаты экспериментов.

Поэтому при анализе поведения многофазных смесей на основе керамики особенно возрастает роль численного моделирования, которое позволяет в рамках единой математической модели, используя экспериментальные константы, исследовать процесс прессования порошков в широком диапазоне начальных условий. Цель настоящей работы – исследовать особенности прессования порошков, помещаемых в цилиндрические матрицы, в заданном диапазоне условий прессования.

Система уравнений, описывающая нестационарные адиабатические движения сжимаемой среды, с учетом изменяющейся пористости, для случая осевой симметрии состоит из уравнений неразрывности, движения, энергии, изменения удельного объема пор [1].

В качестве основного инструмента исследований использовался численный лагранжев метод конечных элементов, расчетная часть которого дополнена механизмами расщепления расчетных узлов и разрушения расчетных элементов. Оригинальность метода заключается в том, что он содержит новый способ выделения поверхностей разрыва сплошности материала, не накладывающий серьезных ограничений на решение динамических многоконтактных задач механики деформируемого твердого тела. Расчеты проведены для двумерного осесимметричного случая при помощи суперкомпьютера «СКИФ-Cyberia» [2].

Результаты расчетов

В расчетах моделировалось прессование керамического порошка со связкой из высокомолекулярного полиэтиленгликоля (ПЭГ). Материал порошка диоксида урана UO_2 имел следующие параметры: начальная плотность $\rho_0 = 10,95 \text{ г/см}^3$; модуль Юнга $E = 230,2 \text{ ГПа}$; модуль сдвига $G = 87,4 \text{ ГПа}$; константы уравнения состояния $K = 211 \text{ ГПа}$; $K_2 = K_3 = 0$; предел текучести $\sigma = 0,9 \text{ ГПа}$; $V_1 = 3,04 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$; $V_2 = 2,03 \cdot 10^{-7} / \text{м}^3 \text{ кг}$; $k_4 = 0,07 \text{ (мс)/кг}$; $p_k = -0,75 \text{ ГПа}$. Сходимость каждого решения исследовалась численно путем сравнения результатов, получаемых для различных пространственно-временных разбиений.

Результаты расчетов получены в виде текущих конфигураций процесса взаимодействия на разных стадиях, в виде поверхностей напряжения, плотностей и гидростатического давления и пористости. Было установлено, что на первом этапе прессования прочностные параметры слабо влияют на протекания процесса прессования. Напряжения в образце составляют 0,3 предела текучести. Причем наибольшие напряжения наблюдались на внешней поверхности вблизи поршней. Расчетным путем установлено, что сдвиговые напряжения к концу процесса прессования возрастают в примерно в 10 раз по сравнению с образцом спрессованным до половины размера, а девиаторные составляющие напряжения возрастают примерно в 2 раза по сравнению

с спрессованным наполовину. Неоднородность напряженного состояния также резко возрастает на последней стадии процесса.

Показано, что максимальная плотность в конечном образце почти в 2 раза больше чем в сжатом наполовину. Неоднородности плотности к окончанию сжатия выражены меньше, чем в середине процесса. Установлено, что максимальные значения гидростатического давления на последней стадии процесса приблизительно в 5 раз больше, чем в середине процесса.

Таким образом проведенные параметрические исследования позволили сделать следующие выводы и рекомендации. Создана многомерная многофазная математическая модель, описывающей основные физико-химические процессы, определяющие прессование таблеток.

Разработан алгоритм для численной реализации созданной математической модели процесса сухого прессования порошкообразного материала. Проведены параметрические расчеты, которые показали работоспособность программы расчета в заданных техническим заданием условий прессования и позволили разработать рекомендации по оптимизации технологического процесса. Проведена оценка влияния технологических факторов и физических параметров на стабильность режима прессования таблеток. Даны рекомендации по выбору технологических факторов обеспечивающих высокую степень вероятности получения конечного продукта заданного качества.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Кадры» (ГК №14.740.11.0585 от 05.10.2010 г.).

Литература

1. Горельский В.А., Орлов Ю.Н., Орлов М.Ю. Кинетика уплотнения керамических порошков тепловыделяющих элементов при динамическом компактировании // Материалы VII Международной конференции «Окуневские чтения», Россия, Санкт-Петербург, 2011, С. 152–154.
2. Орлов Ю.Н. // Российское агентство по патентам и товарным знакам: Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ №2010610910. – М. 2010.

NUMERICAL SIMULATION OF DYNAMIC POWDER MATERIALS COMPACTING

V.A. Gorelski, M.Yu. Orlov, Yu.N.Orlov

Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Tomsk, Russia

E-mail: orloff_m@mail.ru

Introduction

The problem of the study of nonlinear physical and chemical processes in condensed matter (inert and reactive) in dry compaction of powder materials is currently one of the important areas of research. However, studies of the behavior of condensed reactive systems under dynamic loads, both in Russia and abroad, devoted, mostly, of the experimental design, and analytical and numerical studies of modeling limited to only one-dimensional formulation. The quality of the tablets depends on the morphology and other properties of the powder. Great influence on the pill have finished processing methods of mixing, the pressing, powder sintering.

Practice shows that production of pellets for fuel elements (cartridges) of direct pressing of uranium dioxide powders obtained after deposition and calcination poliuranatov ammonium reduction to uranium dioxide, the structure of the initial powders can vary from batch to batch, and noticeably affect the properties of the tablets. Since the production of powders poliuranatov ammonium is not stable by nature, this instability in dry compaction can lead to irreproducibility properties of tablets. Therefore, some parties of uranium dioxide in need of special training prior to extrusion-eating pills. Consequence of the hard pressed powders of uranium dioxide is the formation of transverse cracks [1].

Physical-mathematical model and calculation method

Currently, there is an urgent need for the consideration of such problems using The numerical simulation of two-and three-dimensional formulations. Methods are also needed continuous diagnostics of the substance in experiments on compacted. At the same time becomes very important numerical simulation of processes studied in 2 - and 3-D simulations, which will allow a more detailed interpreted the results of the experiments.

Therefore, when analyzing the behavior of multiphase mixtures based ceramics in particular, the role of the numerical simulation, which allows in a single mathematical model, using the experimental constants, to investigate the process of compacting powders in a wide range of initial conditions. The aim of this work - to investigate the features of powder pressing, placed in the cylindrical matrix, within a range of pressing conditions.

The system of equations describing the unsteady adiabatic motion of a compressible medium, taking into account the varying porosity, in the case of axial symmetry consists of the equations of continuity, momentum, energy, changes in the specific volume of pores [1].

The main research tool used by the numerical Lagrangian finite element method, part of which is complemented by computational mechanisms of cleavage sites and the calculated destruction of even distribution of elements. The originality of the method lies in the fact that it contains a new method of separating the surfaces of material discontinuity, do not impose serious restrictions on the solution of dynamic multi-contact problems of solid mechanics. The calculations were performed for two-dimensional axisymmetric case using a supercomputer «SKIF-Cyberia» [2].

The results of calculations

The calculations simulated compaction of ceramic powder with a bunch of high molecular weight in lietilenglikolya (PEG). The material is uranium dioxide UO_2 powder had the following parameters: $\rho_0 = 10.95 \text{ g/cm}^3$, Young's modulus $E = 230.2 \text{ GPa}$, ρ the initial density shear modulus $G = 87,4 \text{ GPa}$; constant equation of state of the $K = 211 \text{ GPa}$; $K_2 = 0,9 \text{ GPa}$; $V_1 = 3,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$; $V_2 = 2,03 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$; $k_4 = 0,07 \text{ (ms) / kg}$; $\sigma = K_3 = 0$, the yield stress $p_{k=0} = -0.75 \text{ GPa}$. The convergence of each solution was studied numerically by comparison of the results of obtained for different spatio-temporal partitions.

The calculation results obtained in the form of the current configuration of the interaction at different stages in the form of surface tension, density and hydrostatic pressure and porosity. ut the form that the first stage of compression strength parameters have little effect on the percolation process extrusion. The stresses in the sample account for 0.3 of the yield strength. Moreover, the maximum stresses were observed near the outer surface of the piston. Calculations revealed that the shear stress at the end of the compaction process are increasing about 10 times compared with the sample compressed to half the size and components of the deviatoric stresses increase approximately 2-fold compared with pressed-nym half. The heterogeneity of the stress state also increases dramatically during the last stage of the process.

It is shown that the maximum density in the final sample is almost two times more than in the compressed-napolovi well. Density inhomogeneities by the end of compression are less pronounced than in the middle of the process. It is established that the maximum hydrostatic pressure at the last stage of the approximately 5-fold higher than in the middle of the process.

Thus, the parametric studies carried out led to the following conclusions and recommendations re-created multi-dimensional multiphase mathematical model describing the basic physical and chemical processes that determine the compaction of tablets.

An algorithm for the numerical implementation of the mathematical model created by the process of dry Extrusion of powder material. Parametric calculations are performed, which showed performance calculation program in the given technical requirements of the conditions of pressing and allowed to develop a recommendation for process optimization. The influence of technological factors, and physical parameters on the stability of the regime pressed tablets. Recommendations on the choice of techno-logical factors, providing a high degree of probability of the final product of the first set of quality.

This work was supported by the federal program «Human Resources» (CC on 05.10.2010 № 14.740.11.0585).

References

1. Gorelski V.A., Orlov Y.N, M.Y. Orlov Kinetics of compaction of ceramic powders, fuel cells under dynamic compaction // Proceedings of the VII International Conference «Reads Okunev» Russia, St. Petersburg, 2011, pp. 152-154.
2. Yuri Orlov // Russian Agency for Patents and Trademarks: The certificate of official registration of programs for computer № 2010610910. - М. 2010.

1-27

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ПРОБИТИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ПРЕГРАД ПОЛУБОЛОЧЕЧНЫМИ УДАРНИКАМИ

В.П. Глазырин, М.Ю. Орлов, Ю.Н. Орлов

НИИ прикладной математики и механики, Томск, Россия

E-mail: orloff_m@mail.ru

Введение

Постоянное совершенствование средств кинетического воздействия на защищаемые объекты заставляют

разработчиков современных защитных конструкций искать принципиально новые пути по повышению их ударной стойкости. Современные средства поражения и защит – это структурно-неоднородные конструкции (сэндвич панели, слоистые и блочно-модульные конструкции и т.п.), поэтому существует острая необходимость в разработке метода расчета ударного и взрывного нагружения таких конструкций. В работе при помощи разработанных средств математического моделирования проведены параметрические исследования на предмет ударной стойкости неоднородных преград при взаимодействии с полуоболочечными ударниками [1].

Физико-математическая модель и метод расчета

Модель поведения среды является сложной моделью механики сплошных сред, широко используемой при математическом моделировании процессов деформирования твердых тел. Она соответствует современным физическим представлениям о процессах деформирования и разрушения материалов при ударных нагрузках и является упруго-пластической, сжимаемой, пористой, учитывающей свойства прочности, ударно-волновые явления, а также совместное образование отрывных и сдвиговых разрушений. Уравнение состояния выбрано в форме Уолша, основным достоинством которого является широкая доступность фигурирующих в нем постоянных [2].

В качестве основного инструмента исследований использовался численный лагранжев метод, расчетная часть которого дополнена механизмами расщепления расчетных узлов и разрушения расчетных элементов. Оригинальность метода заключается в том, что он содержит новый способ выделения поверхностей разрыва сплошности материалов не накладывающий серьезных ограничений на решение современных динамических многоконтактных задач механики деформируемого твердого тела [3].

Результаты расчетов

Физическая постановка задачи формулируется как контактное взаимодействие полуоболочечных пуль броневой патронов 9×19 7N21 и 7N31 (Россия) со слоистыми стальными и дюралюминиевыми преградами. Начальная скорость ударников варьировалась в диапазоне до 600 м/с. Серия вычислительных экспериментов проведена в двумерной осесимметричной постановке. Результаты расчетов получены в виде рассчитанных конфигураций «ударник – мишень», графиков и таблиц.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Кадры» (ГК №14.740.11.0585 от 05.10.2010 г.), РФФИ 10-08-00633а, 10-08-00398а.

Литература

1. Орлов М.Ю. Численное моделирование процесса пробития слоистых преград удлиненными ударниками // Забабахинские научные чтения. – 2010: Сборник материалов X Международной конференции, 15–19 марта 2010., Снежинск: Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2010, С. 21–22.
2. Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Некоторые аспекты процесса пробития слоистых преград удлиненными ударниками // Известия вузов. Физика – Т.53. – №12/2. – 2010. С. 175–181.

3. Орлов Ю.Н. // Российское агентство по патентам и товарным знакам: Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ №2010610910. – М. 2010.

NUMERICAL CALCULATION OF THE PERFORATION INHOMOGENEOUS PLATE BY PROJECTILES

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

Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Tomsk, Russia
E-mail: orloff_m@mail.ru

Introduction

Continuous improvement of the kinetic effects on protected objects forced developers to look for protective structures of modern innovative ways to increase their impact resistance. The modern means of destruction and protection is structurally inhomogeneous structures (sandwich, layered and block-modular structures, etc.), so there is an urgent need to develop a method for calculating the shock and explosive loading of such structures. In the work developed by means of mathematical modeling of parametric studies conducted for the shock resistance of inhomogeneous barriers when interacting with projectiles [1].

Physical-mathematical model and calculation method

Model the behavior of the environment is a complex model of continuum mechanics, are widely used in mathematical modeling of deformation processes in solids. It corresponds to the modern physical concepts about the processes of deformation and fracture of materials under shock loading is elastic-plastic, compressible, porous, taking into account the properties of strength, shock-wave phenomena, as well as the formation of a joint separation and shear destruction. The equation of state is chosen in the form of Walsh, the main advantage is the wide availability of it appearing in the constants [2].

The main research tool used Lagrangian numerical method, the estimated portion of which supplemented the mechanisms of splitting nodes and calculated destruction of settlement elements. The originality of the method lies in the fact that it contains a new method of isolating surface discontinuity materials does not impose serious restrictions on the solution of modern dynamic multi-contact problems of solid mechanics [3].

The results of calculations

The physical setting of the problem is formulated as a soft point contact interaction bullets armor piercing rounds 9 × 19 7N21 and 7N31 (Russia) with a laminated steel and duralumin obstacles. The initial velocity of projectiles was varied in the range up to 600 m / s. A series of numerical experiments carried out in two-dimensional axisymmetric formulation. The calculation results obtained in the form of calculated configurations, «the projectile – target», graphs and tables.

This work was supported by the federal program «Human Resources» (CC № 14.740.11.0585 on 05.10.2010), the RFBR 10-08-00633а, 10-08-00398а.

References

1. Orlov MY Numerical simulation of the penetration of layered targets by elongated strikers // Zababakhin skie-scientific reading – 2010: Proceedings of X International Conference, 15-19 March 2010, Snezhinsk Univ VNIITF, 2010, pp. 21–22.
2. Orlov MY, Orlov YN Some aspects of the penetration of layered targets by elongated strikers // Trans. Physics - T.53. – № 12/2. – 2010. S. 175–181.
3. Yuri Orlov // Russian Agency for Patents and Trademarks: The certificate of official registration of programs for computer № 2010610910. – М. 2010.

1-28

**САМОСОГЛАСОВАННАЯ
НЕЛОКАЛЬНО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ
МОДЕЛЬ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО
ПРОНИКАНИЯ УДЛИНЕННЫХ УДАРНИКОВ
В ПРОЧНЫЕ ПРЕГРАДЫ**

Г.Г. Савенков¹, Т.А. Хантулева²

¹Научно-исследовательский институт «Поиск»,
Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: sav-georgij@yandex.ru

Предложена новая математическая модель процесса проникания удлиненных ударников в прочные металлические преграды с начальными скоростями соударения $2,0 \leq V_0 \leq 4,0$ км/с, которая позволяет описать все стадии проникания.

Система уравнений, описывающая данный процесс, состоит из уравнения движения ударника, баланса импульса среды и баланса внутренней энергии. Уравнение движения ударника в преграде записывается в форме уравнения движения точки с переменной массой с учетом увеличения силы сопротивления на контактной поверхности за счет соответствующего роста площади ударного торца стержня. Напряжения в среде в уравнении баланса импульса определяются на основе нелокально-гидродинамической модели с памятью, которая охватывает весь диапазон реакций среды в процессе высокоскоростного проникания. Стандартная гидродинамическая модель Алексеевского-Тейта описывает только последнюю стадию процесса проникания, тогда как при очень высоких скоростях деформации на начальной стадии проникания наблюдается упругая деформация далеко за статическим пределом упругости среды. Предложенная модель единообразно описывает обе стадии проникания, включая переходную область между ними. Параметры режима изменяются при изменении режимов за счет обратных связей с изменением реакции среды по законам теории управления. Модель содержит эмпирическую константу, характеризующую свойства среды – способность сохранять или изменять свою внутреннюю структуру под действием внешнего нагружения. Уравнение баланса энергии описывает интегральные потери механической энергии не только на диссипацию, но и на самоорганизацию структур в среде с большими деформациями.

В рамках разработанной модели приводится решение задачи для процесса проникания удлиненного медного ударника в стальные и титановые преграды с начальной скоростью соударения $V_0 = 3$ км/с. Поскольку система интегро-дифференциальных уравнений замыкается алгоритмами управления через обратные связи и слишком сложна, используются упрощения и эмпирические данные. Полученные расчетные значения глубин внедрения сравниваются с результатами классической гидродинамической модели и экспериментальными данными.

**SELF-CONSISTENT NONLOCAL
HYDRODYNAMIC MODEL OF THE ELONGATED
IMPACTORS PENETRATION INTO SOLID
BARRIERS**

G.G. Savenkov¹, E.A. Khantuleva²

¹«Poisk» Research Institute, Saint-Petersburg, Russia

²Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

E-mail: sav-georgij@yandex.ru

New mathematical model for the penetration of elongated impactors into durable metal barriers in the impact velocities range $2.0 \leq V_0 \leq 4.0$ km/s allowing description of all penetration stages.

A set describing the process includes equations for the impactor movement, for the medium pulse and the internal energy balance. The equation for the impactor movement is written in a form corresponding to the variable mass movement taking into account the growing resistance on the contact surface due to the growing square of the shocking rod butt-end. Medium stress in the pulse balance equation is defined in accordance with the nonlocal hydrodynamic model with memory embracing all the range of the medium reactions to the high-rate penetration. The conventional hydrodynamic model of Alekseevskiy-Tate describes only the last penetration stage as far as on the initial stage at very high strain-rate an elastic deformation is observed far after the static elastic medium limit. The proposed model uniformly describes both penetration stages including a transition region between them. Regime parameters evolve with the medium reaction evolution due to feedback in accordance with the control theory. The model includes an empiric constant that characterizes a medium ability to conserve or change its internal structure under external loading. The internal energy equation involves not only the integral mechanical energy loss due to dissipation but also to self-organization of new internal structures in high-rate strained medium.

The problem on elongated copper impactor penetration into steel and titanium barriers at the impact velocity $V_0 = 3$ km/s is solved in scope of the nonlocal hydrodynamic model. As the set of equations includes the control algorithms through the feedback making its solution very cumbersome, simplifications and some experimental data are used. The calculated penetration depths are compared with the conventional model results and experimental ones.

1-29

СЕМЕЙСТВО ДИСКОВЫХ ВМГ С ПЛОСКИМИ ДИСКОВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

М.Ю. Арюткин, Б.Е. Гриневич, М.А. Дрямов,
Б.Т. Егорычев, В.Б. Куделькин, А.И. Краев,
К.Н. Климушкин, В.И. Мамышев, Ю.И. Матцев

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия
E-mail: krayev@elph.vniief.ru

Приведены результаты испытаний семейства дисковых взрывомагнитных генераторов (диаметром 250, 400 и 1000 мм) с плоскими дисковыми зарядами взрывчатого вещества (ВВ) и металлическими вкладышами треугольного сечения, установленными в полостях сжатия магнитного потока. Использование ДВМГ данного типа позволяет сохранить выходные электрические характеристики дисковых ВМГ семейства «ПОТОК» и уменьшить в два раза количество ВВ в дисковом элементе.

A FAMILY OF DISK EMG WITH FLAT DISK ELEMENTS

M.Yu. Aryutkin, B.E. Grinevich, M.A. Dryamov,
B.T. Egorychev, V.B. Kudelkin, A.I. Kraev,
K.N. Klimushkin, V.I. Mamyshev, Yu.I. Matsev

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific Research
Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia
E-mail: krayev@elph.vniief.ru

The paper presents the results of testing of a family of disk explosive magnetic generators (250, 400 and 1000 mm in diameter) with flat disk explosive (HE) charges and metal inserts of triangular section installed in the magnetic flux compression cavities. The application of the DEMG of this type allows preserving the output electrical parameters of the disk EMG of «ПОТОК» family and reducing the amount of HE in a disk element by a factor of two.

1-30

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД НА ОСНОВЕ ДИСКОВОГО ВМГ Ø 250 мм ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ НАГРУЖЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ЛАЙНЕРАМИ

М.Ю. Арюткин, Б.Е. Гриневич, М.А. Дрямов,
И.А. Изутов, В.Б. Куделькин, А.И. Краев,
К.Н. Климушкин, В.И. Мамышев, Ю.И. Матцев

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия
E-mail: kudelkin@elph.vniief.ru

В докладе рассмотрена возможность создания экспериментального стенда для моделирования физических процессов и исследования свойств материалов при нагружении образцов ударом цилиндрических лай-

неров, ускоренных магнитным полем. Энергетической основой установки служит 30-элементный дисковый взрывомагнитный генератор (ДВМГ) Ø 250мм.

Представлены результаты расчетов и испытаний ДВМГ малого класса (Ø 250мм) с плоскими дисковыми зарядами взрывчатого вещества (ВВ), подтверждающие возможность создания многоэлементных дисковых генераторов для проведения экспериментов по исследованию свойств материалов.

EXPERIMENTAL TEST BENCH ON THE BASIS OF DISK EMG Ø 250 мм TO STUDY PROPERTIES OF MATERIALS UNDER CONDITIONS OF LOADING BY CYLINDRICAL LINERS

M.Yu. Aryutkin, B.E. Grinevich, M.A. Dryamov,
B.T. Egorychev, I.V. Izutov, V.B. Kudelkin,
A.I. Kraev, K.N. Klimushkin,
V.I. Mamyshev, Yu.I. Matsev

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific Research
Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia
E-mail: kudelkin@elph.vniief.ru

The paper will describe the experimental test bench to model the physical processes and to study the properties of materials under conditions of loading by the cylindrical liners on the basis of a 30-element disk explosive magnetic generator (DEMG) Ø 250 mm.

The results of calculations and testing of a small-class (Ø 250 mm) DEMG with flat disk explosive (HE) charges and with metal inserts of triangular section installed in the magnetic flux compression cavities will be presented.

1-31

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ МОБИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПУШКИ

К.С. Вахмистров, М.А. Виденькин, В.Н. Катаев,
М.В. Климашов, Е.Ю. Климов, П.В. Королёв,
А.С. Пикарь, А.С. Руссков, Н.В. Сарычева,
В.Д. Селемир, Д.А. Толшмяков

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия
E-mail: pikar_alex@mail.ru

В докладе представлены результаты экспериментальных исследований направленных на поиск путей создания мобильной электромагнитной пушки с использованием технологии коаксиальных ускорителей. Коаксиальный ускоритель с внешним магнитным полем позволяет в разы повысить темп ускорения при одновременном уменьшении длины ствола, а коаксиальность конструкции обеспечивает необходимую механическую прочность.

Исследована работа мобильного электромагнитного ускорителя в режиме с малым внешним магнитным полем (почти «классического» рельсотрона) и в режиме

объемного ускорения во внешнем магнитном поле. Длина коаксиального рельсотрона 0,6 м, соотношение диаметров 62 и 50 мм. Использовались снаряды из латуни и нержавеющей стали квадратного сечения 6×6 мм², длиной 50 и 25 мм, с отношением длина-калибр 8 и 4, массой 15 и 7 г. Коаксиальный электромагнитный ускоритель запитывался от конденсаторной батареи емкостью 6000 мкФ напряжением 16 и 20 кВ через понижающий трансформаторный узел с коэффициентом трансформации 15. В первом эксперименте ток, проходящий через снаряд, был на уровне 1,6 МА. Внешнее магнитное поле составляло 3 Тл, собственное поле 11 Тл, длина ускорения 0,44 м. Во втором эксперименте величина тока пропускаемого через снаряд составила 1,2 МА, внешнее магнитное поле 10 Тл, собственное поле 8 Тл, длина ускорения 0,6 м. Зафиксирована скорость снаряда в первом эксперименте 1,4 км/с измеренная по контактной методике. Во втором эксперименте, при вылете из ствола, произошел удар снаряда в торцевую шайбу и его разрушение из-за дефекта детали. Удалось зафиксировать скорость осколков, при этом расчетное значение скорости по экспериментальным токам на том же уровне, более 2 км/с.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF POSSIBILITY OF MOBILE ELECTROMAGNETIC LAUNCHER CREATION

K.S. Vakhmistrov, M.A. Videnkin, V.N. Kataev,
M.V. Klimashov, E.Yu. Klimov, P.V. Korolev, A.S. Pikar,
A.S. Russkov, N.V. Sarycheva,
V.D. Selemir, D.A. Tolshmyakov

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

E-mail: pikar_alex@mail.ru

The paper presents experimental results of the research aimed at creation of mobile electromagnetic launcher using a technology of coaxial accelerators. The coaxial launcher with an external magnetic field allows multiplying an acceleration rate at simultaneous decrease of the barrel length. Coaxial design provides necessary mechanical strength.

Operation of the mobile electromagnetic launcher in the regime with small external magnetic field (almost «classical» railotron) and in the regime of volumetric acceleration in the external magnetic field has been studied. Length of the coaxial railgun is 0.6 m, diameters ratio is 62 and 50 mm. Brass and stainless steel shells of square section of 6×6 mm² and length of 50 and 25 mm, having the length-caliber ratio of 8 and 4, mass of 15 and 7 g have been used. The coaxial electromagnetic launcher has been powered from a capacitor bank of 6000 μ F and voltage of 16 and 20 kV through a step-down transformer unit, having a transformation coefficient 15. In the first experiment the current passing through the shell was 1.6 MA. The external magnetic field was 3 T, the own field was 11 T, the acceleration length was 0.44 m. In the second experiment the value of the current passing through the shell was 1.2 MA, the external magnetic field was 10 T, the own field was 8 T, the acceleration length was 0.6 m. In the first experiment we recorded the projectile velocity of

1.4 km/s using a contact method. In the second experiment the shell hit the butt washer of the barrel and destroyed. We managed to record the velocity of the debris. Calculated velocity according to the same experimental currents was more than 2 km/s.

1-32

БАЛАНС ЭНЕРГИИ В РЕЛЬСОВЫХ И КОАКСИАЛЬНЫХ УСКОРИТЕЛЯХ МАКРОТЕЛ

М.В. Климашов, П.В. Королёв, А.С. Пикарь

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

E-mail: pikar_alex@mail.ru

Рассмотрен баланс энергии в рельсовом и коаксиальном ускорителях макротел. Описана методика расчета и приводятся формулы для потерь энергии на Джоулев нагрев рельсов и работу сил ускорения снаряда. Показано, что эффективно ускорять можно снаряды лишь тогда, когда калибр рельсотрона заметно превышает толщину скин-слоя магнитного потока в рельсах. Кроме того, должно быть выполнено условие спада тока в процессе ускорения, а контактное напряжение должно быть существенно меньше напряжения источника питания. В коаксиальном ускорителе с внешним магнитным полем баланс энергии примерно такой же, как и в классическом рельсотроне, и эффективность ускорения ограничена теми же факторами – калибр должен превышать толщину скин-слоя, контактное напряжение должно быть существенно меньше напряжения источника питания, а ток через снаряд должен спадать в процессе ускорения. В то же время, благодаря объемному характеру сил, темп ускорения в коаксиальном ускорителе с внешним магнитным полем в несколько раз больше по сравнению с классическим рельсотроном.

ENERGY BALANCE IN RAIL AND COAXIAL LAUNCHERS

M.V. Klimashov, P.V. Korolev, A.S. Pikar

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

E-mail: pikar_alex@mail.ru

Energy balance in rail and coaxial launchers of macrobodies is considered. A calculation method is described and formulas are presented for energy losses due to rails Joule heating and work of the projectile acceleration forces. It is shown that the projectile could be efficiently accelerated in a case, when a caliber of the railgun significantly exceeds a skin-layer thickness of a magnetic flux in the rails. Besides, a condition of the current decrease during the acceleration process must be fulfilled, and a contact voltage must be significantly lower than that of a power source. The energy balance of the coaxial accelerator with the external magnetic field is similar to the classical railgun. Efficiency of the acceleration is limited by the same factors: the caliber should exceed thickness of the skin-layer, contact voltage

should be significantly smaller than the power source voltage, and the current passing through the shell should decrease during acceleration. At the same time, acceleration rate in the coaxial accelerator with the external magnetic field is several times higher in comparison with the classical railgun due to volumetric character of the forces.

1-33

ПЕРЕКРЫТИЕ ВАКУУМНЫХ КАНАЛОВ ВЫВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ

А.С. Борискин, К.С. Вахмистров, С.В. Веретехина,
М.А. Виденькин, Ю.В. Власов, В.Н. Катаев,
Е.Н. Киршанова, М.В. Климашов, Е.Ю. Климов,
П.В. Королёв, А.С. Пикарь, Н.В. Сарычева,
О.М. Таценко, Д.А. Толшмяков, А.В. Филиппов

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

В данной работе представлены результаты расчетных и экспериментальных исследований перекрытия вакуумных каналов вывода излучения (ВКВИ) установки ЭМИР с диаметрами до 10 мм с целью защиты датчиков излучения от воздействия продуктов взрыва.

Рассмотрены два способа перекрытия канала: электромагнитный и механический. Перекрытие механическим способом осуществлялось с помощью плунжера, приводимым в движение продуктами взрыва. Для перекрытия электромагнитным способом использовалась установка для получения сильных магнитных полей.

Скорость перекрытия ВКВИ измерялась контактными датчиками, расположенными снаружи и внутри канала, а также с помощью оптической методики. При использовании данной методики равномерное по сечению лазерное излучение пропускается через внутреннее отверстие трубки и с помощью линзовой системы фокусировки заводится в оптическое многомодовое волокно. Регистрация мощности светового импульса, излученного через внутреннее отверстие трубки, производится фотоприемником. По времени спада интенсивности прошедшего излучения можно судить о времени схлопывания и скорости деформации обжимаемого канала.

OVERLAPPING OF RADIATION COUPLING VACUUM CHANNELS

A.S. Boriskin, K.S. Vakhmistrov, S.V. Veretekhina,
M.A. Videnkin, Yu.V. Vlasov, V.N. Kataev,
E.N. Kirshanova, M.V. Klimashov, E.Yu. Klimov,
P.V. Korolev, A.S. Pikar, N.V. Sarycheva, O.M. Tatsenko,
D.A. Tolshmyakov, A.V. Filippov

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

The paper presents calculation and experimental investigation results of vacuum channels overlapping for radiation coupling (VCRC) of EMIR facility with the diameters up to 10 mm in order to protect the radiation probes from detonation products influence.

Two methods of the channel overlapping: electromagnetic and mechanic ones are considered. Overlapping with the mechanical method was made with a piston, being moved by the explosion products. A facility for ultra-high magnetic fields generation was used for overlapping by the electromagnetic method.

Overlapping rate of the VCRC was measured by contact probes located outside and inside of the channel, and also using an optical method. In this method the laser radiation with uniform section is passed through the inner hole of a tube and entered to an optical multimode fiber using lens focusing system. Recording of the light pulse power irradiated through the inner hole of the tube is made with a photo receiver. One can calculate an implosion time and deformation velocity of the compressed channel using intensity drop of the passed radiation.

1-34

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЛИНЕЙНАЯ ТЕОРИЯ РАЗВИТИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В СЛОИСТЫХ СИСТЕМАХ

К.Е. Городничев

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт
автоматики», Москва, Россия

E-mail: vniiia@vniia.ru

В данной работе рассмотрен процесс столкновения железного ударника, движущегося со скоростью 5 км/с, со слоистой системой. Данная система представляет из себя последовательность железных и алюминиевых пластин. В ударнике задано начальное поле возмущений плотности, начальные возмущения давления отсутствуют. Для всех веществ использовался УРС Ми-Грюнаизена. В областях слоистой системы начальное возмущение гидродинамических величин отсутствует.

При ударе по системе, в пластинах начинает распространяться ударная волна, за фронтом которой возникают возмущения, обусловленные наличием начальных неоднородностей в ударнике. Данный процесс сопровождается многократным отражением УВ и явлением распада разрыва на границе материалов. При рассмотрении данной задачи использовался подход, описанный в [1]. Он заключается в линеаризации уравнений гидродинамики по малому параметру и последующего рассмотрении поля возмущений в виде совокупности звуковых и энтропийных волн.

В результате данной работы сделана попытка описания временной эволюции поля возмущений в слоистой системе, состоящей из последовательности железных и алюминиевых пластин. Показано, что наличие неоднородностей плотности в ударнике приводит к незатухающим возмущениям на фронте ударной волны, распространяющейся по слоистой системе. Полученные результаты согласуются с классической линейной теорией Рихтмайера-Мешкова [2].

Литература

1. Дьяков С.П. Об устойчивости ударных волн // ЖЭТФ, 1954. т. 27. № 3. с. 288–295.

2. Richtmyer R.D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids // *Commun. Pure Appl. Math.* 1960 Vol. 13. p. 297–319.

ANALYTICAL LINEAR THEORY OF INHOMOGENEITIES IN SANDWICH-TYPE SYSTEMS

K.E. Gorodnichev

FSUE «All-Russia research institute of automatics»,
Moscow, Russia

E-mail: vniia@vniia.ru

In this work collision process of iron impactor with velocity 5 km/s and sandwich-type system are considered. This system is a set of iron and aluminium plates. Initial field of density non-uniformities, is existed in impactor, perturbations of pressure is absent. The Gruneisen equation of state is applied for all materials. Initial perturbations of hydrodynamics values of sandwich-type system are absent.

Shock wave propagate in plates after impact, and perturbations generates after its front. They connect with initial inhomogeneities of impactor. The breakup of shock wave on material boundaries and multiple wave reflection accompany this process. The approach similar to [1] is used in this work. It consist of small parameter linearization of hydrodynamic equations and further interpretation of inhomogeneities field like a set of sound and entropy waves.

Consequently made an attempt to description time evolution of inhomogeneities field in sandwich-type system (set of iron and aluminium plates). Its shown, existence of density non-uniformities in impactor determines non-decay perturbations of front of shock wave propogating in sandwich-type system. Present result agree with classical linear Richtmyer-Meshkov theory [2].

References

1. Dyakov S.P. On the stability of shock waves // *Zh. Exp. Theor. Phys.* 1954. Vol. 27. № 3. p. 288–295.
2. Richtmyer R.D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids // *Commun. Pure Appl. Math.* 1960. Vol. 13. p. 297–319.

1-35

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ЗОНЫ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ГАЗОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕСТАЦИОНАРНОГО СЖАТИЯ В ЗАКРЫТОЙ ТРУБЕ

В.В. Кривец, Е.И. Чеботарёва, С.Н. Титов

ОАО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского»,
Москва, Россия

E-mail: vitaliy.krivets@eninnet.ru

Эксперименты проводились на трубе квадратного сечения, где сжатие газов создавалось перед фронтом пламени, движущимся с ускорением в горючей смеси [1, 2]. Исследовалось перемешивание несгоревшей водородо-кислородной смеси с аргоном, двуокисью углерода, гелием. Начальная область контактного перемешивания (ОКП) между газами создавалась плоской

выдвигающейся пластиной. Волны сжатия, вызванные фронтом горения, первоначально ускоряли ОКП, затем, отразившись от торца трубы, замедляли движение зоны. Таким образом, процесс перемешивания протекал под действием ускорения, нестационарного по величине и направлению. С целью получения различных условий торможения ОКП в экспериментах менялось расстояние от начального положения зоны до торца трубы. Увеличение расстояния приводило к тому, что отраженные волны формировали крутые градиенты давления, и на фоне волн сжатия возникали слабые ударные скачки. Для разных режимов торможения ОКП получены времена перефазировки и скорости роста возмущений. Для визуализации процесса использовался интерферометр. Газодинамические параметры и граничные условия вблизи зоны перемешивания рассчитывались по 1D численной модели, согласованной с экспериментом.

Литература

1. Чеботарёва Е.И., Кривец В.В., Титов С.Н. Экспериментальное исследование перемешивания газов разной плотности под влиянием суперпозиции падающих и отраженных волн // *Известия РАН Энергетика*, 2010. № 5. С. 97–102.
2. Zaytsev S.G., Krivets V.V., Mazilin I.M. et al. Evolution of the Rayleigh-Taylor Instability in the Mixing Zone Between Gases of Different Densities in a Field of Variable Acceleration // *Laser and Particle Beams*, 2003. № 21. P. 393–402.

EXPERIMENTAL STUDY OF MIXING ZONE EVOLUTION IN GASES BY THE ACTION OF UNSTEADY COMPRESSION IN A CLOSED TUBE

V.V. Krivets, E.I. Chebotareva, S.N. Titov

Joint-Stock Company «G.M. Krzhizhanovsky Power Engineering
Institute», Moscow, Russia

E-mail: vitaliy.krivets@eninnet.ru

Experiments were conducted in the square cross-section tube, where compression of gases was generated in front of flame moved with acceleration in a combustible mixture [1, 2]. The mixing between unburned hydrogen-oxygen mixture and argon, carbon-dioxide, and helium was studied. An initial mixing zone (MZ) between gases was formed by removable flat plate. Compression waves, initiated by flame front, accelerated MZ at the beginning then after reflection from tube end-wall these waves decelerated zone movement. In such a way the mixing process occurred under the influence of acceleration which had unsteady direction and value. To get different conditions of MZ deceleration the distance between MZ initial position and tube end-wall was varied. As a result of distance increase the reflected waves formed steep pressure gradients and weak shocks appeared within compression waves. Growth-rate and inversion time duration of MZ perturbation were obtained for different deceleration regimes. To visualize the process an interferometer was utilized. Gas-dynamic parameters and boundary conditions near the MZ were calculated using 1D numerical model which was consistent with experiment.

References

1. Chebotareva E.I., Krivets V.V., Titov S.N. Experimental study of mixing of different gases under the influence of incident and

reflected waves superposition. *Izvestia RAN Energetica*, 2010. № 5. P. 97–102.

2. Zaytsev S.G., Krivets V.V., Mazilin I.M. et al. Evolution of the Rayleigh-Taylor Instability in the Mixing Zone Between Gases of Different Densities in a Field of Variable Acceleration // *Laser and Particle Beams*, 2003. № 21. P. 393–402.

1-36

ЯВЛЕНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ТИПА РИХТМАЙЕРА-МЕШКОВА ПРИ МНОГОКРАТНОМ ВОЛНОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

А.Е. Курепин, Е.В. Сидорова

ОАО «Государственный научно-исследовательский институт машиностроения имени В.В. Бахирева», Дзержинск, Россия

E-mail: niimash@mts-nn.ru

Изменение формы границы раздела сред разной плотности при воздействии постоянного (неустойчивость Релея-Тейлора) или кратковременного (неустойчивость Рихтмайера-Мешкова) ускорения экспериментально рассматривалось на примерах различных материалов, находящихся в газообразном, жидком или твердом состоянии [1].

Обычно масштаб сил, вызывающих развитие неустойчивости, значительно превосходит масштаб сил прочности, поэтому результаты процесса проявляются за время от единиц микросекунд до нескольких десятков миллисекунд [2].

Однако, если среды обладают прочностью, сравнимой с уровнем силового воздействия, то для проявления результатов может потребоваться гораздо большее время. Так, формирование в результате гравитационной неустойчивости соляных куполов, «всплывающих» из-под более плотных осадочных пород, происходит миллионы лет [3].

К проявлению неустойчивости Рихтмайера-Мешкова, развивающейся в течение нескольких десятков лет, можно отнести формирование ландшафта острова Ярки – песчаной косы, отгораживающей от Байкала устья рек Кичеры и Верхней Ангары. Берег острова подвергается волновым воздействиям во время штормов. Эти воздействия привели к формированию ряда холмов, расположенных вдоль центральной части острова на расстоянии 10–15 метров друг от друга. По ложбинам, разделяющим эти холмы, во время штормов вода Байкала попадает в расположенную с северной стороны острова лагуну.

Форма дна лагуны, содержащей за каждым из холмов углубления и мели в зонах между холмами, характеризует завершение процесса разрушения острова. Углубления образованы в области встречи водных потоков, перехлестывающих остров во время штормов. В процессе своего развития углубление внедряется в холм, завершая разрушение высокого берега.

Процесс разрушения острова иллюстрируется результатами численного моделирования.

Литература

1. Мешков Е.Е. Исследования гидродинамических неустойчивостей в лабораторных экспериментах. – Саров: ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ», 2006. – 139 с.
2. Михайлов А.Л. Гидродинамические неустойчивости в средах с прочностью – от объекта исследований к инструменту исследований // *Физическая мезомеханика*, 2007, №5 – С.53
3. Исмаил-Заде А.Т., Биргер Б.И. Гравитационная неустойчивость идеально пластичного слоя, покоящегося на слое вязкой жидкости: следствие для диапиризма. // *Физика Земли*. 2001. – № 7. – С. 10

PHENOMENON OF RICHTMYER-MESHKOV-TYPE INSTABILITY AT MULTIPLE WAVE IMPACT

A. Ye. Kurepin, Ye. V. Sidorova

Joint Stock Company State Scientific Research Institute of Mechanical Engineering after V.V. Bakhirev, Dzerzhinsk, Russia

E-mail: niimash@mts-nn.ru

Change of the interface form of the media with different density under constant (Rayleigh-Taylor instability) or shock (Richtmyer-Meshkov instability) acceleration was experimentally considered by the examples of various materials in gaseous, liquid or solid state [1].

Usually the scale of the forces causing development of instability considerably surpasses the scale of the media strength forces, therefore the results of the process are shown in time from several microseconds to several tens of milliseconds [2].

However, if the media possess strength comparable with level of the force effect the exhibiting of the consequences may take much more time. So, formation of the hydrochloric domes «emerging» from under denser sedimentary strata, as the result of gravitational instability, takes millions of years [3].

The possible example of Richtmyer-Meshkov instability developing during several tens of years is the landscape formation of Yarky Island which presents a tongue of sand fencing off the mouths of the Kichery and the Verkhnyaya Angara Rivers from the Baikal. The island coast is exposed to wave impacts during storms. These impacts have led to the formation of a line of hills located along the central part of the island at the distance of 10–15 meters from each other. Along the ravines dividing the hills during storms the water of the Baikal gets into the lagoon located in the north side of the island.

The form of the lagoon bottom containing hollows and banks behind each of the hills in the zones between the hills characterizes the end of the island destruction process. Hollows are formed in the junction of the water streams, gushing over the island during storms. In the course of its development the deepening implants into the hill, finishing destruction of the high coast.

The island destruction process is illustrated with the results of the numerical simulation.

References

- 1 Meshkov Ye.Ye., Investigations of Hydrodynamic Instabilities in Laboratory Experiments. – Sarov: FGUP RFYATS – VNIIEF, 2006, p.139.

2 Mikhailov A.L. Hydrodynamic Instabilities in the Media with Strength – from the Research Subject to the Research Tool // Physical Mesomechanics, 2007, No.5, p.53.

3. Ismail-Zade A.T., Birger B.I. Gravitational Instability of Ideally Plastic Layer Placed upon the Layer of Viscous Liquid: a Consequence for Diapirism. // Physics of the Earth. 2001, No. 7, p.10.

1-37

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА НА ПРОЦЕСС
ПЕРЕХОДА НЕУСТОЙЧИВОСТИ
В ТУРБУЛЕНТНУЮ СТАДИЮ**

Н.В. Невмержицкий, Е.А. Сотсков, Е.Д. Сеньковский,
О.Л. Кривonos, А.А. Половников, Е.В. Левкина,
С.В. Фролов, С.А. Абакумов, В.В. Мармышев

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия
E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

В настоящее время исследователи пытаются численно описать неустойчивости Рэлея-Тейлора и Рихтмайера-Мешкова, чтобы учесть их влияние на процессы кумуляции энергии в мишенях инерциального термоядерного синтеза. Для тестирования расчетных методик используются результаты модельных экспериментов.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния числа Рейнольдса течения на процесс перехода неустойчивости Рэлея-Тейлора в турбулентную стадию. В экспериментах слой жидкости ускорялся сжатым газом. В качестве жидкости применялся глицерин, его водные растворы и вода. В некоторых опытах на свободную поверхность слоя для задания начальных возмущений насыпались твердые частицы (величина зерна – 0,4 мм, плотность 0,91 г/см³) или шарики диаметром 3 мм. Коэффициент кинематической вязкости жидкости варьировался от $\nu \approx 1 \cdot 10^{-6}$ м²/с до $\nu \approx 1,29 \cdot 10^{-3}$ м²/с, величина ускорения жидкого слоя – от $g \approx 10^2 g_0$ до $g \approx 10^3 g_0$, число Рейнольдса достигало 10^6 ; температура жидкости составляла 17–20°C.

Регистрация процесса велась скоростной видеосъемкой.

В экспериментах получены следующие результаты:

1. При числах Рейнольдса $Re < 10^4$ на контактной границе развиваются длинноволновые возмущения. Если имеется ограничение развития этого возмущения жесткой стенкой (контейнером), оно искажается, и образуется струя, направленная в газ. При отсутствии такого ограничения длинноволновое возмущение со временем распадается на коротковолновые, развитие которых приводит к перемешиванию жидкости и газа.

2. Заданные на контактной границе коротковолновые возмущения значительно (на порядок) уменьшают число Re , при котором неустойчивость переходит в стадию перемешивания.

3. Время перехода развития возмущений в турбулентную стадию τ , полученное в экспериментах, значительно выше значения, определенного аналитически.

**STUDY OF THE REYNOLDS NUMBER EFFECT
ON THE PROCESS OF INSTABILITY TRANSITION
INTO THE TURBULENT STAGE**

N.V. Nevmerzhitskiy, E.A. Sotskov, E.D. Senkovskiy,
O.L. Krivonos, A.A. Polovnikov, E.V. Levkina,
S.V. Frolov, S.A. Abakumov, V.V. Marmyshev

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific Research
Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia
E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

At present the researchers attempt to describe the Rayleigh-Taylor and Richtmayer-Meshkov instabilities numerically for taking into account their effect on the processes of energy cumulation in the targets of inertial thermonuclear fusion. The results of model experiments are used for the numerical techniques testing.

The authors present the results of experimental study of the Reynolds number effect on the process of the Rayleigh-Taylor instability transition into the turbulent stage. The experimental liquid layer was accelerated by compressed gas. Glycerin, its aqueous solutions and water were used as liquid. Solid particles (fineness is 0.4 mm, density is 0.91 g/cm³) or balls (diameter is 3 mm) were scattered on the layer free surface to specify the initial perturbations in some experiments. Kinematic viscosity coefficient of liquid was varied from $\nu \approx 1 \cdot 10^{-6}$ m²/s to $\nu \approx 1,29 \cdot 10^{-3}$ m²/s, the value of liquid layer acceleration was varied from $g \approx 10^2 g_0$ to $g \approx 10^3 g_0$, the Reynolds number reached 10^6 ; the temperature of liquid was 17–20°C.

The process was recorded with the use of a high-speed motion picture camera.

The experimental results obtained:

1. Long-wave perturbations are developed at the interface at the Reynolds numbers $Re < 10^4$. If such perturbation growth is limited by a hard wall (a container), this perturbation is distorted, and the jet directed in gas is developed. If there is no such a limitation, long-wave perturbations are resolved into the short-wave ones with time, and their growth results in gas-liquid mixing.

2. Short-wave perturbations specified at the interface reduce significantly (by a factor of ten) the Reynolds number Re for instability to pass into the turbulent mixing stage.

3. Experimentally obtained value of transition time of perturbation growth into the turbulent stage is much higher than the analytical value.

1-38

**«ПОПЕРЕНЫЙ НЕЛИНЕЙНЫЙ КАСКАД» –
ОСНОВА ПОДДЕРЖАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
В СДВИГОВЫХ ТЕЧЕНИЯХ**

Дж.Г. Ломинадзе^{1,2}

¹М. Нодия институт геофизики, Тбилисский
государственный университет, Тбилиси, Грузия

²Абастуманская астрофизическая обсерватория,
Илья государственный университет, Тбилиси, Грузия

E-mail: contact@gsa.gov.ge

В работе анализируется новый вид нелинейных явлений в сдвиговых течениях и роль которая возлагается на нелинейные явления в новой, так называемой, «bypass» концепции турбулентности, разрабатываемой гидродинамическим сообществом для спектрально устойчивых сдвиговых течений.

Основные тренды нелинейных явлений – прямой и обратный каскады – совместно с неустойчивыми и диссипативными линейными явлениями составляют классическую схему турбулентности. В этой схеме, в спектральном пространстве (K-пространстве) существует, так называемый, инерционный интервал которая свободна от действий линейных энергообменных явлений и, фактически, является областью действия нелинейных каскадов. Например, в колмогоровской схеме экспоненциально растут длинноволновые возмущения, которые прямым каскадом перебрасываются через инерционный интервал в коротковолновую область – в область диссипаций.

Однако, в спектрально устойчивых сдвиговых течениях, в которых возможен только временный рост возмущений, баланс сил совершенно другой. Линейный источник этого временного роста не зависит от величины волнового вектора возмущений – зависит лишь от его ориентаций: пространственные Фурье-гармоники возмущений, независимо от их масштаба, имеющие определенную ориентацию волнового вектора по отношению сдвигового течения черпают энергию сдвига и растут. А гармоники с другой ориентацией волнового вектора отдают энергию течению и ослабевают. Т. е., линейные энергообменные процессы являются сильно анизотропными, к тому же покрывают все спектральное пространство (всю масштабную шкалу) не оставляя свободную зону для действия нелинейных процессов и реализации колмогоровской схемы – инерционный интервал, как таковое, отсутствует. Кроме того, сильная анизотропия линейных процессов приводит к анизотропии нелинейных процессов. В таких условиях, основным нелинейным процессом является не прямой или обратный каскад, а «поперечный каскад» – переброс возмущений по углам в спектральном пространстве. Мы приводим результаты прямых численных расчетов динамики двумерного сдвигового течения [1], которые демонстрируют доминирование «поперечного каскада» и подтверждают «bypass» концепцию турбулентности.

Литература

1. Horton W., Kim J-H., Chagelishvili G.D., Bowman J.C., and Lominadze J.G. Angular redistribution of nonlinear perturbations:

a universal feature of nonuniform flows // Phys. Rev. E., 2010, 81, id. 066304.

**«CROSS CASCADE» – BASIS OF MAINTENANCE
OF TURBULENCE IN SHEAR FLOWS**

J.G. Lominadze^{1,2}

¹M. Nodia Institute of Geophysics, Tbilisi State University,
Georgia, Tbilisi, contact@gsa.gov.ge

²Abasturmani Astrophysical Observatory, Ilia State University,
Georgia, Tbilisi

E-mail: contact@gsa.gov.ge

We examine a new kind of nonlinear phenomena in shear flows and the role that is assigned to non-linear phenomena in the new, so-called, «bypass» concept of turbulence, elaborated by hydrodynamic community for spectrally stable shear flows.

The main trends of nonlinear phenomena – direct and inverse cascades – together with unstable and dissipative linear phenomena constitute the classical scheme of turbulence. In this scheme, in the spectral space (K-space), there exists the so-called inertial range that is free from the action of linear energy-exchange processes and, indeed, is the range of non-linear cascades. For example, in the Kolmogorov scheme long wavelength perturbations grow exponentially, which are being transferred by the direct cascade through the inertial range to shorter wavelengths – to the region of dissipation.

However, in spectrally stable shear flows, in which is possible just a transient growth of perturbations, the balance of processes is completely different. Linear source of the transient growth is independent on the wave-vector of perturbations – depends only on its orientation: the spatial Fourier harmonics of perturbations, irrespective of their size, having a definite orientation of the wave-vector with respect shear flow, draw shear energy and amplify. Harmonics having another orientation of wave-vector give the energy to the flow and weaken. In other words, the linear energy-exchange processes are strongly anisotropic, furthermore, cover the entire spectral space does not leaving a free zone for the action of nonlinear processes and, consequently, the implementation of Kolmogorov's scheme – the inertial range, as such, is absent. In addition, the strong anisotropy of the linear processes leads to anisotropy of nonlinear processes. In such circumstances, the main nonlinear process is not a direct or inverse cascade, but the «cross-cascade» – angular redistribution of perturbations in the spectral space. We present the results of direct numerical simulations of the dynamics of two-dimensional shear flow [1], which demonstrate the dominance of the «cross-cascade» and confirm the «bypass» concept of turbulence.

Reference

1. Horton W., Kim J-H., Chagelishvili G.D., Bowman J.C. and Lominadze J.G., Angular redistribution of nonlinear perturbations: a universal feature of nonuniform flows // Phys. Rev. E., 2010, 81, id. 066304.

1-39

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ И ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЯХ

Н.В. Невмержицкий

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия
E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

Гидродинамические неустойчивости Рэля-Тейлора (Р-Т), Рихтмайера-Мешкова (Р-М) и связанное с ними турбулентное перемешивание (ТП) могут отрицательно влиять на работу мишеней инерциального термоядерного синтеза. Учет этого влияния сегодня проводится численными методами. Расчетные методы тестируются на результатах экспериментов.

В работе представлен ряд экспериментальных данных по исследованию развития гидродинамических неустойчивостей на контактных границах (КГ) газ–газ и газ–жидкость.

Исследовалось развитие возмущений и ТП при Р-М неустойчивости на контактной границе газов различной сжимаемости (воздух, He, CO₂, SF₆) в диапазоне чисел Маха ударной волны (УВ) от 1,5 до 9,5. Показано, что с повышением сжатия газов передний фронт зоны перемешивания приближается к фронту УВ, а при $M \geq 8$ в SF₆ он «упирается» в УВ, и волна искажается. С увеличением интенсивности УВ степень затухания турбулентности уменьшается.

Показано также, что с увеличением сжатия «тяжелого» газа характер развития локальных 2D возмущений изменяется не только количественно, но и качественно. Это связано с торможением развития возмущения близлежащей ударной волной. Двумерный характер основного течения в трехслойных газовых системах приводит к развитию неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, что усугубляет процесс перемешивания газов.

Исследования развития ТП на границе газ–жидкость при Р-Т неустойчивости показали, что автомодельная константа, характеризующая темп проникновения фронта газа в жидкость, составляет $\alpha_2 = 0,072 \pm 0,005$ и при $Re \geq 10^6$ не зависит от дальнейшего повышения Re .

Полусферическое локальное возмущение, заданное на неустойчивой границе газ–жидкость, развивается в виде квазиокруглого пузыря, опережающего фронт зоны ТП. Время выхода возмущения на автомодельный режим развития увеличивается с увеличением его начального размера.

Экспериментальные исследования развития ТП на границе SF₆–вода показали, что при сжатии газа до плотности, превышающей плотность воды (при числе Атвуда $A \leq 0$), проникновение фронта газа в жидкость останавливается, но образовавшаяся при $A > 0$ зона перемешивания продолжает медленно расширяться в SF₆ по инерции.

SOME PECULIARITIES OF TURBULENT MIXING GROWTH AND PERTURBATIONS AT HYDRODYNAMIC INSTABILITIES

N.V. Nevmerzhitskiy

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific Research
Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia
E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

Hydrodynamic instabilities of Rayleigh-Taylor (R-T), Richtmayer-Meshkov (R-M), as well as turbulent mixing (TM) due to them, can have a negative effect on work of targets of inertial thermonuclear fusion. This phenomenon is presently taken into account by numerical methods. The numerical methods are tested basing on experimental results.

The authors present experimental data on investigation of growth of hydrodynamic instabilities at the interfaces «gas-gas» and «gas-liquid».

Perturbation growth and TM were investigated under the R-M instability at interface of gases having various compressibilities (air, He, CO₂, SF₆) in the range of Mach number of shock wave (SW) from 1.5 to 9.5. It is shown that the leading front of the mixing zone approaches the SW front as gas compression increases, and it stops against SW at $M \geq 8$ in SF₆, and the wave is distorted. Extent of turbulence attenuation is reduced as SW intensity grows.

It is also shown that the character of growth of local 2D perturbations is changed both quantitatively and qualitatively with increase of compression of «heavy» gas. The reason is deceleration of perturbation growth by a neighboring shock wave. The two-dimensional character of the main flow in three-layer gas systems causes the Kelvin-Helmholtz instability. It aggravates the process of gas mixing.

Investigations of TM growth at the interface «gas-liquid» under R-M instability revealed that the self-similar constant, which characterizes the rate of the gas front penetration into liquid, is $\alpha_2 = 0.072 \pm 0.005$, and it does not depend on the further increase of Re at $Re \geq 10^6$.

A hemispherical local perturbation, which was specified at the unstable interface «gas-liquid», grows in the shape of a quasi-circular bubble, which takes the lead over the front of the turbulent mixing zone. Time of when this perturbation gets the self-similar regime of growth is increased as its initial size grows.

Experimental investigations of TM growth at the interface «SF₆-water» showed that the gas front penetration into liquid was stopped when gas was compressed to density higher than the water density (at the Atwood number $A \leq 0$), but the mixing zone, which had been formed at $A > 0$, continued to expand slowly in SF₆ through inertia.

1-40

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ ПОТОКА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ДВС

Е.Д. Кальней, А.М. Козин,
В.Н. Максименко, М.М. Русаков

Тольяттинский государственный университет,
Тольятти, Россия
E-mail: crc@tltsu.ru

Эффективность работы ДВС определяется полнотой сгорания топливоздушнoй смеси (ТВС) в камере сгорания ДВС. В свою очередь полнота сгорания определяется качеством (равномерностью) подготовки ТВС и эффективностью сгорания. Эти параметры сильно зависят от турбулентности ТВС, что определяется внутренней конфигурацией впускных каналов. В последнее время этот вопрос снова обострился в связи с применением новых топливных композиций (биоэтанол, биобутанол и их смеси с бензином).

Расчеты и продувка показали влияние внутренней конфигурации впускных каналов на вихреобразование (турбулентность), коэффициент наполнения и полноту сгорания. Были выполнены расчетные и экспериментальные исследования вихреобразования в цилиндре ДВС с двумя впускными клапанами. Вычислительный эксперимент проводился как в стационарной постановке задачи, соответствующей условиям продувки на экспериментальном стенде, так и в нестационарной постановке, соответствующей процессам впуска и сжатия при работе двигателя.

В расчете использовалась k - ϵ модель турбулентности типов Standard, RNG и Realizable, гексаэдральная сетка впускных каналов головки цилиндров ДВС со сгущением в области клапанной щели и в пристеночном слое. Расчеты проводились при разном отношении давлений с учетом шероховатости. Производились перемещения участков стенки канала на различную глубину, целью которых было направить поток ТВС таким образом, чтобы увеличить вертикальный вихрь в цилиндре двигателя, при этом, не ухудшив его наполнение.

Результаты проведенных расчетов в стационарной постановке показали возможность увеличения интенсивности вихреобразования до 10% при одновременном снижении гидравлического сопротивления на 2% при изменении конфигурации впускных каналов. Расчет в нестационарной постановке задачи также показал увеличение вихреобразования в конце процесса сжатия до 20%. Именно в этот момент происходит воспламенение и сгорание топливной смеси, скорость сгорания которой определяется турбулентностью потока.

Экспериментально были исследованы базовые впускные каналы и модель модернизированных каналов. Продувки показали, что с модернизированными впускными каналами вихрь образуется при гораздо меньших скоростях потока и имеет большую частоту вращения.

FLOW TURBULENCE IN ENGINE COMBUSTION CHAMBER

E.D. Kalney, A.M. Kozin,
V.N. Maksimenko, M.M. Rusakov
Togliatti State University, Togliatti, Russia

E-mail: crc@tltsu.ru

Engine efficiency depends on combustion completeness of the air-fuel mixture in combustion chamber. In turn, completeness of combustion is determined of quality (uniformity) of air-fuel mixture preparation and of combustion efficiency. These parameters have strong dependence from air-fuel mixture turbulence which determinate by the form of the intake ports. Lately, this question has exacerbated again because of using a new fuel compositions (bioethanol, biobutanol and theirs mixtures with gasoline).

Computation and blow-through have shown influence inside configuration of intake ports in vortex formation (turbulence), volumetric efficiency and combustion completeness. Computation and experimental of studies vortex formation in engine cylinder with two intake valves was made. Computational experiment was carried out as in steady statement of problem which is matched conditions of blow-through with using an experimental rig and in unsteady variant, which is matched the processes of intake and compression in work cycle of the engine.

In calculation are used k - ϵ turbulence model of Standard, RNG и Realizable types and hexahedral mesh of engine cylinder head intake port with size reduction in valve hole domain and in wall layer. The calculations are realized at various pressure rate taking into account roughness. Relocations of port wall field on various depth are produced to direct air-fuel mixture flow thus to increase vertical vortex in engine cylinder without volumetric efficiency decrease.

Results of computation in stationary case have shown ability to increase the intensity of vortex formation of 10% while reducing hydraulically resistance of 2% by changing shape of intake ports. The unsteady calculation also showed an increase in the vortex formation at the end of the compression cycle up to 20%. It is a moment of working cycle when ignition and combustion of the fuel mixture starts and the combustion velocity of mixture is determined by the flow turbulence.

The basic and modernized models of intake ports were experimentally investigated. Blow-through showed that vortex is formed at a much lower flow velocities and has a higher speed in modernized intake ports.

1-41

ВЛИЯНИЕ ИСПАРЯЮЩИХСЯ КАПЕЛЬ НА ТУРБУЛЕНТНОСТЬ И ТЕПЛООБМЕН В ДВУХФАЗНОМ ОТРЫВНОМ ПОТОКЕ

Т.В. Богатко, М.А. Пахомов,
В.И. Терехов, А.А. Шумейко

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
Новосибирск, Россия

E-mail: terekhov@itp.nsc.ru

Течение двухфазного потока с жидкими или твердыми частицами после внезапного расширения трубы является одним из часто встречающихся случаев отрывного потока. Наличие рециркуляционного течения оказывает значительное влияние на интенсивность процессов переноса импульса, теплоты и массы и определяют структуру турбулентного двухфазного течения. Целью работы является проведение численного исследования распространения дисперсной примеси и теплообмена после внезапного расширения трубы двухфазного потока.

Для описания динамики течения и тепломассопереноса в газовой и дисперсной фазах использовался эйлеров подход. Для моделирования турбулентности газа в работе применялась модель переноса рейнольдсовых напряжений Manceau et al. (Flow, Turbulence and Combust., 2008), модифицированная на случай присутствия дисперсной фазы. Расчет компонент пульсаций скорости, температуры и турбулентного теплового потока дисперсной фазы осуществляется с использованием модели переноса рейнольдсовых напряжений.

Расчеты проведены для газок капельного потока при следующих основных параметрах: степень расширения канала $ER = 9$, число Рейнольдса $Re = 20\,000$. Начальный размер капель изменялся в диапазоне 0 до 100 мкм, а их массовая концентрация от 0 до 0,1. Мелкодисперсная примесь ($St < 1$) хорошо вовлекаются в рециркуляционное течение и присутствуют по всему сечению трубы. Крупные частицы ($St > 1$) проходят через сдвиговый слой и практически не попадают в отрывную область. Пристенная часть трубы оказывается практически свободной от частиц за счет интенсивного процесса испарения. Наблюдается значительное увеличение интенсивности теплообмена при добавлении испаряющихся капель в отрывное течение (более чем в 1,5 раза по сравнению с однофазным потоком). Для мелкодисперсного потока увеличение теплообмена происходит на всем участке за отрывом двухфазного потока, а для крупных частиц – в основном за точкой присоединения. При проведении сопоставительного анализа был использован экспериментальные данные по теплообмену в газок капельном потоке за обратным уступом Hishida et al. (Int. J. Heat Mass Transfer, 1995). Хорошее согласие с экспериментальными данными говорит об адекватности разработанной модели расчета двухфазного отрывного течения за внезапным расширением трубы.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ 11-08-00112) и гранта Президента РФ для молодых докторов наук (МД 670.2012.8).

THE EFFECT OF EVAPORATING DROPLETS ON TURBULENCE AND HEAT TRANSFER IN A TWO-PHASE SEPARATED FLOW

T.V. Bogatko, M.A. Pakhomov,
V.I. Terekhov, A.A. Shumeiko

Laboratory of Thermal and Gas Dynamics, Kutateladze Institute
of Thermophysics, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk,
Russia

E-mail: terekhov@itp.nsc.ru

In present days, the prediction and control of turbulent flows have become increasingly important, especially for two-phase turbulent flows, due to their frequent occurrence in technological applications involving industrial systems and energy conversion systems. Turbulent separated flow laden with small droplets used in a wide range of engineering such as pollutant dispersion in the atmosphere, in combustion chamber, etc. The dispersion of liquid droplets is governed usually by the carrier phase but if the mass loading of particles is sufficient the back effect of particles on the carrier phase becomes important.

The aim of the present study was numerical examination the effect of turbulence on evaporating droplets on particle dispersion, turbulence modification and heat transfer in two-phase mist separated flow.

The flow was treated as a steady-state, incompressible and axisymmetrical with ignored mass force. The two-fluid Eulerian model was used to describe the averaged characteristics of the two phases, including droplets dispersion, turbulence, its dissipation and heat transfer downstream of a pipe sudden expansion. In the paper gas-droplets turbulent flows were numerically predicted by the set of axisymmetric RANS equations. Gas phase turbulence was modelled with the use the elliptic blending second moment closure (SMC) by Manceau et al. (Flow, Turbulence and Combust., 2008). Particle-turbulence interaction (turbulence modulation) is described by a two-way coupling model. The partial Reynolds stresses and temperature fluctuations, and the turbulent heat flux equations by [2] in dispersed phase were utilized.

The transport and the SMC equations are discretized using a finite volume formulation were solved using a control volumes method. The equations are solved on a staggered grid system. Third-order QUICK scheme is used to approximate the convective terms, while second-order accurate central difference scheme is adopted for the diffusion terms. The velocity correction is realized to satisfy continuity through SIMPLEC algorithm, which couples velocity and pressure. All computations were performed on the grid with 400×100 control volumes. Droplets laden flow predictions were conducted with several types of uniform grid systems, the presented results are grid-independent.

Fine droplets (Stokes number $St < 1$, $d_1 < 50\ \mu\text{m}$) are responsive to fluid velocity fluctuations and get readily entrained with the detached flow, spread throughout the whole pipe cross-section. On the contrary, large particles ($St > 1$, $d_1 > 50\ \mu\text{m}$), due to its inertia, are unresponsive to fluid velocity fluctuations and they will pass unaffected through eddies. Large droplets do not appear in the recirculation zone and present only in the shear layer and axis regions.

Heat transfer in the gas-droplets separated flow increased (more than two-fold in comparison with the single-phase air flow). Intensification of heat transfer is observed both in the recirculation zone and flow development region in the case of fine particles. The latter conclusion lends support to the conclusion that finely dispersed particles get entrained with the detached flow [6]. Large particles ($St > 1$) added to the flow almost never enter the recirculation zone, the heat transfer intensity in this zone remains roughly unchanged, and enhanced heat transfer is only observed in the reattachment zone. An increase in the initial droplet diameter decreases the Nusselt number due to inter-phase contact area reduction at fixed mass concentration of droplets.

A comparison between simulated results and experimental results of Hishida et al. (Int. J. Heat Mass Transfer, 1995) for gas-droplets turbulent flow past the backward-facing step revealed quite good agreement.

This work was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (Project No. 11-08-00112) and Grant of Presidential Found for Young Researchers (Project No. MD 670.2012.8).

1-42

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ВЕЩЕСТВА
В ЗОНЕ ТУРБУЛЕНТНОГО
ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ГАЗОВ,
ВЫЗВАННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТЬЮ
РИХТМАЙЕРА-МЕШКОВА**

А.В. Павленко, А.А. Тяктев, О.Е. Шестаченко,
Ю.А. Пискунов, С.С. Мокрушин, Е.В. Свиридов,
А.М. Андреев, В.М. Медведев,
А.И. Байшев, И.Л. Бугаенко

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: avpavlenko@vniitf.ru

В РФЯЦ – ВНИИТФ на установке ОСА с использованием однокомпонентного лазерного доплеровского анемометра (ЛДА) проведены эксперименты по определению распределения скорости вещества в зоне турбулентного перемешивания разноплотных газов. Исследуемая пара газов в проведенных экспериментах: углекислый газ–воздух (число Атвуда $A = 0,2$). Первоначально разноплотные газы разделялись тонкой жидкой разделительной мембраной. Причем тяжелый газ находился над легким в поле тяжести Земли. В некоторый момент времени жидкая пленка разрушалась, и в поле тяжести Земли происходило формирование зоны турбулентного перемешивания, вызванной действием неустойчивости Рэлея-Тэйлора. После этого зона турбулентного перемешивания взаимодействовала со стационарной ударной волной, которая вызывала действие неустойчивости Рихтмайера-Мешкова. Затем после отражения падающей ударной волны от жесткой стенки происходило взаимодействие отраженной ударной волны с зоной перемешивания. Измерения характеристик зоны турбулентного перемешивания после взаи-

модействия с отраженной ударной волной проводились при совместном использовании теневого метода регистрации и ЛДА. Получены зависимости ширины зоны перемешивания и определены распределения модуля скорости вещества в зоне перемешивания после взаимодействия с отраженной ударной волной.

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION
OF SUBSTANCE VELOCITY DISTRIBUTION
IN THE GASES TURBULENT MIXING ZONE
INDUCED BY RICHTMYER-MESHKOV
INSTABILITY**

A.V. Pavlenko, A.A. Tyaktev, O.E. Shestachenko,
Yu.A. Piskunov, S.S. Mokrushin, E.V. Sviridov,
A.M. Andreev, V.M. Medvedev,
A.I. Baishev, I.L. Bugaenko

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

E-mail: avpavlenko@vniitf.ru

At RFNC – VNIITF, the OSA-facility and the single-component laser Doppler anemometer were used to perform experiments aimed at determining the substance velocity distribution in the turbulent mixing zone containing a pair of gases having different density, i. e. carbon dioxide-air (Atwood number $A = 0.2$). Initially, a thin liquid membrane separated the different-density gases where the heavy gas was above the light one in the gravity field. At some instant, the liquid film got destroyed and in the gravity field, formation of the turbulent mixing zone was observed due to Rayleigh-Taylor instability. Thereafter, the turbulent mixing zone began to interact with the stationary shock wave that caused the Richtmyer-Meshkov instability. After the incident wave was reflected from a rigid wall, this reflected wave began to interact with the mixing zone. Characteristics of the turbulent mixing zone after its interaction with the shock wave were measured jointly by the shadow registration method and the laser Doppler anemometer. Dependencies of the mixing zone width are constructed and distributions of the substance velocity modulus in the mixing zone after interaction with the shock wave are determined.

1-43

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ГЕТЕРОГЕННОСТИ
ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО
«ЛАЗЕРНОГО ЛИСТА»**

А.В. Павленко, О.Е. Шестаченко, Ю.А. Пискунов,
Е.В. Свиридов, А.М. Андреев,
В.М. Медведев, А.И. Байшев

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: avpavlenko@vniitf.ru

В работе приводятся результаты исследования гетерогенности зоны турбулентного перемешивания разнотных газов. В экспериментах использовались разнотные пары газов: аргон–гелий (число Атвуда $A \sim 0,81$) и воздух–углекислый газ (число Атвуда $A \sim 0,2$). Визуализация внутренней структуры зоны перемешивания проводилась с помощью «лазерного листа», плоскость которого ориентирована параллельно плоскости контактной границы газов. Регистрация процесса развития турбулентного перемешивания проводилась цифровым фоторегистратором. Для получения информации о плотности газовой смеси в каждой точке весь измерительный тракт был прокалброван. По результатам экспериментов определены зависимости безразмерной плотности газовой смеси от времени для различных сечений зоны перемешивания, а также зависимости коэффициента гетерогенности от времени.

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION
OF TURBULENT MIXING HETEROGENEITY
USING HORIZONTAL «LASER SHEET»**

A.V. Pavlenko, O.E. Shestachenko, Yu.A. Piskunov,
E.V. Sviridov, A.M. Andreev,
V.M. Medvedev, A.I. Baishev

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

E-mail: avpavlenko@vniitf.ru

Heterogeneity of the turbulent mixing zone containing gases having different density is studied and results of this investigation are presented. Pairs of different-density gases, i.e. argon–helium (Atwood number $A \sim 0.81$) and air – carbon dioxide (Atwood number $A \sim 0.2$), were used in our experiments. The internal structure of the mixing zone was visualized with the help of the «laser sheet» with its plane being parallel to the plane of the gases contact boundary. The process of turbulent mixing development was registered by the digital photorecorder. The entire measurement path was calibrated in order to gather data on the gas mixture density in each point. Experimental results helped to determine how the heterogeneity factor depends on time, as well as how dimensionless density of the gas mixture depends on time in different sections of the mixing zone.

1-44

**ПРИМЕНЕНИЕ
МИКРОМАСШТАБНОГО МЕТОДА
ПРЯМОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ЗАРОЖДЕНИЯ И РАЗВИТИЯ
ТУРБУЛЕНТНОГО ДВИЖЕНИЯ**

М.Я. Иванов

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

E-mail: ivanov@ciam.ru

Представлены результаты решения двумерных и трехмерных задач моделирования процесса зарождения и развития турбулентного движения в кромочных следах. В основе использованного метода лежат идеи работ [1, 2] и процедура осреднения параметров течения на характерных масштабах порядка длины свободного пробега молекул [3, 4]. Рассмотренный механизм зарождения и развития турбулентности описывается расширенной системой нестационарных уравнений Эйлера и Навье-Стокса с дополнительными дисперсионными слагаемыми третьего порядка, получаемыми в результате применения процедуры осреднения. Интегрирование исходных гидродинамических уравнений выполняется по известной разностной схеме С.К. Годунова второго порядка. Рассчитанные осредненные характеристики турбулентных течений удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Работоспособность метода демонстрируется решением конкретных задач развития турбулентного движения за кромками лопаток турбомашин и за соплами с различной геометрией выходного сечения.

Литература

1. Barenblatt G.I., Ivanov M.Ja., Schapiro G.I. On the structure of wave fronts in nonlinear dissipative media // Archive for Rational Mech. and Analysis. 1985, v. 87, № 4, p. 293–303.
2. Иванов М.Я. К анализу механизма осцилляций численных решений уравнений гидродинамики // Журн. вычисл. матем. и матем. физ., 1982, т. 22, № 2, с. 411–417.
3. Ivanov M.Ja. Microscale closing method in turbulent flow simulation // Advanced in Turbulence IX, 2002, p. 856.
4. Иванов М.Я. Моделирование зарождения турбулентного движения в кромочных следах // Математическое моделирование, 2009, т. 21, № 2, с. 37–46.

1-45

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ
КЕЛЬВИНА-ГЕЛЬМГОЛЬЦА НА МОДЕЛИ
РЕШЕТКИ БОЛЬЦМАНА: РОЛЬ ГРАДИЕНТОВ
СКОРОСТИ И ПЛОТНОСТИ**

Айгуо Сю, Гуаньсяй Жан, Сижун Ю, Жианши Жу

Главная национальная лаборатория вычислительной физики,
Институт прикладной физики и вычислительной математики,
Пекин, Китай

E-mail: Xu_Aiguo@iapcm.ac.cn

Предлагается модель двумерного метода решеточных уравнений Больцмана с 19 дискретными скоростями для

сжимаемых жидкостей (D2V19-LBM). Взвешенная существенно неколебательная (5th-WENO) конечноразностная схема пятого порядка используется для расчета члена конвекции решеточных уравнений Больцмана. Пригодность модели проверяют путем сравнения результатов моделирования ударной трубы Сода с соответствующими аналитическими решениями. С помощью предложенной модели исследуют влияние градиентов скорости и плотности на неустойчивость Кельвина-Гельмгольца (КНИ). В процессе моделирования мы получаем острые контуры плотности. Установлено, что линейная скорость роста γ для КНИ уменьшается по мере увеличения ширины переходного слоя скорости D_v , но увеличивается по мере увеличения ширины переходного слоя плотности D_ρ . По окончании начального переходного периода и до момента сформированности вихря, линейные скорости роста, γ_v и γ_ρ , изменяются при изменении D_v и D_ρ приблизительно таким образом: $\ln \gamma_v = a - bD_v$ и $\gamma_\rho = c + e \ln D_\rho (D_\rho < D_\rho^E)$, где a , b , c и e – подгоняемые параметры, а D_ρ^E – действующая ширина взаимодействия переходного слоя плотности. Когда $D_\rho > D_\rho^E$, линейная скорость роста γ_ρ более сильно не изменяется. Можно использовать смешанные влияния переходных слоев скорости и плотности для стабилизации КНИ. Наши результаты численного моделирования в целом соответствуют аналитическим результатам [L.F. Wang и др., Физика плазмы 17, 042103 (2010)].

От авторов: Мы выражаем искреннюю благодарность профессорам Хуа Ли и Янжун Ин за ценные рекомендации.

LATTICE BOLTZMANN STUDY ON KELVIN-HELMHOLTZ INSTABILITY: THE ROLES OF VELOCITY AND DENSITY GRADIENTS

Aiguo Xu, Guangcai Zhang, Xijun Yu, Jianshi Zhu

National Key Laboratory of Computational Physics,
Institute of Applied Physics and Computational Mathematics,
Beijing, China

E-mail: Xu_Aiguo@iapcm.ac.cn

A two-dimensional lattice Boltzmann model with 19 discrete velocities for compressible fluids is proposed (D2V19-LBM). The fifth-order Weighted Essentially Non-Oscillatory (5th-WENO) finite difference scheme is employed to calculate the convection term of the lattice Boltzmann equation. The validity of the model is verified by comparing simulation results of the Sod shock tube with its corresponding analytical solutions. The velocity and density gradient effects on the Kelvin-Helmholtz instability (KHI) are investigated using the proposed model. Sharp density contours are obtained in our simulations. It is found that, the linear growth rate γ for the KHI decreases with increasing the width of velocity transition layer D_v , but increases with increasing the width of density transition layer D_ρ . After the initial transient period and before the vortex has been well formed, the linear growth rates, γ_v and γ_ρ , vary with D_v and D_ρ approximately in the following way, $\ln \gamma_v = a - bD_v$ and $\gamma_\rho = c + e \ln D_\rho (D_\rho < D_\rho^E)$, where a , b , c and e are fitting parameters and D_ρ^E is the effective

interaction width of density transition layer. When $D_\rho > D_\rho^E$ the linear growth rate γ_ρ does not vary significantly any more. One can use the hybrid effects of velocity and density transition layers to stabilize the KHI. Our numerical simulation results are in general agreement with the analytical results [L.F. Wang, et al., Phys. Plasma 17, 042103 (2010)].

Acknowledgements: We warmly thank Profs. Hua Li and Yangjun Ying for many valuable suggestions.

1-46

НЕЛИНЕЙНОЕ РАЗВИТИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЙ-ТЕЙЛОРА В ОБЛАСТИ С КОНЕЧНЫМ РАЗМЕРОМ

С. Абаржи

Университет Чикаго, Чикаго, США

Впервые теоретический анализ был разработан для систематического изучения поздних стадий развития неустойчивости Рэлей-Тейлора в области с конечным размером. Жидкости могут иметь близкие или сильно отличающиеся плотности, ускорение может быть стабильным или зависеть от времени и, течение может быть периодическим в плоскости, перпендикулярной к направлению ускорения. Принципы теории дискретных групп применяются для описания свойств динамики границы раздела. Были обнаружены асимптотические нелинейные решения и исследованы их структура и стабильность. Описано развитие течения и вдали, и вблизи внешних границ, а также идентифицировано влияние высоты области на диагностические параметры течения. В частности показано, что в большой области конечного размера, течение медленнее, чем в случаях с большей пространственной протяженностью.

Наши теоретические результаты разрешают давнее разногласие между методами Габредиана 1957 и Биркоффа 1957, и не используют общераспространенные верования в применимость специализированных (ad hoc) методов для решения задачи, включая подходы типа Лэйзера или модель сопротивления. В докладе будут рассмотрено влияние теоретического анализа на численное моделирование неустойчивости Рэлей-Тейлора и проектирование экспериментов.

Работа была выполнена при поддержке Национального научного Фонда Департамента Энергетики США.

NONLINEAR EVOLUTION OF RAYLEIGH-TAYLOR INSTABILITY IN A FINITE DOMAIN

S.I. Abarzhi

University of Chicago, Chicago, USA

For the first time the theoretical analysis was developed to systematically study the late-time evolution of Rayleigh-Taylor instability in a domain of a finite size. Fluids may have similar or contrasting densities, acceleration can be sustained or time-dependent, and the flow is periodic in the

plane normal to direction of acceleration. The concepts of theory of discrete groups are applied to capture properties of the interfacial dynamics. Asymptotic nonlinear solutions are found, and their structure and stability are investigated. Flow evolution is described far from and near the outside boundaries, and the influence of the height of the domain on diagnostic parameters of the flow is identified. In particular, it is shown that in a large domain of a finite size, the flow is slower when compared to spatially extended cases.

Our theoretical results resolve the long-standing discrepancy between the approaches of Garabedian 1957 and Birkhoff 1957 and forgo common beliefs on applicability of ad-hoc approaches for problem solution, including Layzer-type or drag model. The outcomes of the theoretical analysis for numerical modeling of Rayleigh-Taylor instability and for design of experiments are discussed.

The work is supported by the US National Science Foundation and by the US Department of Energy.

1-47

ДВУМЕРНЫЕ ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОНЫ НАЧАЛЬНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА УСТАНОВКЕ МУТ

И.В. Глазырин, А.В. Карпеев,
О.Г. Котова, А.Н. Слесарева

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

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

Численно проанализировано формирование зоны начальной турбулентности (ЗНТ) на многофункциональной ударной трубе РФЯЦ – ВНИИТФ. Эта зона образуется при электровзрыве массива медных проводников и разрушении нитроцеллюлозной пленки, изначально разделяющей изучаемые газы. Исследовались газовые смеси воздух/углекислый газ, аргон/элегаз и азот/азот. Рассчитаны распределения концентраций газов, температур и скоростей в перемешанном слое до прихода ударной волны и зависимость ширины турбулентной зоны от времени. Результаты расчетов сравнивались с данными эксперимента. Получено, что степень турбулизованности ЗНТ соответствует развитой турбулентности. Данные результаты могут быть использованы как начальные условия для расчетов взаимодействия ударных волн с турбулентной областью. Они также могут помочь в выборе оптимальных параметров работы установки для изучения турбулентного перемешивания.

2D NUMERICAL SIMULATION OF INITIAL TURBULENT ZONE FORMATION ON MUT FACILITY

I.V. Glazyrin, A.V. Karpeev, O.G. Kotova, A.N. Slesareva

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

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

Formation of initial turbulent zone on multifunctional shock tube at RFNC – VNIITF has been analyzed numerically. This zone is generated from electric explosion of copper wires array and destruction of nitrocellulose film initially separating researched gases. Gas mixtures air/carbon dioxide, argon/SF6 and nitrogen/nitrogen have been investigated. Distributions of gas concentrations, temperatures and velocities in mixed layer before shock wave arriving have been calculated as well as time dependence of turbulent zone width. Simulation results have been compared with the experimental data. Rate of mixed layer turbulization has been studied. The conclusion has been done that the layer parameters correspond to the region of developed turbulence. The obtained results can be used as initial conditions for calculations of shock waves interaction with the turbulent zone. They also can help to find optimal conditions for experiments on turbulent mixing investigations.

1-48

ДИНАМИКА ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ ВО ВНЕШНЕМ ВЕРТИКАЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Н.М. Зубарев, Е.А. Кочурин

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: kochurin@iep.uran.ru

Как известно, вертикальное электрическое поле стабилизирует поверхность раздела жидкостей, обуславливая развитие аperiodической электрогидродинамической (ЭГД) неустойчивости [1]. В работе [2] были найдены решения уравнений движения свободной поверхности проводящей жидкости в сильном электрическом поле. В соответствии с ними, на границе за конечное время формируются слабые корневые особенности, для которых кривизна становится бесконечной, а сама поверхность остается гладкой. В работе [3] были получены точные решения для эволюции поверхности жидкого гелия, описывающие процесс развития ЭГД неустойчивости вплоть до момента формирования заостренных лунок в поверхности. В настоящей работе мы рассматриваем более общую задачу о неустойчивости границы раздела двух диэлектрических жидкостей, развивающейся под действием вертикального электрического поля.

Нам удалось показать, что в пределе сильного внешнего поля, когда влияние гравитационных и капиллярных сил пренебрежимо мало, уравнения движения, описывающие начальные стадии развития неустойчивости, могут быть решены аналитически в двух част-

ных случаях. Для первого случая, в котором отношение плотностей жидкостей пропорционально отношению их диэлектрических проницаемостей, на границе раздела за конечное время формируются особенности корневого типа, аналогичные особенностям, возникающим на границе жидких проводников. Для второго случая, в котором отношение плотностей жидкостей обратно пропорционально отношению их проницаемостей, возникает тенденция к формированию на границе раздела более сильных особенностей – точек заострения (это аналогично поведению поверхности жидкого гелия).

Работа выполнена при поддержке РФФИ-Урал (проект 10-08-96016) в рамках Программы Президиума РАН «Фундаментальные проблемы нелинейной динамики» (проект 12-П-2-1023).

Литература

1. Melcher J.R. Field-Coupled Surface Waves. MIT Press, Cambridge, MA, 1963.
2. Зубарев Н.М. // ЖЭТФ. 1998, Т. 114, В. 6(12), стр. 2043–2054.
3. Зубарев Н.М. // ЖЭТФ. 2002. Т. 121, В. 3, стр. 624–636.

DYNAMICS OF THE INTERFACE OF DIELECTRIC FLUIDS IN AN EXTERNAL VERTICAL ELECTRIC FIELD

N.M. Zubarev, E.A. Kochurin

Institute of Electrophysics, UB RAS, Yekaterinburg, Russia

E-mail: kochurin@iep.uran.ru

It is known that the external vertical electric field destabilizes the interface of liquids causing the development of the aperiodic electrohydrodynamic (EHD) instability [1]. The solutions of the equations of motion of the free surface of conductive fluids in a strong electric field were found in Ref. [2]. According to them, weak root singularities are formed on the surface; for them the curvature becomes infinite and the surface remains smooth. Exact solutions for the evolution of the liquid helium surface describing the process of development of EHD instability up to formation of cuspidal dimples, were obtained in Ref. [3]. In the present work, we consider a more general problem concerning the instability developing on the interface between two dielectric fluids under the action of vertical electric field.

We have shown that in the limit of a strong external field, when the effect of gravity and capillarity is negligibly small, the equations of motion describing the initial stages of instability can be solved analytically in two special cases. For the first case, in which the ratio of fluid densities is proportional to the ratio of their permittivities, root-type singularities are formed on the interface in a finite time similar to ones arising on the surface of liquid conductors. For the second case, in which the ratio of fluid densities is inversely proportional to the ratio of their permittivities, there is a tendency for the formation of more strong singularities on the interface, namely cusps (it is similar to behavior of the surface of liquid helium).

This study was supported by RFBR (project no. 10-08-96016) and by the Presidium of RAS (project no. 12-P-2-1023).

References

1. Melcher J.R. Field-Coupled Surface Waves. MIT Press, Cambridge, MA, 1963.
2. Zubarev N.M. // JETP. 1998, V. 114, No. 6(12), p. 2043–2054.
3. Zubarev N.M. // JETP. 2002. V. 121, No. 3, p. 624–636.

1-49

СОЛИТОНЫ В ТРАНСЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ. ОСНОВАНИЯ К УТОЧНЕНИЮ КЛАССИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

А.Н. Богданов, В.Н. Диесперов, В.И. Жук

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

E-mail: bogdanov@imec.msu.ru

Нелинейные уединенные волны (солитоны) обнаружили свою значимость и в пограничных слоях. Понимание процессов их поведения в пограничном слое играет главную роль в связи с появлением принципиально новой концепции [1] о солитонной природе так называемого K -режима разрушения ламинарного течения. Именно, наблюдаемые на осциллограммах «всплески-шипы» (отрицательной амплитуды) не носят стохастического характера, а представляют собой определенно сформировавшиеся периодические структуры с постоянными свойствами (дистанции сохранения постоянства формы при распространении возмущений вниз по потоку составляют десятки их характерных размеров и более сотни толщин пограничного слоя).

При больших продольных градиентах параметров течения пограничные слои оказывают обратное влияние на основное течение, во взаимодействии с которым возникают – являются самоиндуцированными. Основные достижения при аналитическом исследовании таких пограничных слоев получены на «трехпалубной» модели [2]. Возмущения поля течения при распространении солитоноподобных волн в пограничном слое имеют превышающую допустимую «трехпалубной» моделью амплитуду и исследуются на «четырепалубной» модели [3].

Дальнейшее развитие асимптотической теории для трансзвуковых пограничных слоев пошло путем преодоления обнаруженных недостатков теории. Именно, описание нестационарного свободного вязко-невязкого взаимодействия на трансзвуковых скоростях трех- и четырехпалубной асимптотическими моделями дает неполную картину возмущений в поле течения, в связи с чем была предложена [4] модификация трехпалубной модели. Модифицированная модель дает дополнительное возмущение, выпадающее из рассмотрения при использовании классической модели, и позволяет определить его поведение (оно оказалось растущим). Это дает основания провести исследование солитонных процессов на модифицированной асимптотической четырехпалубной модели.

Литература

1. Качанов Ю.С., Рыжов О.С. Формирование солитонов в переходном пограничном слое, теория и эксперимент // Сиб. физ. тех. журнал. 1992. Вып. 1. С. 34–51.
2. Рыжов О.С. О нестационарном пограничном слое с самоиндуцированным давлением при околосзвуковых скоростях внешнего потока // Докл. АН СССР. 1977. Т. 236. № 5. С. 1091–1094.
3. Жук В.И. Нелинейные возмущения, индуцирующие собственный градиент давления в пограничном слое на пластине в трансзвуковом потоке//ПММ.1993.Т.57. Вып.5. С.68–78.
4. Богданов А.Н., Диеперов В.Н. Моделирование нестационарного трансзвукового течения и устойчивость трансзвукового пограничного слоя // ПММ. 2005. Т. 69. Вып. 3. С. 394–403.

THE SOLITONS IN TRANSONIC BOUNDARY LAYER. THE PREMISES TO MODIFICATION OF CLASSICAL MODEL

A.N. Bogdanov, V.N. Diesperov, V.I. Zhuk

Research Institute of Mechanics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: bogdanov@imec.msu.ru

The nonlinear waves – solitons have found out the importance and in boundary layers: the understanding of processes of their behaviour in a boundary layer starts in connection with occurrence of essentially new concept [1] about the solitons' nature of intensive «splashes-thorns» at so-called *K*-mode destruction of laminar current in a subsonic boundary layer and transition to turbulence.

Transonic boundary layers take a special place among boundary layers, showing, as well as transonic currents, the properties inherent both subsonic, and supersonic modes. At big cross-section gradients of

parameters of current boundary layers render return influence on the basic current, in interaction with which these boundary layers arise – are self-induced. Their description demands others, distinct from classical, models and consequently such layers refer to also nonclassical. The basic achievements at analytical research of the self-induced transonic boundary layers are received on the three-deck model widespread to a transonic mode of O.S. Ryzhov [2]. The perturbations of the flow field in the propagation of soliton waves in the boundary layer are more than acceptable «three-deck» model to study the amplitude and the «four-deck» model [3].

Development asymptotic theories for transonic boundary layers has gone by overcoming found out own lacks of the theory, the description of non-stationary free is viscous-nonviscous interaction on transonic speeds three- and four-deck asymptotic models gives an incomplete picture of indignations in a field of current in this connection updating of three-deck model has been offered [4]. The modified model gives the additional indignation which is dropping out of consideration at use of classical model, and allows to determine his behaviour (it has appeared growing). It gives the basis to carry out research solitons processes on modified asymptotic four-deck model.

References

1. Kachanov, Y.S. & Ryzhov, O.S. 1992. Formation of solitons in transitional boundary layer, theory and experiment. Siberian Phys.-Tech. J. V. 1, pp. 34–52 (in Russian).
2. Ryzhov O.S. 1977. Equation of unsteady boundary layer with selfinduced pressure. Dokl. Akad. Nauk SSSR. V. 234. № 4, pp. 780–783 (in Russian).
3. Zhuk V.I. 2001. Tollmien-Schlichting waves and solitons. – M.: Nauka. – 167 p. (in Russian).
4. A. N. Bogdanov, V. N. Diesperov 2005 The simulation of unsteady transonic flow and the stability of a transonic boundary layer. J. Appl Math Mech-Engl Tr. V. 69, № 3, pp. 358–365.

1-50

ОЦЕНКА ОТКЛЮЧАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ В РЕЖИМЕ КОММУТАЦИИ МАЛЫХ ТОКОВ С УЧЕТОМ ТУРБУЛЕНТНОГО ДВИЖЕНИЯ ГАСЯЩЕЙ СРЕДЫ (SF6)

Д.А. Глушков, И.В. Черных

Уральский энергетический институт
Уральского федерального университета имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

E-mail: HVT.UPI@yandex.ru; daniil.glushkov@hvtupi.ru;
cherhykh@inbox.ru

Исследование процессов, происходящих при воздействии на газовый диэлектрик электрического поля при течении газа в сложной геометрии, представляет теоретический и практический интерес вследствие широкого использования сжатого гексафторидасеры (элегаза) в качестве изолирующей среды в высоковольтных энергетических и электрофизических установках, активной среды газоразрядных лазеров и среды гашения электрической дуги в высоковольтной коммутационной технике. Данная работа относится к последнему из перечисленных приложений.

При расчете восстанавливающейся электрической прочности промежутка после погасания дугового разряда в условиях движения среды на проблемы развития пробоя газа в нормальных условиях накладываются проблемы учета движения газа, причем при скоростях, близких к звуковым, и в турбулентном режиме, высокой температуры газа, неравномерно распределенной по промежутку его плотности. Присутствие в промежутке остаточного ионизованного газа оказывает влияние, как на динамику газодинамических процессов, так и на распределение электрического поля в промежутке.

Анализ электрической прочности промежутка на основе стримерного механизма развития разряда в газе предполагает сравнение в данной точке промежутка отношения напряженности электрического поля к функции давления газа с критическим значением. Значение критической напряженности поля значительно изменяется с ростом температуры газа поэтому при анализе электрической прочности необходим совместный расчет электрического и газодинамического полей.

Модель расчета поля потока основана на уравнениях гидродинамики вязкой жидкости на основе усредненных по Рейнольдсу уравнениях переноса. Учет

турбулентного характера движения среды выполнен в рамках двухпараметрической k - ϵ модели турбулентности в реалистичной постановке. Решение поставленной задачи проводилось численно в пакете конечноэлементного анализа.

Выполненные расчеты позволяют выявить критические области промежутка, в которых возможно возникновение ионизационных процессов, что может привести к электрическому пробое.

ESTIMATION OF THE CURRENT BREAKING PERFORMANCE OF HIGH VOLTAGE CIRCUIT BREAKER IN SMALL CURRENT INTERRUPTION PROCESSES TAKING INTO ACCOUNT TURBULENT MOTION ARC QUENCHING MEDIUM (SF6)

D.A. Glushkov, I.V. Chernych

Ural Power Institute of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Russia, Ekaterinburg
E-mail: HVT.UPI@yandex.ru; daniil.glushkov@hvtupi.ru; cherhykh@inbox.ru

The study of processes occurring under influence of the gas insulation medium of the electric field in the gas flow in complex geometries provides theoretical and practical interest due to widespread use of compressed sulfur hexafluoride as an insulating medium in high voltage and electrical power plants, the active medium of gas discharge lasers and arc quenching medium in the high-voltage switching technique. The present work refers to the last of these applications.

When calculating the dielectric strength after arc extinction to the problem of breakdown of a gas under normal conditions are imposed taking into account the problem of turbulent motion of the gas at speeds close to sonic, high-temperature gas, inhomogeneous density distribution in contact gap. The presence of residual ionized gas in the contact gap has an effect both on the development of gas-dynamic processes and the electric field distribution in the gap.

Analysis of the electrical strength of the gap by the streamer mechanism of gas discharge development involves a comparison at a given point gap ratio of the electric field to the function of gas pressure to a critical value. The value of the critical field strength varies significantly with increasing temperature of the gas so that the analysis of the electric strength of the joint requires the calculation of electric and gas-dynamic fields.

Model calculation of the flow field is based on the equations of a viscous fluid on the basis of the Reynolds-averaged transport equations (RANS-approach). Accounting for the turbulent nature of the medium is made within the two-parameter realizable k - ϵ turbulence model. The solution of this problem was carried out numerically in the finite element analysis package.

The calculations reveal the critical areas of the contact gap, which may cause the ionization processes that can lead to electrical breakdown.

1-51

К ДЛИННОВОЛНОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ УСТАНОВИВШИХСЯ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТЕЧЕНИЙ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ СО СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЕЙ В ПОЛЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Ю.Г. Губарев

Учреждение РАН Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный университет», Новосибирск, Россия
E-mail: gubarev@hydro.nsc.ru

В настоящем докладе изучается проблема адекватности математического моделирования волн в жидкости на примере одной из базовых математических моделей длинноволновых движений жидкости – модели распространения длинных волн по свободной поверхности горизонтального слоя завихренной однородной по плотности невязкой несжимаемой жидкости в поле силы тяжести [1].

Конкретно, рассматривается задача линейной устойчивости стационарных плоскопараллельных течений однородной по плотности идеальной несжимаемой жидкости со свободной границей в поле силы тяжести. Методом связки интегралов движения [2, 3] доказано, что достаточных условий устойчивости этих течений по отношению к малым плоским длинноволновым возмущениям не существует.

Однако, в работах [4, 5], посредством обобщения метода характеристик на операторные задачи отыскания собственных значений, для уравнений распространения длинных волн по свободной поверхности горизонтального слоя завихренной однородной по плотности невязкой несжимаемой жидкости в поле силы тяжести получено условие гиперболичности, которое в приложении к задаче линейной устойчивости установившихся плоскопараллельных течений однородной по плотности идеальной несжимаемой жидкости со свободной границей в поле силы тяжести относительно плоских длинноволновых возмущений интерпретировано именно как достаточное условие устойчивости.

Понятно, что результат об отсутствии достаточных условий линейной устойчивости, полученный при помощи метода связки интегралов движения, находится в явном противоречии с данным результатом публикаций [4, 5], поскольку факт наличия или отсутствия устойчивости не должен зависеть от выбора того либо другого способа его установления.

Для разрешения возникшего противоречия построен иллюстративный аналитический пример стационарного плоскопараллельного течения и наложенных на него малых плоских длинноволновых возмущений в виде нормальных мод. Настоящий пример подтвердил результат, который получен методом связки интегралов движения, и, тем самым, опроверг результат, установленный путем обобщения метода характеристик на операторные задачи обнаружения собственных значений.

Следовательно, обобщение [4, 5] метода характеристик на операторные задачи отыскания собственных значений для адекватного математического моделирования волн в жидкости не пригодно.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 2.1.1/9896).

Литература

1. Benney D.J. Some properties of long nonlinear waves // *Stud. Appl. Math.* 1973. Vol. 52. No. 1. P. 45–50.
2. Fjørtoft R. Application of integral theorems in deriving criteria of stability for laminar flows and for the baroclinic circular vortex // *Geofys. Publ. Norske Vid.-Akad. Oslo.* 1950. Vol. 17. No. 6. P. 4–52.
3. Арнольд В.И. Об условиях нелинейной устойчивости плоских стационарных криволинейных течений идеальной жидкости // *ДАН СССР.* 1965. Т. 162. № 5. С. 975–978.
4. Тешуков В.М. О гиперболичности уравнений длинных волн // *ДАН СССР.* 1985. Т. 284. № 3. С. 555–562.
5. Ляпидевский В.Ю., Тешуков В.М. Математические модели распространения длинных волн в неоднородной жидкости. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 420 с.

ON THE LONG-WAVE INSTABILITY OF STEADY-STATE PLANE-PARALLEL FLOWS OF AN IDEAL FLUID WITH A FREE BOUNDARY IN THE FIELD OF GRAVITY

Yu.G. Gubarev

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Division of RAS, Novosibirsk, Russia
Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia
E-mail: gubarev@hydro.nsc.ru

In this report, the problem of adequacy of mathematical modeling of waves in a fluid is studied by the example of one of basic mathematical models of long-wave fluid motions – the model of propagation of long waves on a free surface of horizontal layer of a whirling homogeneous in density inviscid incompressible fluid in the field of gravity [1].

Specifically, we consider the linear stability problem of stationary plane-parallel flows of a homogeneous in density ideal incompressible fluid with a free boundary in the field of gravity. It was proved by the method of binding of motion constants [2, 3] that the sufficient conditions for stability of these flows with respect to small plane long-wave perturbations do not exist.

However, in [4, 5], by generalizing of the characteristics method to the operator eigenvalue problems, for equations of propagation of long waves on a free surface of horizontal layer of a whirling homogeneous in density inviscid incompressible fluid in the field of gravity it was obtained the condition of hyperbolicity which is interpreted just as the sufficient condition for stability conformably to the linear stability problem of steady-state plane-parallel flows of a homogeneous in density ideal incompressible fluid with a free boundary in the field of gravity relative to plane long-wave perturbations.

It is clear that the result concerning lack of sufficient conditions for linear stability, obtained here by the method of binding of motion constants, is in obvious contrast with the result [4, 5], since the fact of presence or absence of

stability should not depend on the choice of this or any other way of its establishment.

To resolve the originated contradiction, it was built an illustrative analytical example of the stationary plane-parallel flow and small plane long-wave perturbations in the form of normal modes imposed upon it. This example confirmed the result which was obtained by the method of binding of motion constants, and thus denied the result established by generalizing of the characteristics method to the operator eigenvalue problems.

Consequently, the extension [4, 5] of the characteristics method to the operator eigenvalue problems for the adequate mathematical modeling of waves in a fluid is not suitable.

This work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (the project No. 2.1.1/9896).

References

1. Benney D.J. Some properties of long nonlinear waves // *Stud. Appl. Math.* 1973. Vol. 52. No. 1. P. 45–50.
2. Fjørtoft R. Application of integral theorems in deriving criteria of stability for laminar flows and for the baroclinic circular vortex // *Geofys. Publ. Norske Vid.-Akad. Oslo.* 1950. Vol. 17. No. 6. P. 4–52.
3. Arnold V.I. Conditions for nonlinear stability of stationary plane curvilinear flows of an ideal fluid (Ordinary differential equations theory yielding hydrodynamics conditions of stability with respect to finite perturbations for plane stationary curvilinear flow of ideal fluid) // *Soviet Mathematics.* 1965. Vol. 6. P. 773–777.
4. Teshukov V.M. On the hyperbolicity of long wave equations // *Dokl. Akad. Nauk SSSR.* 1985. Vol. 284. No. 3. P. 555–562 (in Russian).
5. Lyapidevskii V.Yu., Teshukov V.M. Mathematical models of propagation of long waves in an inhomogeneous fluid. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Division of RAS, 2000. 420 pp. (in Russian).

1-52

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАВИТАЦИОННОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В ПРИСУТСТВИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

М.Ю. Егужова, С.И. Глазырин, В.А. Жмайло,
В.П. Стаценко, Ю.В. Янилкин

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия
E-mail: s.i.glazyrin@itmf.vniief.ru

В работе проведено исследование гравитационного перемешивания на границе двух идеально проводящих разноплотных веществ в присутствии магнитного поля. Представлено прямое численное моделирование задачи с помощью гидрокода ТРЭК. Выявлено влияние магнитного поля различной величины на развитие турбулентности в области перемешивания и на рост ширины зоны перемешивания. Получены значения коэффициента турбулентной диффузии магнитного поля.

**STUDY OF GRAVITATIONAL MIXING
WITH MAGNETIC FIELD**

M.Yu. Eguzhova, S.I. Glazyrin, V.A. Zhmailo,
V.P. Statsenko, Yu.V. Yanilkin

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

E-mail: s.i.glazyrin@itmf.vniief.ru

Here we study the gravitational mixing at the boundary of two ideally conducting fluids with different densities. We present direct numerical simulations with the TREK hydrocode. The impact of magnetic field of various intensities on the turbulence growth is revealed. The value of magnetic field turbulent diffusion coefficient is calculated.

«Мы занимаемся разработкой ядерного оружия, в том числе и различными его приложениями; в сферу наших интересов входит и применение ядерных взрывов в народном хозяйстве для мирных целей»

Е.И. Забабахин

Секция 2

**ВЗРЫВНЫЕ И ДЕТОНАЦИОННЫЕ
ЯВЛЕНИЯ**

Section 2

**EXPLOSION AND DETONATION
PHENOMENA**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
МНОГОФАЗНЫХ РЕАГИРУЮЩИХ ТЕЧЕНИЙ
И ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕТОНАЦИИ В ИХФ РАН**

С.М. Фролов

Учреждение РАН Институт химической физики
им. Н.Н. Семенова, Москва, Россия

E-mail: smfrol@chph.ras.ru

Совершенствование рабочего процесса и конструкции современных двигателей и энергетических установок на жидком топливе, включая поршневые, прямые, ракетные и газотурбинные двигатели, а также перспективные детонационные двигатели с импульсной и непрерывной детонацией, требует глубокого понимания внутрикамерных физико-химических процессов: смесеобразования при впрыске жидких струй горючего в камеру сгорания, самовоспламенения или зажигания паров горючего, горения капель и образования вредных веществ (NO, CO, сажа). Для этой цели в ИХФ РАН разработана иерархия математических моделей и вычислительных программ, которые позволяют проводить расчеты самовоспламенения и горения отдельных капель, однородных монодисперсных капельных газовзвесей, турбулентных двухфазных струйных течений и волн гетерогенной капельной детонации как в одномерной, так и в многомерной постановке задачи. Важнейшие особенности моделей и программ – возможность использования как глобальных, так и детальных кинетических механизмов окисления и пиролиза горючего с образованием вредных веществ, учет влияния коллективных эффектов при самовоспламенении и горении плотных капельных газовзвесей, прямой учет молекулярного смешения и других процессов переноса в турбулентном поле течения и обеспечение «сеточной» независимости результатов.

В данном сообщении будут представлены примеры расчетов рабочего процесса в дизеле, в двигателе с гомотенным зарядом, в двигателе со смешанным газодизельным циклом и т. д., а также примеры расчетов волн гетерогенной капельной детонации в воздушных смесях тяжелых углеводородных горючих. При обсуждении результатов расчетов особое внимание будет уделено физико-химическим эффектам, вызванным учетом детальной кинетики химических превращений, коллективных эффектов в плотных газовзвесах капель и фрагментов их дробления, а также конечных скоростей молекулярных и турбулентных процессов переноса.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, программ фундаментальных исследований Президиума РАН и Программы «Комиссии по модернизации и технологическому развитию экономики России» при Президенте РФ.

**MATHEMATICAL MODELLING OF MULTIPHASE
REACTING FLOWS AND HETEROGENEOUS
DETONATIONS IN SEMENOV INSTITUTE
OF CHEMICAL PHYSICS**

S.M. Frolov

Semenov Institute of Chemical Physics, Moscow, Russia

E-mail: smfrol@chph.ras.ru

Improvements in the design and operation process of modern liquid-fueled transportation engines and power plants, including piston engines, ramjets, rocket and gas turbine engines as well as advanced engines with pulsed or continuously rotating detonations, imply deep understanding of all relevant physical and chemical process in combustion chambers, namely, mixture formation at liquid fuel injection, forced ignition or self-ignition of fuel vapors, transient combustion of liquid fuel drops and pollutant (NO, CO, soot, etc.) formation. For this purpose, the hierarchy of physical and mathematical models and computer codes capable of simulating ignition and combustion of single fuel drops, monodispersed and polydispersed drop suspensions, turbulent two-phase sprays and heterogeneous detonation waves in one-dimensional and full three-dimensional formulations has been developed in the Semenov Institute of Chemical Physics. The most important features of the models and computer codes are the possibility of applying both overall and detailed reaction mechanisms of fuel pyrolysis and oxidation with due regard for pollutant formation, the account for spray (screening) effects of neighboring drops in dense drop suspensions on the rates of chemical and physical processes, the account for molecular mixing and other molecular transport processes in the turbulent flow field, and grid independence of computational results.

In the presentation, a number of computational examples will be discussed, including the operation processes in diesel engines, in engines with combined cycle, in homogeneous-charge compression-ignition engines, etc., as well as computational examples for heterogeneous detonations in drop suspensions of heavy hydrocarbon fuels in air. The discussion of the results will be mostly focused on various physical and chemical phenomena arising due to the application of detailed reaction mechanisms of fuel oxidation, due to taking spray effects in dense drop clouds into account, and due to considering finite rates of molecular and turbulent transport processes.

The work was performed with the support from the Russian Foundation for Basic Research, Programs of Basic Research of the Presidium of the Russian Academy of Sciences, and the Program of «Commission on Modernization and Technological Development of Russia's Economy».

2-2

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕАДИАБАТИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

А.Э. Муханов^{1,2}, В.В. Стегайлов^{1,2}¹ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт автоматизации им. Н.Л. Духова, Москва, Россия²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

E-mail: vniia@vniia.ru

Целью данного исследования является возможность применения первопринципной молекулярной динамики для моделирования неадиабатических переходов между возбужденными и основным состояниями молекул, участвующих в фотохимических реакциях. Недавний интерес к таким исследованиям был вызван идеей участия низколежащих возбужденных состояний в распаде молекул энергетических материалов [1, 2]. Методы, применяемые для поиска возможных каналов реакции, основываются на анализе пути минимальной энергии вдоль реакции с помощью Complete Active Space Self-Consistent Field и Time-Dependent Density Functional Theory. С другой стороны, для динамической проверки этих каналов распада необходимо использовать квантовую молекулярную динамику, базирующуюся на теории функционала плотности, реализованную в пакете CPMD. Эта идея была применена к исследованию распада изолированных молекул тетранитрат пентаэритрита (ТЭНа) и диамино-азокси-фуразана (ДААФа) с помощью схемы Кона-Шэма с одной неполностью заполненной оболочкой, допускающей неадиабатический переход между первым возбужденным и основным состояниями [3, 4].

Литература

1. Kuklja M. M., Aduiev B. P., Aluker E. D., Krasheninina V. I., Krechetov A. G., and Mitrofanov A. Yu. Role of electronic excitations in explosive decomposition of solids // *Journal of Applied Physics*, 2001, v. 89, p. 4156–4166.
2. Guo Y. Q., Bhattacharya A., and Bernstein E. R. Excited electronic state decomposition of furazan based energetic materials: 3,3'-diamino-4,4'-azoxyfurazan and its model systems, diamino-furazan and furazan // *Journal of Chemical Physics*, 2008, v. 128, p. 034303–(1–11).
3. Frank I., Hutter J., Marx D., and Parrinello M. Molecular dynamics in low-spin excited states // *Journal of Chemical Physics*, 1998, v. 108, p. 4060–4069.
4. Doltsinis N.L. and Marx D. Nonadiabatic Car-Parrinello Molecular Dynamics // *Physical Review Letters*, 2002, v. 88, p. 166402–(1–4).

MODELING OF NON-ADIABATIC TRANSITIONS IN ENERGETIC MATERIALS

A.E. Mukhanov^{1,2}, V.V. Stegailov^{1,2}¹FSUE All-Russia Research Institute of Automatics, Russia, Moscow²Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow

E-mail: vniia@vniia.ru, zeigarnik@ihed.ras.ru

The target of this research is an opportunity for application of ab initio molecular dynamics for modeling of non-

adiabatic transitions between excited and ground states of molecules participating in the photochemical reactions. Recently the interest for such studies has been invoked by the idea of including low-lying excited states in the decay of energetic material molecules [1, 2]. The deployed methods for the search of possible reaction channels are based on the analysis of minimum energy path along the reaction using CASSCF and TDDFT. On the other hand, for dynamical verification of these decay channels it is needed to use DFT based quantum molecular dynamics as implemented in the CPMD package. The idea is applied to investigation of decay of the isolated PETN and DAAF molecules by means Restricted Open-shell Kohn-Sham scheme allowing non-adiabatic transition between the first excited and ground states [3],[4].

References

1. M.M. Kuklja, B. P. Aduiev, E. D. Aluker, V. I. Krasheninina, A. G. Krechetov, and A. Yu. Mitrofanov Role of electronic excitations in explosive decomposition of solids // *J. Appl. Phys.*, 2001. V. 89. P. 4156–4166.
2. Y. Q. Guo, A. Bhattacharya, and E. R. Bernstein Excited electronic state decomposition of furazan based energetic materials: 3,3'-diamino-4,4'-azoxyfurazan and its model systems, diamino-furazan and furazan // *J. Chem. Phys.*, 2008. V. 128. P. 034303.
3. I. Frank, J. Hutter, D. Marx, and M. Parrinello Molecular dynamics in low-spin excited states // *J. Chem. Phys.*, 1998. V. 108. P. 4060–4069.
4. N.L. Doltsinis and D. Marx Nonadiabatic Car-Parrinello Molecular Dynamics // *Phys. Rev. Lett.*, 2002. V. 88. P. 166402–166405.

2-3

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЕ И МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАВЛЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ МЕТАЛЛОВ

А.В. Федоров, А.В. Шульгин

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

E-mail: fedorov@itam.nsc.ru

Проблема фазового состояния мелких и сверхмелких (нанодисперсных) частиц важна при исследовании процессов их воспламенения и горения. Для этой цели в рамках феноменологического подхода предложена физико-математическая модель для описания плавления наноразмерных частиц алюминия и золота в формулировке однофазной задачи Стефана. При этом принимается во внимание экспериментально установленный факт уменьшения температуры плавления при уменьшении радиуса частиц $T_m = T_m(r)$. Для описания этих зависимостей предложены аналитические формулы. Установлено, что имеющиеся в литературе данные о зависимости температуры плавления от радиуса наночастиц с удовлетворительной точностью могут быть описаны с помощью гиперболического закона. Численно исследована динамика температуры в системе расплавленная фаза + твердое ядро. Показано удовлетворительное соответствие динамики температурных полей при плавлении наночастиц золота в однофазном

и двухфазном подходах. Определены зависимости времени плавления наночастиц алюминия и золота при изменении радиуса частиц и температуры окружающей среды. Установлено, что при эквивалентных отношениях температуры окружающей среды к температуре плавления отношение времени плавления алюминиевых частиц к времени плавления частиц из золота остается примерно постоянным и равным 4. Для выявления особенностей данного процесса была использована также и молекулярно-динамическая модель. Силовое поле описывалось с помощью склеивающего потенциала межатомного взаимодействия. Уравнения движения интегрировались известным скоростным вариантом алгоритма Верле. Фазовый переход от твердой фазы к расплавленной определялся на основе структурного параметра трансляционного порядка. Определяются теплофизические параметры фаз, которые близки к найденным другими авторами на основе данного метода. Установлено также удовлетворительное совпадение времен плавления алюминиевых наночастиц, полученное феноменологическим и молекулярно-динамическим моделированием.

PHENOMENOLOGICAL AND MOLECULAR DYNAMIC SIMULATION OF METAL NANOPARTICLES MELTING

A.V. Fedorov, A.V. Shulgin

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

E-mail: fedorov@itam.nsc.ru

The problem of the phase state of fine and ultrafine (nanosized) particles is important when studying the processes of ignition and combustion. For this purpose, within the framework of a phenomenological approach physical and mathematical model proposed to describe the melting of aluminum and gold nanoparticles in the single-phase Stefan problem formulation. This takes into account the experimentally established fact the melting point reduction with decreasing particle radius $T_m = T_m(r)$. To describe these dependencies analytical formulas proposed. It is established that the published data on the melting point dependence of the radius of the nanoparticles can be described by a hyperbolic law with satisfactory accuracy. The temperature dynamics of the system molten phase + a solid core investigated numerically. It is shown the satisfactory agreement between the dynamics of temperature fields in the gold nanoparticles melting at single- and two-phase approaches. The dependences of the melting time of aluminum and gold nanoparticles on the particle radius and the ambient temperature are determined. At the equivalent ratios of ambient temperature to the melting point the ratio of the aluminum particles melting time to the gold particles melting time is found to remain approximately constant and equal to 4. Also molecular dynamic model has been used in order to identify features of this process. The glue interatomic interaction potential is used to describe the force field. The equations of motion were integrated by the well-known velocity Verlet algorithm. The phase transition from solid phase to melt phase was determined on the basis of the structural translational order parameter. The phases thermophysical

parameters of, which are close to those that were found by other authors on the basis of this method, are determined. Also good agreement between the melting time of the of aluminum nanoparticles obtained by the phenomenological and molecular-dynamic simulations, is established.

2-4

УЧЕТ КЛАСТЕРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Л.Х. Бадретдинова, И.Д. Ахмадиев,
А.Н. Анисимов, В.Я. Базотов

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

В работе показана необходимость учета взаимодействия молекул энергетического материала (ЭМ) друг с другом в молекулярном кластере и учета эффектов, возникающих на границе раздела кластер-пространство, при использовании квантово-химических моделей, применяемых для расчета чувствительности энергетических материалов.

Во многих известных моделях расчета чувствительности, где используются квантово-химические методы, проводят расчет одной молекулы энергетического материала и на основании этого расчета получают значения молекулярных дескрипторов, которые не учитывают вклад соседних молекул ЭМ. А так же при расчетах в этих моделях используются молекулы геометрия которых получена так же расчетным способом.

В нашей работе геометрия молекул была получена на основании данных рентгеноструктурного анализа, и для просчета использовалась не одна молекула, а кластер, состоящий из нескольких молекул (от 4 до 24 молекул).

Полученные в результате расчетов данные могут быть использованы при прогнозировании чувствительности полиморфных модификаций различных ЭМ, а так же позволяют повысить точность таких расчетов, учитывая вклад кластерного взаимодействия в значениях молекулярных дескрипторов.

THE ACCOUNT CLUSTER INTERACTIONS IN QUANTUM-CHEMICAL MODELS FORECASTING OF SENSITIVITY OF ENERGETIC MATERIALS

L.Ch. Badretdinova, I.D. Achmadiev,
A.N. Anisimov, V.J. Bazotov

Kazan National Research Technological University,
Kazan, Russia

In work necessity of the account of interaction of molecules of a energetic material (EM) with each other in molecular cluster is shown and the account of the effects arising on border has undressed klaster-space, at use of the quantum-chemical models applied to calculation of sensitivity of energetic materials.

In many known models of calculation of sensitivity where kvantovo-chemical methods are used, calculation of a unique molecule of the power was carried out swore and on the basis of this calculation receive values of molecular descriptors which don't consider the contribution of next molecules EM as at calculations in these models molecules which geometry are used is received as in the settlement way.

In our work the geometry of molecules has been received on the basis of the data X-ray analysis, and for the miscalculation one molecule, and cluster, consisting of several molecules (from 4 to 24 molecules) is used not.

The data obtained as a result of calculations can be used at forecasting of sensitivity of polymorphic updatings various EM and as allow to raise accuracy of such calculations, considering the contribution clusters interactions in values of molecular descriptors.

2-5

**КОЭФФИЦИЕНТЫ
УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ
ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ В ФОРМЕ JWL
ДЛЯ РЯДА ВЗРЫВЧАТЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Е.И. Ермолович, В.П. Ильин, В.Г. Кожевников,
А.Н. Михайлюкова, А.Б. Севастьянов

ОАО «ГосНИИ «Кристалл», Дзержинск, Россия

Для проведения численных расчетов с использованием взрывчатых материалов (ВМ) необходимо иметь уравнения состояния продуктов детонации (ПД) в той или иной форме. Одной из наиболее используемых форм уравнения состояния ПД ВМ является JWL представление. Однако не всегда удается найти или рассчитать коэффициенты в уравнение состояния ПД ВС с точностью, достаточной для решения прикладных задач с выбранным ВМ. В настоящей работе, с целью расширения круга ВМ, имеющих уравнение состояния ПД, приведены результаты расчета коэффициентов для уже известных ВМ, так и для ранее не приводимых в литературе. Проверка работоспособности полученных уравнений состояния проверялась моделированием экспериментов по метанию медных трубок (методика Т-20, цилиндр-тест). Результаты расчета сравнивались с результатами, получаемыми с уже имеющимися уравнениями состояния ПД ВС в форме JWL.

**COEFFICIENTS
OF DETONATION PRODUCTS EQUATION
OF STATE IN JWL FORM FOR A SERIES
OF EXPLOSIVE MATERIALS**

E.I. Ermolovich, V.P. Ilyin, V.G. Kozhevnikov,
A.I. Mikhailukova, A.B. Sevast'yanov

JSC «GosNII «Kristall», Dzerzhinsk, Russia

For numerical calculations with the use of explosive materials it is necessary to have detonation products equations of states (EOS) in any form. One of the most often used forms of EOS of explosive materials is JWL

form. However, it is not always possible to find or calculate coefficients in detonation products EOS with the accuracy that is enough to decide applied problems with a selected explosive material. The paper presents the results of coefficients calculation both for known explosives and for explosives that were not reported in literature, with the aim to expand the area of explosives, which possessed detonation products EOS. The performance of developed EOS was verified by modeling copper cylinder tests. The calculated data were compared with the results obtained with available EOS of JWL form.

2-6

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЯЧЕИСТОЙ ДЕТОНАЦИИ В ПРОСТРАНСТВЕ**

В.А. Левин, И.С. Мануйлович, В.В. Марков

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

E-mail: manuylovich@imec.msu.ru

**Ячеистая структура
расходящейся цилиндрической волны детонации**

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования спонтанного формирования двумерной и трехмерной ячеистой структуры детонации в стехиометрической пропановоздушной смеси при прямом инициировании. Исследование проводится в рамках одностадийной кинетики горения численным методом, основанным на схеме С.К. Годунова. Рассмотрены двумерные течения в каналах различной конфигурации: постоянного сечения, в том числе с криволинейными стенками, переменного сечения с расширениями, сужениями и изломами боковых стенок, а также при распространении расходящейся цилиндрической волны детонации. В последнем случае показано хорошее соответствие расчетов с экспериментами Р.И. Солоухина.

**Трехмерная ячеистая структура
волн детонации в цилиндрических каналах**

Представлены и обсуждаются результаты инициирования трехмерной детонации: в канале постоянного квадратного, прямоугольного и круглого сечений. Во всех случаях канал с одного конца закрыт плоской твердой стенкой, а пространство внутри канала однородно заполнено стехиометрической пропановоздушной смесью при комнатных условиях. В начальный момент времени к зоне ширины 3 см вблизи закрытого конца мгновенно подводится энергия, достаточная для инициирования детонации. Из постановки задачи следует, что в начальной фазе течения его параметры не зависят от поперечных координат. Но в силу неустойчивости детонация приобретает трехмерный ячеистый характер. В данной работе получены детальные картины развития процессов, которые иллюстрируются численными Шлирен-диаграммами и анимациями газодинамических параметров. Расчеты трехмерной ячеистой детонации в трубах различного сечения проводились на суперкомпьютере «Ломоносов» с несколькими миллиардами расчетных ячеек.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 11-01-00068, 11-01-12043-Офи), Совета по грантам Президента РФ (НШ 8424.2010.1), Программ фундаментальных исследований Президиума РАН.

NUMERICAL SIMULATION OF CELLULAR DETONATION IN SPACE

V.A. Levin, I.S. Manuylovich, V.V. Markov
NII Mechanics Moscow State University, Moscow, Russia
E-mail: manuylovich@imec.msu.ru

The cellular structure of detonation wave diverging cylindrical

This paper presents the results of numerical simulation of spontaneous formation of two-dimensional and three-dimensional cellular structure of detonation in a stoichiometric propane-air mixture under the direct initiation. The study is fulfilled using single-stage combustion kinetics by of the numerical methods based on the Godunov's scheme. Two-dimensional flows in channels with different configuration of: a constant cross section, including the curved walls of variable cross section with the following extensions, restrictions and breaks the side walls, as well as the propagation of diverging cylindrical detonation wave were studied. In the latter case, the calculations show good agreement with experiments by R.I. Soloukhin.

Three-dimensional cellular structure of detonation waves in cylindrical channels

The results of the initiation of a three-dimensional detonation in the channel of square, rectangular and circular constant cross sections are presented and discussed. In all cases, the channel is closed with one end by a flat solid wall and the space inside the channel is filled with homogeneous stoichiometric propane-air mixtures at room conditions. At the initial time in a zone of 3 cm width located near the closed end of the channel the energy, sufficient to initiate the detonation, is instantly supplied. As it follows from the formulation of the problem, in the initial phase of the flow its parameters do not depend on the transverse coordinates. But because of the instability of detonation acquires a three-dimensional cellular structure. This paper presents a detailed picture of the development processes, which are illustrated by numerical Schlieren diagrams and animations of gas-dynamic parameters. Calculations of three-dimensional cellular detonation in tubes of different cross sections were performed on supercomputer «Lomonosov» using several billions of calculation cells.

This work was supported by RFBR (grants № № 11-01-00068, 11-01-12043-ofi), by the Council on Grants of the President of the Russian Federation (NSh 8424.2010.1) and by the Programs of the Presidium of RAS.

2-7

ОСНОВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ПУЗЫРЬКОВОЙ ДЕТОНАЦИИ, ПОПЫТКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.В. Пинаев

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, Россия
E-mail: avpin@ngs.ru

В 1980-х годах была экспериментально обнаружена и исследована самоподдерживающаяся пузырьковая детонация (ПД) в системах I: инертная жидкость – пузырьки взрывчатого газа и II: горючая жидкость – пузырьки окислителя (А.В. Пинаев, А.И. Сычев). Установлено, что с ростом вязкости жидкости облегчается инициирование ПД, увеличивается ее скорость из-за подавления неустойчивости поверхности пузырьков; при уменьшении вязкости жидкости неустойчивость поверхности возрастает, увеличивается срыв внутрь пузырька микрокапель, их испарение и теплопотери, что приводит к подавлению детонации. По этой причине ПД не распространяется в системах II-го типа в маловязких летучих горючих (бензине, ацетоне), но легко возбуждается в вакуумном масле с пузырьками кислорода. Все эти экспериментальные результаты имеют фундаментальное научное значение.

К настоящему времени по ПД опубликовано около полусотни экспериментальных и теоретических работ. Практически все существующие теоретические модели не учитывают межфазный теплообмен в результате развития неустойчивости поверхности пузырьков и их дробления – в моделях вопреки опыту с ростом вязкости жидкости увеличиваются потери энергии, уменьшаются давление, температура в пузырьках, затрудняется инициирование ПД.

Следующая особенность пузырьковой детонации состоит в том, что ее скорость всего на 10–20% выше скорости уединенной волны в инертной пузырьковой среде с тем же газосодержанием. Скорость ПД определяется не классическим условием Чепмена-Жуге, а свойствами диспергирующей среды и балансом между энерговыделением и теплопотерями. Показано, что нелинейные свойства среды оказывают определяющее влияние на величину скорости детонации, длину и форму волны сжатия. Эти результаты подтверждены опытами по передаче детонации от одного столба пузырьковой среды к другому через слой инертной жидкости, и опытами по резонансному инициированию ПД короткой ударной волной от взрыва проволоочки (А.В. Пинаев, И.И. Кочетков). В частности, показано, что основным механизмом быстрого затухания короткой волны сжатия в пузырьковой среде является резонансное поглощение энергии волны пузырьками в жидкости. Осуществлено теоретическое моделирование ПД с учетом дискретного расположения пузырьков (А.В. Пинаев, И.И. Кочетков).

BASIC EXPERIMENTAL RESULTS ON BUBBLE DETONATION, ATTEMPT TO MODEL

A.V. Pinaev

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS,
Novosibirsk, Russia

E-mail: avpin@ngs.ru

In the 1980s, a self-sustaining bubble detonation (BD) has been experimentally discovered and investigated in systems I: inert liquid – bubbles explosive gas, and II: flammable liquid – bubbles oxidant (A.V. Pinaev, A.I. Sychev). It is established that with increasing viscosity of the fluid facilitates the initiation of BD, its velocity increases due to suppression instability of the bubbles surface; instability surface increases with a decrease in viscosity of the fluid; stall of droplets, their evaporation and heat losses grows inside the bubble, which leads to the suppression of detonation. For this reason, BD does not spread in systems II-type in low-viscosity volatile fuels (gasoline, acetone), but easily excited in vacuum oil with bubbles of oxygen. All these experimental results have fundamental scientific importance.

For today about fifty experimental and theoretical works on BD has been published. Almost all existing theoretical models do not account for the interphase heat and mass transfer as a result of the instability of the bubbles surface and their crushing – in the models, contrary to experience, with increasing viscosity of the fluid energy loss increases, pressure and the temperature in the bubbles reduces, hampering the initiation of BD.

A further feature of bubble detonation is that its speed is only on 10–20% higher speed of the solitary wave in an inert bubble medium with the same gas content. The velocity of BD does not determined by the classical condition Chapman-Jouguet, but dispersive medium properties and the balance between energy release and heat losses. It is shown that the nonlinear properties of the medium have a decisive influence on the detonation velocity, length and shape of compression wave. These results were confirmed by experiments on the transfer of detonation from one column of bubble medium to another through a layer of inert liquid, and experiments on resonance initiation of BD by the short shock wave from the explosion wire (A.V. Pinaev, I.I. Kochetkov). In particular, it is shown that the main mechanism of rapid damping of the short wave compression in a bubbly medium concludes in resonance absorption of wave energy by bubbles in the liquid. Theoretical modeling of BD wave, taking into account the discrete arrangement of the bubbles, was carried out (A.V. Pinaev, I.I. Kochetkov).

2-8

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДАВЛЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ ОБЛАКОМ ИНЕРТНЫХ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

А.В. Федоров, Д.А. Тропин

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

Исследование детонации привлекает большое внимание на протяжении многих лет, в том числе, в связи с проблемой предотвращения катастрофических взрывов. В данной работе численно исследуются процессы подавления и гашения детонации водород-кислородной смеси методом вброса инертных частиц в поле течения. Оказалось, что добавление химически инертных твердых частиц к реагирующей газовой смеси может привести как к различным картинам протекания детонации, так и ее гашению.

В одномерной нестационарной постановке механики гетерогенных сред процесс распространения и подавления детонации в водород-кислородной смеси и распределенными в пространстве частицами песка описывается уравнениями неравновесной газовой динамики в двухскоростном, двухтемпературном приближении. Для моделирования химических превращений в детонационной волне (ДВ) использовалась модель с детальной кинетикой. При проведении численных расчетов был выбран конечно-разностный метод типа универсального алгоритма для аппроксимации по времени, а для пространственной аппроксимации – TVD-схема третьего порядка точности с расщеплением вектора потоков по Ван Лиру.

В сформулированной задаче было исследовано влияние объемной концентрации и диаметра частиц на скорость ДВ, найдены концентрационные (по объемной концентрации частиц) пределы детонации. Выявлено, что при увеличении объемной концентрации частиц, так же как и при уменьшении диаметра частиц с сохранением их доли в объеме, скорость ДВ уменьшается. Получено, что довольно крупные частицы (диаметром более 100 мкм) практически не ускоряются в зоне реакции, в то же время мелкие частицы (диаметром менее 10 мкм) разгоняются в зоне реакции практически до скорости газа. Таким образом показано, что при малых радиусах частиц в зависимости скорости ДВ от диаметра частиц реализуется равновесное, а при больших диаметрах частиц замороженное течение, с непрерывным переходом между ними при промежуточных значениях диаметров частиц.

MATHEMATICAL MODELING OF DETONATION SUPPRESSION BY CLOUD OF INERT SOLID PARTICLES

A.V. Fedorov, D.A. Tropin

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

The study of detonation attracted much attention over the years, including in connection with the problem of

preventing catastrophic explosions. In this paper we study numerically the processes of suppression and quenching of detonation of hydrogen-oxygen mixture by injecting inert particles in the flow field. It was found that the addition of chemically inert particles in the reacting gas mixture can lead to different regimes of detonation, and also to its quenching.

In a one-dimensional transient formulation of the mechanics of heterogeneous media propagation and suppression of detonation in hydrogen-oxygen mixture and sand particles distributed in the space are described by equations of nonequilibrium gas dynamics in two-speed, two-temperature approximation. To simulate the chemical reactions in the detonation wave (DW) model with detailed kinetics was used. In the numerical calculations finite-difference method of a generic algorithm for the approximation of the time was chosen, and for the spatial approximation – TVD-scheme of third order with Van Leer flux vector splitting.

In the formulated problem we investigated the influence of bulk density and particle diameter on DW velocity, the concentration limits of detonation (by volume concentration of particles) was found. It was revealed that an increasing in the volume concentration of particles, as well as decreasing particle diameter at constant volume concentration, DW velocity is reduced. It was found that relatively large particles (diameter more than 100 microns) is practically not accelerated in the reaction zone, at the same time, fine particles (diameter less than 10 microns) is accelerate in the reaction zone practically to gas velocity. Thus it is shown that for small diameters of the particles in dependence of DW velocity on particles diameter equilibrium flow is realized, and at the large diameters of the particles frozen flow is realized, and a continuous transition between them at intermediate values of particle diameters is realized.

2-9

**АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД
ПОСТРОЕНИЯ АДИАБАТЫ РАСШИРЕНИЯ ПВ
НА ОСНОВАНИИ ДАННЫХ ПО РАЗЛЕТУ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК**

А.В. Коваль, Е.Б. Смирнов, Б.Г. Лобойко,
О.В. Костицын, Ю.А. Беленовский, К.М. Просвирнин,
А.Н. Киселёв, В.В. Козель

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Представлен аналитический метод получения адиабаты расширения продуктов детонации непосредственно из экспериментальных данных по разлету цилиндрических оболочек, метаемых продуктами взрыва детонирующего ВВ. В методе используется тот факт, что локальная кривизна стенки цилиндрической оболочки пропорциональна давлению ПВ, действующему на эту стенку. Кривизна стенки определялась на основании экспериментально измеренной траектории стенки цилиндрической оболочки, движущейся под действием продуктов взрыва ВВ. Соответствующий объем продуктов взрыва рассчитывался на основании уравнений непре-

рывности и сохранения импульса. При построении адиабаты ПВ предполагалась несжимаемость оболочки, а также неизменность ее плотности в процессе движения под действием продуктов взрыва. Расширение оболочки считалось квазиодномерным, такой характер движения оболочки соответствует метанию мгновенной детонацией.

Построены адиабаты расширения продуктов взрыва низкочувствительного ВВ для различных начальных радиусов ВВ.

**ANALYTICAL METHOD
TO CONSTRUCT THE EXPLOSION PRODUCTS
EXPANSION ADIABAT USING DATA
ON CYLINDRICAL SHELLS SCATTERING**

A.V. Koval, E.B. Smirnov, B.G. Loboiko,
O.V. Kostitsyn, Yu.A. Belenovsky, K.M. Prosvirnin,
A.N. Kiselev, V.V. Kozel

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

Consideration is given to the analytical method intended to construct the explosion products expansion adiabat. This method directly uses the experimental data on the scatter of cylindrical shells thrown by explosion products (EP) of a detonated HE. The method employs the fact that the local curvature of a cylindrical shell wall is proportional to the EP pressure applied to this wall. The wall curvature was derived from the experimentally measured path of the cylindrical shell wall moving due to the HE explosion products. The continuity equation and the momentum conservation equation were used to determine the volume of explosion products. The EP adiabat was built on the assumption that the shell is incompressible and its density is invariable during its motion induced by explosion products. The shell expansion was considered to be quasi one-dimensional; this character of the shell motion corresponds to the throwing by instantaneous detonation.

The expansion adiabats for the low-sensitivity HE explosion products with HE having different initial radius are built.

2-10

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ
ФЛЕГМАТИЗИРОВАННОГО ТЭНА**

Д.А. Варфоломеев, К.Ф. Гребёнкин,
А.Л. Жеребцов, Д.В. Кочутин

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

В настоящей работе Рассмотрено поведение взрывчатых составов (ВС) на основе тэна, содержащих по массе 5–20% низкоплотного флегматизатора (парафина).

Характерной особенностью детонации таких составов является повышенная на 200–400 м/с скорость детонации по сравнению со скоростью детонации чистого тэна той же плотности. Кроме того экспериментально обнаружено [1, 2], что профили детонационных волн

этих ВС имеют характерное плато давления, расширяющееся в плосковолновых экспериментах по мере увеличения длины заряда. Эти особенности являются характерными признаками так называемого недосжатого режима детонации.

Проведенный в [3] анализ показал, что предложенные ранее модели детонации рассматриваемых ВС весьма чувствительны к уравнениям состояния продуктов взрыва в различных предположениях о степени разложения флегматизирующей добавки.

В настоящей работе использовалась современная термодинамическая модель расчета параметров продуктов взрыва на основе химического состава [4]. Учитывались фазовое состояние конденсированного углерода, сепарация газовой смеси на обогащенную и обедненную молекулярным азотом фазы, а также диссоциация газов в пересжатых режимах детонации.

Кроме того, модель включает химический пик, и, таким образом, более адекватно воспроизводит структуру детонационных волн рассматриваемых ВС.

Предложенная модель верифицирована по имеющимся в открытой литературе экспериментам с образцами флегматизированного тэна [1, 2].

Литература

1. Л.В. Альтшулер, В.В. Балалаев, Г.С. Доронин и др. // ПМТФ, 1982, т. 131, № 1, С. 128-131.
2. Л.В. Альтшулер, В. К.Ашаев, В.В. Балалаев. // ФГВ, 1983, № 4, с. 153.
3. Л.В. Альтшулер, В. С. Жученко, Н.А. Имховик, И.С. Меньшов // Химическая физика, 1999, т. 18, № 11, С. 69-71.
4. V.V. Dremov, A.T. Sapozhnikov, M.A. Smirnova. Wide range equation of state of water taking into account evaporation, dissociation and ionization. Int. Conf. Shock Compression of Condensed Matter. API. 2003, pp. 49-52.

PHLEGMATIZED PETN DETONATION MODEL

D.A. Varfolomeev, K.F. Grebyonkin,
A.L. Zherebtsov and D.V. Kochutin

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

The behavior of PETN-based HE with 5–20% mass-fraction of low-density phlegmatized (paraffin) is examined.

The typical feature of these HE detonation is that their detonation velocity is 200–400 m/s more, than the detonation velocity of pure PETN with the same density. Besides, the experiments [1, 2] showed, that detonation profiles for these HE have the typical pressure plateau, which broadens with charge length increasing in plane-wave experiments.

The analyses, performed at [3], demonstrated, that the earlier proposed detonation models for the examined HE are rather sensitive to DP EOS for different assumptions of paraffin decomposition degree.

By that, the von Neuman peak is accounted in the model, so the detonation wave structure of the examined HE is reconstructed more adequate.

The presented model was verified with the experimental data [1, 2].

References

1. L. V. Altshuler, V. V. Balalaev, G. S. Doronin et al. // PMTF, 1982, v. 131, № 1, pp. 128–131.

2. L. V. Altshuler, V. K. Ashaev, G. S. Doronin et al. // FGV, 1983, № 4, p. 153.

3. L. V. Altshuler, V. S. Zhuchenko, N. F. Imkhovik, I. S. Menshov // Chemical Physics, 1999, v. 18, № 11, pp. 69–71.

4. V. V. Dremov, A. T. Sapozhnikov, M. A. Smirnova. Wide range equation of state of water taking into account evaporation, dissociation and ionization. Int. Conf. Shock Compression of Condensed Matter. API. 2003, pp. 49–52.

2-11

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ РАЗЛОЖЕНИЯ ПРЕССОВАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Ф.Н. Нигматуллин, Б.Г. Лобойко, О.В. Костицын,
Н.П. Тайбинов, Ю.А. Беленовский, Б.Ю. Леднев

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

В работе рассмотрен вариант трехстадийной модели разложения прессованных энергетических материалов (ПЭМ). Модель разработана на основе обобщения результатов исследований кинетики разложения ПЭМ, проводимых в РФЯЦ – ВНИИТФ, в частности, исследований, проведенных на прессованных образцах ($\varnothing 20 \times 20$) на приборе УСТГА [1] в изотермическом режиме.

Модель разложения ПЭМ представлена как суперпозиция трех стадий в следующем виде (1):

$$\begin{cases} \frac{d\alpha}{dt} = \frac{d\beta}{dt} + \frac{d\gamma}{dt} + \frac{d\delta}{dt}; \\ \frac{d\beta}{dt} = k_1 (\beta_0 - \beta)^{n_1}; \\ \frac{d\gamma}{dt} = k_2 (\gamma + \delta)^{n_2} \cdot (1 - \beta_0 - \gamma - \delta)^{n_3}; \\ \frac{d\delta}{dt} = k_3 (1 - \beta_0 - \gamma - \delta)^{n_4}, \end{cases} \quad (1)$$

где α – суммарная глубина превращения ПЭМ; β , γ и δ – глубина превращения соответственно 1, 2 и 3 стадии разложения ПЭМ; k_1 , k_2 , k_3 – константа скорости реакции соответственно первой, второй и третьей стадии; n_1 , n_2 , n_3 , n_4 – порядок реакций стадий разложения.

Рассмотрены возможные модификации модели как в сторону его упрощения, так и сторону усложнения в зависимости от конкретных вариаций экспериментальных данных. Работа модели продемонстрирована на примере обсчета экспериментальных данных по разложению двух типов ПЭМ. Определены параметры уравнения Аррениуса каждой стадии разложения этих материалов и сделаны оценки по прогнозированию кинетики разложения для некоторых температурных режимов.

Литература

1. Нигматуллин Ф.Н., Лобойко Б.Г., Филин В.П. и др. Установка сравнительного термогравиметрического анализа для исследования кинетических характеристик разложения образцов ВВ. // Тезисы международной конференции ЗНЧ-10. Снежинск, РФЯЦ – ВНИИТФ, 2010 – с. 102.

GENERALIZED DECOMPOSITION MODEL OF THE PRESSED ENERGY MATERIALS

F.N. Nigmatullin, B.G. Loboiko, O.V. Kostitsyn,
N.P. Taibinov, Yu.A. Belenovskiy, B.Yu. Lednev

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

The paper presents the version of the three-stage decomposition model of the pressed energy materials (PEM). The model was developed on the basis of generalization of the results of PEM decomposition kinetics studies performed at RFNC – VNIITF, particularly the studies that were performed on the pressed samples ($\varnothing 20 \times 20$) using USTGA device [1] in isothermal mode.

PEM decomposition model is presented as the three stages superposition in the following form (1):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\alpha}{dt} = \frac{d\beta}{dt} + \frac{d\gamma}{dt} + \frac{d\delta}{dt}; \\ \frac{d\beta}{dt} = k_1 (\beta_0 - \beta)^{n_1}; \\ \frac{d\gamma}{dt} = k_2 (\gamma + \delta)^{n_2} \cdot (1 - \beta_0 - \gamma - \delta)^{n_3}; \\ \frac{d\delta}{dt} = k_3 (1 - \beta_0 - \gamma - \delta)^{n_4}, \end{array} \right. \quad (1)$$

where α is the total rate of PEM conversion; β , γ and δ – is the conversion rate of 1, 2 and 3 PEM decomposition stages correspondingly; k_1 , k_2 , k_3 – is the reaction rate constant of the first, second and the third stage correspondingly; n_1 , n_2 , n_3 , n_4 – is the order of reactions of decomposition stages.

Possible modifications of the model were considered in both ways: towards its simplification, and towards its complication depending on the specific versions of experimental data. The model operation was demonstrated by the example of counting of experimental data on decomposition of two types PEM. Arrhenius equation parameters of each decomposition stage of these materials were determined and estimations on forecasting decomposition kinetics for some temperature conditions were made.

References

1. F.N. Nigmatullin, B.G. Loboiko, V.P. Filin et al. Installation of a comparative thermo gravimetric analysis (USTGA) for examination of kinetic decomposition characteristics of HE samples. // X Zababakhin Scientific Talks // Theses of International Conference – Snezhinsk, RFNC – VNIITF, 2010 – p. 102.

2-12

РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЗОНЫ РЕАКЦИИ НИЗКОПЛОТНОГО ТАТБ

Ю.Р. Никитенко, Ю.А. Аминов

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: yu.r.nikitenko@vniitf.ru

Представлены результаты расчетного моделирования проведенных в РФЯЦ – ВНИИТФ опытов по регистрации структуры зоны химической реакции и последующей изэнтропической разгрузки продуктов взрыва детонирующего низкоплотного ТАТБ. Опыты проводились коллективом сотрудников РФЯЦ – ВНИИТФ имени академика Е.И. Забабахина под общим руководством В.И. Таржанова и А.В. Павленко. В экспериментах методом лазерной интерферометрии осуществлялась регистрация профиля скорости границы детонирующих зарядов из низкоплотного ($\approx 1,8$ г/см³) ТАТБ и прозрачной преграды из фторида лития. Высокое временное разрешение лазерно-интерферометрических методов регистрации позволяет воспроизводить как тонкую структуру зоны реакции детонирующего ВВ, так и профиль примыкающей волны разгрузки на протяжении нескольких микросекунд.

Расчетное моделирование проведенных опытов осуществлялось с целью оценки точности воспроизведения экспериментальных результатов при использовании различных моделей кинетики детонации и уравнений состояния нереагирующего ВВ и продуктов взрыва. Показано, что различные общепотребительные модели детонации дают существенно отличающиеся профили детонационных волн. Ни одна из протестированных моделей не дала хорошего согласия с результатами измерений, что свидетельствует о необходимости дальнейших работ по исследованию механизмов детонации гетерогенных ВВ, как теоретических, так и экспериментальных.

NUMERICAL SIMULATION OF REACTION ZONE STRUCTURE FOR LOW-DENSITY TATB

Y.R. Nikitenko, Yu.A. Aminov

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

E-mail: yu.r.nikitenko@vniitf.ru

Experiments conducted at RFNC – VNIITF to register the structure of the chemical reaction zone and the following isentropic release of explosion products from the detonating low-density TATB were numerically simulated and results of this simulation are presented. These experiments were performed by a group of RFNC – VNIITF experts headed by V.I. Tarzhanov and A.V. Pavlenko. In experiments, laser interferometry was used to register the boundary velocity profile for detonating charges of low-density (≈ 1.8 g/cm³) TATB and the lithium fluoride barrier. The

high time resolution of laser-interferometric methods allows both the fine structure of the detonating HE reaction zone, and the profile of the adjacent unloading wave to be registered within few microseconds.

The above experiments were numerically simulated to estimate accuracy of experimental results reproducibility when different detonation kinetic models and different equations of state are used for the nonreactive HE and explosion products. It was demonstrated that different commonly used denotation models give essentially different profiles of detonation waves. None of tested models showed good agreement with the measurement results thus indicating the necessity for further, both theoretical and experimental, investigations into detonation mechanism of heterogeneous HE.

2-13

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДА УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ДЕТОНАЦИОННУЮ ВО ВЗРЫВЧАТОМ СОСТАВЕ НА ОСНОВЕ ТАТБ

Д.А. Варфоломеев, К.Ф. Гребёнкин, А.Л. Жеребцов

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

В работе представлены результаты численного моделирования плосковолновых экспериментов [1], в которых исследовался процесс перехода ударной волны в детонационную во взрывчатом составе (ВС) на основе ТАТБ.

Условия нагружения исследуемых образцов отличались амплитудой и градиентом давления за фронтом инициирующей ударной волны.

В расчетах использовалась модель макрокинетики химических реакций в детонирующих гетерогенных ВВ, основанная на предположении о том, что под действием инициирующей ударной волны образуются микроочаги с различной топологией горения: точечные («горячие точки») и поверхностные («горячие поверхности») [2].

Указанная модель ранее позволила описать наблюдаемую в экспериментах [3] линейную стадию роста давления со временем при инициировании образцов ВС на основе ТАТБ ступенчатым импульсом.

Применительно к экспериментам [1], модель [2] воспроизвела низкоскоростной режим взрывчатого превращения при инициировании образцов ударными волнами со спадающим профилем давления.

Литература

1. Лобойко Б.Г., Костицын О.В., Смирнов Е.Б. и др. Переход ударной волны в детонационную во взрывчатом составе на основе ТАТБ. Сборник тезисов докладов X Забабахинских Научных Чтений, Снежинск, 2010 г., стр. 62.
2. Варфоломеев Д.А., Гребенкин К.Ф., Жеребцов А.Л., Тараник М.В. «Горячие поверхности» в гетерогенных взрывчатых веществах, инициируемых ударной волной. Физика горения и взрыва, 2010 г., т. 46, № 4, стр. 127–131.
3. Gustavsen R.L., Sheffield S.A., Alcon R.R. Measurements of shock initiation in the TATB base explosive PBX 9502: wave

forms from embedded gauges and comparison of four different material lots. J. Appl. Phys., 2006, V. 99, p. 114907.

MODELING OF SHOCK-TO-DETONATION TRANSITION IN THE TATB-BASED EXPLOSIVE

D.A. Varfolomeev, K.F. Grebyonkin, A.L. Zherebtsov

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

The computer modeling of the plane-wave experiments [1] was performed. In these experiments the process of the shock-to-detonation transition in the TATB-based explosive was examined. Loading conditions of explosive samples differed by pressure amplitude and gradient behind the initiating shock wave front.

The macrokinetic model of chemical reactions in detonating heterogeneous high explosives [2] was used. The model is based on suggestion that the initiating shock wave creates not only the hot spots, but the «hot surfaces» as well.

Previously this model enabled to describe the linear stage of temporal pressure growth in explosive samples initiating by stepwise pulse [3].

Due to the experiments [1], the model [2] reproduced the low-velocity regime of explosive transformation at the condition of decreasing pressure profiles of initiating shock wave.

References

1. B.G. Loboiko, O.V. Kostitsyn, E.B. Smirnov et al. // Abstracts of X Zababakhin Scientific Talks, Snezhinsk, Russia, 2010, p. 62.
2. D.A. Varfolomeev, K.F. Grebyonkin, A.L. Zherebtsov, M.V. Taranik // Fizika gorennya i vzryva, v. 46, № 4, pp. 127–131.
3. Gustavsen R.L., Sheffield S.A., Alcon R.R. Measurements of shock initiation in the TATB base explosive PBX 9502: wave forms from embedded gauges and comparison of four different material lots. J. Appl. Phys., 2006, V. 99, p. 114907.

2-14

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАСТИЧНОГО ВВ

Юн Чен, Яо Лонг

Институт прикладной физики и вычислительной
математики, Пекин, Китай

В данной работе представлены современные результаты проведенного нами численного моделирования ВВ с пластическим связующим (октоген/графит и т. д.). С помощью многомасштабных методов (масштабы: квантовая механика/молекулярная статистическая механика/молекулярная динамика) было проведено всестороннее изучение термодинамических характеристик структур состава октоген/графит. Во-первых, при помощи первопринципных и молекулярнодинамических расчетов были исследованы фазовый переход и механические свойства октогена под воздействием высокой температуры и высокого давления. Была получена теоретическая фазовая диаграмма октогена (β -, δ -, γ -октоген). Во-вторых, нами подобран корректный

интерфейсный потенциал атомного взаимодействия молекулярного октогена и добавленных атомов графита. И, наконец, были исследованы динамические характеристики соединения октоген/графит с помощью метода молекулярной динамики. Основываясь на анализе силового поля, моделируется и рассматривается механизм «горячей точки» в октогене, вызванной ударным нагружением. На основе вышеуказанных результатов моделирования, мы можем получить некоторые обоснованные представления о роли графита как вещества, снижающего чувствительность ВВ октоген/графит.

THE NUMERICAL SIMULATION STUDY ON THE DYNAMIC BEHAVIORS OF PBX EXPLOSIVE

Jun Chen, Yao Long

Beijing Institute of Applied Physics
and Computational Mathematics, Beijing, China

In this paper, we will report our recent numerical simulation results on the PBX explosive (HMX/graphite, etc). By using the multi-scale methods in QM (quantum mechanics)/MSM (molecular statistic mechanics)/MD (molecular dynamics) scales, a comprehensive study on the thermal dynamic behaviors of compound structure HMX/graphite has been carried out. First, we study the phase transition and mechanical properties of HMX under high temperature and high pressure by using ab initio method combining with MD method. The theoretical HMX phase diagram (β -, δ -, γ -HMX) is obtained, Second, we fit the suitable interface atomic interaction potential between the HMX molecular with the additives graphite atoms. At last, the dynamic behaviors of HMX/graphite are investigated by using MD method. The mechanism of hot spot in HMX induced by the shock loading is simulated and discussed based on the force field analysis. Based on above simulation results, we can obtain some reasonable understandings on the desensitivity role of graphite in the PBX explosive HMX/graphite.

2-15

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДИАГНОСТИКИ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 100-ПОЛЮСНОГО СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ВИГГЛЕРА НАКОПИТЕЛЯ ВЭПП-4

Б.П. Толочко¹, И.Л. Жогин¹, Н.А. Мезенцев²,
Е.Б. Левичев², Г.Н. Кулипанов²,
В.М. Аульченко², К.А. Тен³

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

²Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

³Институт гидродинамики СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: tolochko@inp.nsk.su, kulipanov@inp.nsk.su,
ten@hydro.nsc.ru

Станция разрабатывается для исследования в реальном времени (in situ) протекания физико-химических

процессов в зоне химической реакции детонирующих взрывчаток диаметром до 70 мм и массой до 200 г (тройлиновый эквивалент) методами микротомографии, малуглового рассеяния, скоростной рентгеновской дифракции и рентгеновской спектроскопии.

В настоящее время исследование детонации проводится на станции «ВЗРЫВ» накопителя ВЭПП-3 [1], где спектр излучения «мягкий» и не позволяет исследовать образцы диаметром более 15 мм. Поэтому проводятся эксперименты на модельных объектах, отличающихся масштабом от «реальных», используемых в промышленности и современном оружии зарядов. Однако, как было показано ранее [2], масштабирование и использование оболочек приводит к изменению физико-химических процессов в зоне химической реакции детонационного процесса. Поэтому эксперименты на модельных объектах дают искаженное представление о процессах в «реальных» объектах. На новой установке это ограничение снимается за счет смещения спектра в жесткую область.

Ожидаемый поток фотонов на детекторе DIMEX после прохождения взрывчатки толщиной 50 мм и бериллиевых окон взрывной камеры составляет 10^{15} фотон/мм²/сек, или 10^9 фотон/мм²/банч, что вполне достаточно для проведения запланированных экспериментов.

Литература

1. <http://ssrc.inp.nsk.su/CKP/stations/passport/0b/>
2. Titiv V.M., Tolochko B.P., et al. // Diamond and related materials, 2007, v. 16, P. 2009–2013.

NEW POSSIBILITIES IN DIAGNOSTICS OF DETONATION PROCESSES AT THE SYNCHROTRON RADIATION STATION OF THE 100-POLE SUPERCONDUCTIVE WIGGLER OF THE VEPP-4 STORAGE RING

B.P. Tolochko¹, I.L. Zhogin¹, N.A. Mezentsev²,
E.B. Levichev², G.N. Kulipanov²,
V.M. Aulchenko², K.A. Ten³

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

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

³Lavrentiev Institute of Hydrodynamics, SB RAS,
Novosibirsk, Russia

E-mail: tolochko@inp.nsk.su, kulipanov@inp.nsk.su,
ten@hydro.nsc.ru

This station is under development for in situ exploration of the behavior of physical-chemical processes in the zone of chemical reaction of detonating explosives up to 70 mm in diameter and 200 g in weight (trotyl equivalent) by the methods of microtomography, small angle scattering, high-speed X-ray diffraction, and X-ray spectroscopy.

The detonation exploration is now performed at the «EXPLOSION» station of the VEPP-3 storage ring, the radiation spectrum of which is «soft», and thus samples bigger than 15 mm in diameter cannot be explored. For this reason, the experiments are conducted on model objects, differing in size from «real» charges applied in industry and

up-to-date weapon. It has been shown earlier [2], however, that dimensional scaling as well as use of shells results in changes in the physical-chemical processes in the zone of the detonation process chemical reaction. Therefore, experiments on model objects misrepresent processes in «real» items. One will not face this restriction on the new facility because its spectrum is shifted to the hard region.

The estimated photon flux on the DIMEX detector after passing through an explosive 50 mm thick and beryllium windows is 10^{15} photon/mm²/sec, or 10^9 photon/mm²/bunch, which is quite sufficient for the experiments planned.

References

1. <http://ssrc.inp.nsk.su/СКР/stations/passport/0b/>
2. Titov V.M., Tolochko B.P., et al.// Diamond and related materials, 2007, v. 16, P. 2009–2013.

2-16

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЕТОНАЦИОННОГО ТЕЧЕНИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ ПД ПО ДАННЫМ СИНХРОТРОННОЙ ДИАГНОСТИКИ

К.А. Тен¹, Э.Р. Прууэл¹, А.О. Кашкаров¹,
Л.А. Лукьянчиков¹, Л.А. Мержиевский¹,
Ю.А. Аминов², Е.Б. Смирнов²,
А.К. Музыря², О.В. Костицын²

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

²Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: pru@hydro.nsc.ru

Представлен метод восстановления газодинамических параметров детонационного течения по данным рентгенографического эксперимента с использованием в качестве источника синхротронного излучения. В основе метода определения параметров уравнений состояния лежит сравнение экспериментально определенных и рассчитанных полей распределения плотности разлетающихся ПД. Минимизация функционала среднеквадратичных отклонений расчетных и экспериментальных величин рентгеновской тени дает искомые значения варьируемых параметров уравнений состояния.

Метод позволяет подбирать параметры тестируемого уравнения состояния продуктов детонации и, используя численный расчет, восстанавливать поля газодинамических характеристик (плотности, давления, вектора массовой скорости).

Указанным способом определены параметры уравнений состояния ПД и параметры детонационного течения для зарядов на основе ТАТБ, БТФ и пластического ВВ на основе ТЕНа. При этом, применялись наиболее часто используемых в расчетах формы представления уравнения состояния.

CHARACTERIZATION OF DETONATION FLOW AND VERIFICATION OF THE EQUATION OF STATE OF DETONATION PRODUCTS PERFORMED USING SYNCHROTRON DATA

K.A. Ten¹, E.R. Prueel¹, A.O. Kashkarov¹,
L.A. Lukyanchikov¹, L.A. Merzhievsky¹,
Yu.A. Aminov², E.B. Smirnov²,
A.K. Muzyrya², O.V. Kostitsyn²

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

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

E-mail: pru@hydro.nsc.ru

A method allowing reconstruction of gas-dynamic characteristics of detonation flows from data gained in X-ray tests performed using, as the radiation source, synchrotron radiation is reported. The method used for determining the quantities in the state equation was based on performing a comparison between the experimentally measured and calculated density fields of expanding detonation products. Minimization of the standard deviation functional for the calculated and measured X-ray shadow yields the sought values of varied parameters in the state equation.

The method permits adjustment of quantities in the state equation of detonation products under study and allows one, using calculated data, to reconstruct the field of gas-dynamic quantities (density, pressure, mass velocity vector).

The method was used to evaluate the parameters in the state equation of detonation products and determine the detonation flow characteristics for charges based on TATB, BTF, and a plastic ten-based explosive. Various representations of the state equation frequently used in practical calculations are given.

2-17

КОНДЕНСАЦИЯ УГЛЕРОДА ПРИ ДЕТОНАЦИИ БТФ

В.М. Титов, К.А. Тен, Э.Р. Прууэл

Учреждение РАН Институт гидродинамики
им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения РАН,
Новосибирск, Россия

E-mail: ten@hydro.nsc.ru

В период исследования синтеза алмазной фазы углерода при детонации бризантных ВВ сотрудниками Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева (Новосибирск) и ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина (Снежинск) были поставлены эксперименты с детальным изучением твердого остатка (шихты) после взрыва высокотемпературного ВВ бензотрифуроксана (БТФ) – C₆N₆H₆. Ввиду высокой температуры продуктов детонации этого безводородного ВВ они находятся в начальный момент в области термодинамической устойчивости жидкой фазы углерода. Работа была поставлена при поддержке академика Б.В. Литвинова, работавшего тогда главным конструктором ВНИИТФ. Результаты этой совместной работы опубликованы в журнале ФГВ (1993, т. 29, № 4,

с. 131–134). Эксперименты выполнены с зарядами массой приблизительно 1000 г.

Средний размер областей когерентного рассеяния в образцах шихты составил по данным рентгеноструктурного анализа 31 нм (при синтезе нанодIAMZОВ из состава ТГ – 3–4 нм).

Анализ электронно-микроскопических изображений показал, что порошок состоит из весьма рыхлых образований размером от 0,1 до 1 мкм, состоящих из алмазных частиц с характерным размером 20–40 нм.

При разработке методов синхротронной диагностики детонационных процессов в настоящее время представляло интерес проверить эти данные с помощью новой методики. Исследуемые образцы были подготовлены сотрудниками ВНИИТФ.

Малоугловое рассеяние на образующихся частицах алмазной структура показало, что размер их действительно достигает 70–100 нм, что было получено ранее методами электронной микроскопии. Заметим, что размер зарядов в первой серии составлял по диаметру 70 мм при высоте около 140 мм, а в серии с измерением малоуглового рассеяния 20 × 30 мм, т. е. масштабный эффект в этом плане отсутствует.

Обращает на себя внимание факт, что рост частиц до максимального размера в случае БТФ происходит быстрее, чем для ВВ типа ТГ или ТАТБ. Возможно это связано с более высокой температурой продуктов детонации. Но разделить факторы высокой температуры и отсутствия водорода, что может сказаться на скорости занятия ненасыщенных валентностей углерода, пока затруднительно.

CONDENSATION OF CARBON UNDER BENZOTRIFUROXANE DETONATION

V.M. Titov, K.A. Ten, E.R. Prueel

Lavrentiev Institute of Hydrodynamics
of RAS Siberian Branch, Novosibirsk, Russia

E-mail: ten@hydro.nsc.ru

While studying the synthesis of carbon diamond phase at HE detonation, the scientists from Lavrentiev Institute of Hydrodynamics (Novosibirsk) and VNIITF (Snezhinsk) set up the experiments aimed to comprehensively analyze the fixed residue (charge) after the detonation of high-temperature HE, namely benzotrifuroxane (BTF) – $C_6N_6H_6$. Due to their high temperature, the detonation products of this hydrogen-free HE at the initial instant are found in the thermodynamic stability region of carbon liquid phase. This work was performed with assistance of academician B.V. Litvinov who was VNIITF Chief Designer at that time. The results of this joint work are presented in «Physics of Combustion and Explosions» (1993, vol. 29, # 4, pp. 131–134). The charges of approximately 1000 g were used for the experiments.

According to X-ray structural data, the average size of coherent scattering region in charge samples was 31 nm (while for the nanodiamonds synthesis from TNT-RDX composition this value was 3–4 nm).

Analysis of electron microscope images demonstrated the powder to be composed of highly unconsolidated formations that were ranging from 0.1 to 1 μm in size

and consisted of diamond particles with typical size of 20–40 nm.

While developing methods of synchrotron diagnostics of detonation products, it was now interesting to verify these data using new techniques. Test samples were prepared by VNIITF employees.

Small-angle scattering on the arising diamond structure particles proved the size of these particles to reach 70–100 nm and thus confirmed the previous results of electron microscopy. Note that the charges in the first series were 70 mm in diameter and 140 mm in height, while in the series with small-angle scattering measurements their size was 20 × 30 mm, i.e. no scale effect in this context.

Notable is the fact that for BTF, the particles reach their maximum size faster than in the case with TNT-RDX or TATB-based explosives. It could be possibly related to the higher temperature of detonation products. But at the moment, it is difficult to distinguish the influence of such factors as high temperature and absence of hydrogen that can affect velocity with which unsaturated valences of carbon are occupied.

2-18

ИССЛЕДОВАНИЕ ТАТБ ДИФРАКЦИОННЫМИ МЕТОДИКАМИ

К.А. Тен¹, Э.Р. Прууэл¹, Л.А. Лукьянчиков¹,
Б.П. Толочко², М.Р. Шарафутдинов²,
А.Н. Шмаков³, Ю.А. Аминов⁴, А.К. Музыря⁴,
О.В. Костицын⁴, Е.Б. Смирнов⁴

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева
СО РАН, Новосибирск, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт химии твердого тела и механохимии
СО РАН, Новосибирск, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН,
Новосибирск, Россия

⁴Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: ten@hydro.nsc.ru

Внутренние параметры исходных взрывчатых материалов (ВМ) сильно влияют на их детонационные характеристики. Контроль таких параметров как распределение пор по размерам, а также изменение параметров кристаллической решетки в зависимости от температуры является в настоящее время актуальной задачей.

Дифракционные методики исследования ТАТБ позволяют определять внутренние параметры ВВ без нарушения целостности образца. В работе изложены результаты дифракционных исследований ТАТБ с использованием синхротронного излучения от ускорительного комплекса ВЭПП-3.

Исследование внутренней структуры образцов из ТАТБ проводилось методом малоуглового рассеяния синхротронного излучения при вариации температуры

от 27 до 240 °С. Особенностью данной работы является использование монохроматического пучка ($E = 8,2$ кэВ) и двухкоординатного детектора Mar Research Sx165.

Измерение структуры кристаллов ТАТБ проводилось путем измерения угла отклонения дифракционных пиков на большие углы (до 90°) с использованием детектора OD-3М (3000 приемных каналов). При изменении температуры на 200°С чувствительность данной методики составляет 1,5°С.

DIFFRACTION METHODS TO INVESTIGATE TATB

K.A. Ten¹, E.R. Prueel¹, L.A. Lukyanchikov¹,
B.P. Tolochko², M.R. Sharafutdinov²,
A.N. Shmakov³, Yu.A. Aminov⁴,
A.K. Muzyrya⁴, O.V. Kostitsyn⁴, E.B. Smirnov⁴

¹Lavrentiev Institute of Hydrodynamics
of RAS Siberian Branch, Novosibirsk, Russia

²Institute of Chemistry of Solids of Siberian Branch RAS,
Novosibirsk, Russia

³Boreskov Institute of Catalysis, of Siberian Branch RAS,
Novosibirsk, Russia

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

Inner parameters of initial high explosives (HE) dramatically influence their detonation characteristics. Control of such parameters as pore-size distribution, as well as changes in a crystal lattice depending on temperature is currently a challenge.

Diffraction methods of TATB investigation allow defining the internal parameters of HE without the sample integrity violation. Synchrotron emission from the accelerator complex VEPP-3 was used to investigate TATB and results of this diffraction analysis are presented.

The method of small-angle scattering of synchrotron emission with the ambient temperature varying from 27 to 240 °С was applied to investigate the internal structure of TATB samples. The monochromatic beam ($E = 8.2$ keV) and two-axis detector Mar Research Sx165 are the distinctive features of this effort.

Detector OD-3М (3000 receiving channels) was used to determine the structure of TATB crystals through measuring the deflection angle of diffraction peaks by up to 90° (wide angle). The sensitivity of this method makes 1.5 °С when the temperature of the sample changes by 200 °С.

СИНХРОТРОННАЯ ДИАГНОСТИКА ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИИ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ В ЗАРЯДАХ НА ОСНОВЕ ТАТБ

К.А. Тен¹, Э.Р. Прууэл¹, А.О. Кашкаров¹,
Л.А. Лукьянчиков¹, Ю.А. Аминов², Е.Б. Смирнов²,
А.К. Музыря², О.В. Костицын²

¹Учреждение Российской академии наук Институт
гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, Россия

²Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: kashkarov@hydro.nsc.ru

Проведена серия экспериментов по определению параметров ударных волн и условий инициирования зарядов ВВ на основе ТАТБ. Генерация ударной волны производилась металлическим ударником метаемым отдельным зарядом ВВ со скоростями от 200 до 2000 м/с.

Бесконтактным рентгенографическим методом синхротронной диагностики [1, 2] независимо определялись: скорость вещества и скорость фронта ударной волны, скорость отраженной ударной волны, пространственное распределение плотности в исследуемом ударно-волновом течении.

По полученным данным построена ударная адиабата исследуемого ВВ для диапазона массовой скорости 200–1000 м/с. Получены некоторые параметры при двойном ударно-волновом сжатии, возникающем при отражении ударной волны от твердой стенки.

Определены условия двух режимов инициирования детонационной волны: инициирование в прямой и отраженной ударной волне.

Литература

1. В.М. Титов, Э.Р. Прууэл, К.А. Тен и др. Опыт применения синхротронного излучения для исследования детонационных процессов // Физика горения и взрыва. 2011. № 6. С. 3–16.
2. E.R. Prueel, K.A. Ten, V.M. Titov et al. X-ray transmission tomography for detonation investigation // Proceedings 14th International Detonation Symposium. 2010. pp. 345–351.

SYNCHROTRON DIAGNOSTICS OF DETONATION INITIATION BY A SHOCK WAVE IN TATB-BASED CHARGES

K.A. Ten¹, E.R. Prueel¹, A.O. Kashkarov¹,
L.A. Lukyanchikov¹, Yu.A. Aminov², E.B. Smirnov²,
A.K. Muzyrya², O.V. Kostitsyn²

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

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

E-mail: kashkarov@hydro.nsc.ru

A series of experiments aimed at determination of shock-wave characteristics and conditions for initiation of TATB-based charges was carried out. The shock wave was initiated by a metal projectile set in motion by a separate ex-

ploding charge at a velocity ranging from 200 to 2000 m/s.

The contactless X-ray synchrotron method [1, 2] was used to independently measure the substance velocity and the shock-wave front velocity, the velocity of the reflected shock wave, and the spatial distribution of density in the shock-wave flow under study.

The data obtained were used to plot the shock adiabat of the high explosive in the range of mass velocity 200 to 1000 m/s. Under the shock-wave compression arising upon reflection of the shock wave from a hard wall, numerical values of some characteristics were determined.

Conditions for the emergence of two initiation regimes of detonation waves, initiation with direct or reflected shock waves, were identified.

References

1. V.M. Titov, E.R. Prueel, K.A. Ten et al. Experience of using synchrotron radiation for studying detonation processes // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2011. No. 6. P. 3–16.
2. E.R. Prueel, K.A. Ten, V.M. Titov et al. X-ray transmission tomography for detonation investigation // *Proceedings of the 14th International Detonation Symposium*. 2010. pp. 345–351.

2-20

ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СМЕСЕЙ НИТРОМЕТАНА С НЕВЗРЫВЧАТЫМИ ЖИДКОСТЯМИ

А.В. Ананьин, С.А. Колдунов,
В.А. Гаранин, С.И. Торунов

Институт проблем химической физики РАН,
Черноголовка, Россия

E-mail: ananin@icp.ac.ru; skold@fcp.ac.ru

В работе изучалась чувствительность к ударным волнам бинарных смесей нитрометана с метанолом (М), нитробензолом (НБ) и ацетоном (Ац). Используя щелевую фоторегистрацию, по схеме активный заряд – инертный барьер (ослабитель) – исследуемое вещество подобраны взрывные генераторы ударных волн, обеспечивающие предельные воздействия для возбуждения детонации (теплого взрыва). При развитии процесса регистрируются стадии, типичные для инициирования жидких ВВ: предсвечение, связанное с распространением детонации, сформировавшейся с некоторой задержкой в ударно сжатом веществе; область яркого свечения, вызванного эффектом пересжатия; выход детонации из режима пересжатия.

Измерение параметров инициирующих ударных волн производилось электромагнитным методом. Для определения массовой скорости датчики из алюминиевой фольги устанавливались непосредственно на границе раздела ослабитель (тефлон) – исследуемая жидкость. В экспериментах использовались стеклянные оболочки с внутренним диаметром 67 мм при диаметре активного заряда 80 мм.

Для предельных давлений P_i , которые еще в состоянии инициировать детонацию (тепловой взрыв), и давлений P_n , не инициирующих процесс ни в одном из опытов, получены зависимости от содержания разбави-

теля: для смеси НМ/М с массовой долей (α) метанола 0,2; 0,25; 0,30; 0,35; 0,38 и 0,40 – $P_i = 7,90 - 2,0\alpha$ [ГПа], $P_n = 7,70 - 2,0\alpha$ [ГПа]; для смеси НМ/НБ ($\alpha = 0,25; 0,32; 0,39$ и $0,43$) – $P_i = 8,05 + 2,0\alpha$ [ГПа], $P_n = 7,75 + 2,0\alpha$ [ГПа] и для смеси НМ/Ац ($\alpha = 0,1; 0,15; 0,21$ и $0,25$) – $P_i = 7,65 + 0,8\alpha$ [ГПа], $P_n = 7,41 - 0,3\alpha$ [ГПа]. Последние значения α для всех разбавителей отвечают смесям, которые не способны детонировать в реальных условиях. Видно, что в случае ацетона предельные давления практически не изменяются с увеличением α . В то время как в смеси НМ/НБ имеет место заметное увеличение, а в смеси НМ/М – уменьшение этих давлений с разбавлением. Однако последнее не означает, что чувствительность смеси возрастает с увеличением содержания метанола. Разбавление нитрометана невзрывчатыми (инертными) жидкостями приводит только к уменьшению чувствительности. Об этом свидетельствует необходимость в более интенсивных ударно-волновых воздействиях, т. е. более мощных взрывных генераторах.

Определяемые непосредственно в смесях предельные давления инициирования P_i и P_n являются их внутренними параметрами и определяются свойствами самих смесей как вещества (плотностью, сжимаемостью и т. д.). Знание P_i и P_n имеет важное значение при рассмотрении вопроса о переходе энерговыделения в детонационный процесс и при оценке опасности от внешних динамических воздействий.

INVESTIGATION OF SHOCK WAVE SENSITIVITY OF NITROMETHANE MIXTURES WITH NON-EXPLOSIVES LIQUIDS

A.V. Ananin, S.A. Koldunov,
V.A. Garanin, S.I. Torunov

Russian Academy of Sciences, Institute of Problems
of Chemical Physics, Chernogolovka, Russia

E-mail: ananin@icp.ac.ru; skold@fcp.ac.ru

In this paper the sensitivity to shock-wave action of binary mixtures of nitromethane (NM) with methanol (M), nitrobenzene (NB), and acetone (Ac) was studied. Using a slit photo-registration the explosive generators of shock waves in compliance with the scheme «active charge (booster) – inert barrier (attenuator) – mixture under study» were selected to provide the limit actions for excitation of detonation (thermal explosion). When the process developing the typical stages for initiation of liquid explosives are registered: the preliminary luminescence connected to expansion of detonation that formed with some delay in shock-compressed substance; the zone of bright luminescence caused by overdriven effect; the detonation withdrawal from overdriven regime.

The measurement of the initiation shock wave parameters has been conducted by an electromagnetic method. To determine the particle velocity the gages from aluminum foil were directly placed at the attenuator (teflon) – liquid under study interface. In the experiments the glass shells with inner diameter of 67 mm were used at the active charge's diameter of 80 mm.

The dependences on diluent concentration are set for the limiting pressures P_i which are still able to initiate

detonation (thermal explosion), and for pressure P_n that do not initiate a process in any of experiments: for the NM/M mixture with a mass fraction (α) of methanol 0.2, 0.25, 0.30, 0.35, 0.38 и 0.40 – $P_i = 7.90 - 2.0\alpha$ [GPa], $P_n = 7.70 - 2.0\alpha$ [GPa]; for the NM/NB mixture ($\alpha = 0.25, 0.32, 0.39$ и 0.43) – $P_i = 8.05 + 2.0\alpha$ [GPa], $P_n = 7.75 + 2.0\alpha$ [GPa]; for the NM/Ac mixture ($\alpha = 0.1, 0.15, 0.21$ и 0.25) – $P_i = 7.65 + 0.8\alpha$ [GPa], $P_n = 7.41 - 0.3\alpha$ [GPa]. The last values of α for all diluents correspond to mixtures that are non-detonable in real conditions. One can see, the limiting pressures in the case of acetone are almost unchanged with increasing of α . While in NM/NB mixture there is a noticeable increase, and in NM/M mixture – a decrease of these pressures with dilution. However, the latter does not mean that the sensitivity of the mixture increases with the methanol content increasing. A dilution of nitromethane with non-explosive (inert) fluid leads only to a decrease in sensitivity. Also, the need for more intense shock-wave effects, i. e. more powerful explosive generators is evidenced about this.

The limiting initiation pressures (P_i and P_n) which determined directly in mixtures should be considered as purely an intrinsic parameter, which is defined by properties of mixture itself as a substance (density, compressibility and so on). The knowledge of P_i and P_n is of importance when considering the question of transition the energy release to detonation process and assessing danger from external dynamical exposures.

2-21

БЫСТРОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ДВУХФАЗНОЙ СИСТЕМЕ

А.П. Ершов, А.О. Кашкаров,
Л.А. Лукьянчиков, Э.Р. Прууэл

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

E-mail: ers@hydro.nsc.ru

Исследовано инициирование тэна насыпной плотности потоком горячего газа, созданным взрывом активного заряда, отделенного воздушным промежутком. При внедрении потока в порошок возникало сложное двухфазное течение, динамика которого исследовалась методом синхротронного просвечивания. Из данных синхротронной радиографии восстанавливались двумерные распределения плотности в цилиндрической геометрии с шагом по времени 0,5 мкс.

В заряде диаметра 15 мм и длины 25 мм, помещенном в малопрочную пластиковую оболочку, при воздействии потока воздуха с массовой скоростью 2,4 км/с и давлением торможения 80 МПа развивалась нормальная детонация за время около 10 мкс. При таком «мягком» воздействии режим инициирования заведомо не ударноволновой. Ключевую роль играет межфазное взаимодействие горячего газа и порошка тэна. По существу, речь идет о необычно быстром переходе горения в детонацию.

Данные эксперимента сравнивались с результатами расчетов по двухфазной, двухскоростной, двухтемпе-

ратурной модели. Приемлемое согласие получено при учете ускорения реакции за счет дробления частиц при компактировании порошка и интенсификации горения из-за сдвиговой неустойчивости испаряющегося поверхностного слоя вещества при обтекании частиц высокоскоростным потоком газа. Без учета этих двух процессов модель не описывает эксперимент, а при учете их по отдельности достигается в лучшем случае интегральное согласие.

В особенности важна начальная стадия процесса, в которой скорость реакции, на порядок превышающая стандартную, должна достигаться в неуплотненном веществе. Кроме механизма сдвиговой неустойчивости, на этом этапе могут играть роль дробление, вызванное неравномерностью аэродинамических нагрузок, а также ускоренное нестационарное горение, поддерживаемое интенсивным тепловым потоком из газовой фазы.

FAST DETONATION INITIATION IN A TWO-PHASE SYSTEM

A.P. Ershov, A.O. Kashkarov,
L.A. Lukyanchikov, E.R. Prueel

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS,
Novosibirsk, Russia

E-mail: ers@hydro.nsc.ru

Initiation of loose-packed PETN due to injection of a hot gas, produced by the explosion of an active charge separated by the air gap, was studied. The dynamics of two-phase flow emerging after the injection was investigated using the synchrotron radiation source. Two-dimensional density distributions were extracted from the synchrotron X-ray data assuming axial symmetry, with 0.5 μ s time step.

The detonation was ignited within 10 μ s in a charge of 15 mm in diameter and 25 mm long with a thin plastic casing if the initiating air flow velocity was 2.4 km/s (dynamic head of 80 MPa). Such a mild impact rules out the shock initiation mechanism. The interaction between the hot gas and explosive grains plays the key role. Essentially this initiation mode can be defined as a quite fast case of DDT.

The experimental data were compared with the 2-phase, 2-velocity, 2-temperature simulations. Reasonable agreement was achieved when two processes enhancing the reaction rate were taken into account, i. e. fracturing of the explosive grains due to the compaction of the powder and intensification of the surface combustion because of the shear instability of the evaporating surface layer under high velocity gas flow. No agreement could be obtained if both processes were neglected, while crude integral resemblance was achieved at best when either of these mechanisms was considered separately.

The initial stage of the process in which the reaction rate should exceed the standard value by an order of magnitude in a primary non-compacted state is of special importance. In addition to the shear layer instability, other phenomena may take place at this phase. In particular, fracturing produced by the non-uniform aerodynamic stress and non-stationary fast burning supported by an intense heat flow from the gas phase should be considered.

2-22

РЕЗОНАНСНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ПУЗЫРЬКОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

И.И. Кочетков, А.В. Пинаев

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

E-mail: kii@hydro.nsc.ru, avpin@ngs.ru

В экспериментах по исследованию инициирования пузырьковой детонации (ПД) внешней ударной волной (УВ) было установлено, что возбуждение ПД происходит при амплитуде УВ выше критической величины и длине, превышающей область сжатия стационарной волны ПД. Исследования показали, что основную роль в формировании инициирующей УВ играет газовая «пробка» под диафрагмой, отделяющей секцию инициирования от рабочей части трубы, а не параметры газа в секции инициирования и ее длина. Основным недостатком инициирования внешней УВ состоит в том, что образование (отделение) волны ПД от волны сжатия обычно происходит на значительном расстоянии от места инициирования, достигающем нескольких метров.

Для сокращения расстояния формирования волны ПД было предложено инициировать детонацию непосредственно в газожидкостной среде электрическим взрывом проволоочки. Эксперименты, проведенные в диапазоне запасенной в конденсаторе энергии $W_0 = 10 \dots 10^3$ Дж, показали, что для возбуждения детонации достаточно небольшой величины W_0 , составляющей 12,5–20 Дж (в зависимости от концентрации пузырьков). Это примерно в 150–350 раз меньше энергии, содержащейся в газовой смеси при инициировании волной газовой детонации. При этом энергия, необходимая для теплового испарения используемых в эксперименте проволоочек, W_Q составляет 7,5–9 Дж. Ударная волна, сформированная вблизи проволоочки, по структуре подобна волне ПД, что отличает ее от протяженной УВ, создаваемой волной газовой детонации, и существенно ускоряет процесс формирования волны ПД. Профиль нестационарной волны ПД вблизи места взрыва подобен профилю давления стационарной волны ПД и по мере распространения слабо меняется. С увеличением W_0 , когда давление в инициирующей волне превышает давление в установившейся волне ПД, возрастают потери, затрудняющие ее формирование. Наиболее быстрое формирование осуществляется при запасенной энергии близкой к критической энергии W_Q . Таким образом, наблюдаемые свойства УВ от взрыва проволоочки и процесс формирования волны ПД позволяет говорить о резонансном инициировании волны ПД.

RESONANCE INITIATION OF BUBBLE DETONATION

I.I. Kochetkov, A.V. Pinaev

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS,
Novosibirsk, Russia

E-mail: kii@hydro.nsc.ru, avpin@ngs.ru

In experiments on study the initiation of bubble detonation (BD) by the external shock (SW) has been established

that the initiation of BD occurs when the amplitude of the SW above the critical value and length greater than the compression region of the stationary wave BD. Research showed that gas «bung» under the diaphragm, which separates the initiation section from the working section of the tube, performs the main role in the formation of the initiating shock wave, but not the gas parameters in the initiation section and its length. The main drawback of the initiation by the external SW is that formation (separation) BD wave from the compression wave occurs usually at a considerable distance from the point of initiation, reaching several meters.

To decrease the distance of forming BD wave were suggested to initiate a detonation directly in gas-liquid medium by electrical explosion of wire. Experiments, performed in the range of stored in the capacitor energy $W_0 = 10 \dots 10^3$ J, showed that it is enough small value of W_0 , which constitutes 12.5–20 J (depending on the concentration of bubbles), for excitation detonation. This is about 150–350 times smaller than the energy contained in the gas mixture at the initiation of gas detonation wave. The energy required for thermal evaporation used in the experiment wires, W_Q is 7.5–9 J. The shock wave, formed near the wire, is similar to BD wave by its structure, what distinguishes it from an extended SW, created by gas detonation wave and significantly accelerates the formation of BD wave. Pressure profile of nonsteady BD wave near the place of the explosion is similar to the stationary BD wave and with the spread changes only slightly. With the increase of W_0 , when the pressure in the initiation wave exceeds the pressure in the steady BD wave, increases losses, hampering its formation. The most rapid formation is carried out with the stored energy that closes to the critical energy W_Q . Thus, the observed properties of the SW from the wire explosion and the formation process of BD wave, allows saying about resonant initiation of BD wave.

2-23

ФОРМИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ ПРИ ВРАЩЕНИИ И ДЕФОРМАЦИЯХ КАМЕР СГОРАНИЯ

В.А. Левин, И.С. Мануйлович, В.В. Марков

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

E-mail: manuylovich@imec.msu.ru

Детонация во вращающихся камерах сгорания и в винтовых каналах

Для оценки возможности инициирования детонации при вращении рассмотрено течение горючей смеси внутри и вне вращающегося эллиптического цилиндра, заключенного в круговой цилиндр. Определены значения критических параметров, при которых формируется детонация. Представлена и проверена с помощью трехмерных нестационарных расчетов аналогия с инициированием детонации в потоке горючей смеси в канале специальной винтовой формы. Исследование проводится в рамках одностадийной кинетики горения стехиометрической пропановоздушной смеси численным методом, основанным на схеме С.К. Годунова

с подвижной расчетной сеткой. Получена детальная картина течения, позволяющая выявить особенности возникновения детонации при движении границ области, содержащей горючую смесь.

Рассмотрены задачи об иницировании детонации в стехиометрической пропановоздушной смеси внутри вращающегося кругового цилиндра с уступами параболической формы, присоединенными к его внутренней границе, а также внутри кругового цилиндра с вращающейся вокруг его оси звездообразной фигурой с лучами параболической формы. Определены критические условия возникновения детонации, связанные со скоростью вращения.

Детонация в квадратной камере изменяющегося по синусоидальному закону размера

Исследована задача о формировании детонации в квадратной области с изменяющейся по синусоидальному закону длиной стороны. Проведено 200 расчетов для различных пар значений амплитуды и периода колебаний. Результаты, полученные в серии расчетов, выявили различные режимы иницирования детонации, разделяемые критическими кривыми. Детонация может не возникать или возникает вдоль всего периметра, в углах или в центре через один или несколько периодов колебаний (в некоторых случаях ≥ 5).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 11-01-00068, 11-01-12043-Офи), Совета по грантам Президента РФ (НШ 8424.2010.1), Программ фундаментальных исследований Президиума РАН.

FORMATION OF DETONATION BY ROTATION AND DEFORMATIONS OF COMBUSTION CHAMBERS

V.A. Levin, I.S. Manuylovich, V.V. Markov

NIИ Mechanics Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: manuylovich@imec.msu.ru

Detonation in rotational combustion chambers and the helical channels

To assess the possibility of detonation initiation by rotating the flow of fuel-air mixture inside and outside of a rotating elliptical cylinder encased in a circular cylinder was considered. The values of critical parameters at which the detonation is formed were obtained. The analogous to the initiation of detonation in a combustible mixture in the channel of special helical shape was presented and tested using three-dimensional unsteady calculations. The study is fulfilled within the framework of single-stage kinetics of combustion of a stoichiometric propane-air mixture by the numerical method based on the Godunov's scheme with a moving computational grid. A detailed picture of the flow has been obtained, which allows identifying features of a detonation initiation by moving boundaries of the region containing the combustible mixture.

The problem of initiation of detonation in a stoichiometric propane-air mixture was considered both inside a rotating circular cylinder with a parabolic shape ledges, attached to its inner boundary and within a circular cylinder by rotation about its axis of a star figure with rays of a parabolic shape. The critical conditions of detonation formation associated with the rotational speed were defined.

Detonation in a square chamber of size varying by sinusoidal law

The problem of a detonation formation in a square area of the side length varying accordingly to sinusoidal law has been studied. 200 calculations for different pairs of values of the amplitude and period of oscillations. The results obtained in a series of calculations have revealed different modes of detonation initiation, shares by critical curves. The detonation may not occur in a square or occurs along its perimeter, in its corners or in its center through one or more periods of oscillation (in some cases, ≥ 5).

This work was supported by RFBR (grants № № 11-01-00068, 11-01-12043-ofi), by the Council on Grants of the President of the Russian Federation (NSh 8424.2010.1) and by the Programs of the Presidium of RAS.

2-24

БЫСТРОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ ПОРОШКОВЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Л.А. Лукьянчиков, А.П. Ершов, Э.Р. Прууэл,
К.А. Тен, А.О. Кашкаров

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

E-mail: luk@hydro.nsc.ru

Приведены результаты экспериментального и теоретических исследований так называемого быстрого иницирования малоплотных порошковых конденсированных взрывчатых веществ. С помощью синхротронного излучения получены профили плотности на оси заряда насыпного тэна при его иницировании ударной волной известной амплитуды из воздуха. По этим данным методом динамической томографии восстановлены массовая скорость течения конденсированной фазы и давление в области течения. Оказалось, что определенное давление недостаточно для того, чтобы обеспечить очаги реакции за счет сжатия ВВ. Поэтому его рост может происходить только за счет горения, вызванного фильтрацией горячих газов из области, возникшей на границе заряда при отражении ударной волны. Проведены численные расчеты, которые показали, что хорошо изученные классические формы горения обеспечивают в этих условиях на порядок более низкую скорость горения и не могут обеспечить зарегистрированный в эксперименте уровень давления и адекватно описать полученные экспериментальные результаты. Необходимую скорость регрессии конденсированной фазы может обеспечить абляционное горение, полученное при исследовании поджигания отдельных частиц тэна газовой детонацией. При этом показано, что за время задержки воспламенения на поверхности частицы возникает расплавленный слой толщиной порядка 1 мкм, который в скоростном потоке разрушается волновыми возмущениями. В результате происходит быстрый выброс частиц расплава в область горячих продуктов, что ведет к увеличению интегральной скорости сжигания более чем на порядок.

FAST INITIATION OF SECONDARY POWDER EXPLOSIVES

L.A. Lukyanchikov, A.P. Ershov, E.R. Prueel,
K.A. Ten, A.O. Kashkarov

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

E-mail: luk@hydro.nsc.ru

Results of an experimental and theoretical study of the so-called fast initiation of low-density condensed powder explosives are reported.

With the help of synchrotron radiation, the axial profiles of density in bulk ten charges initiated by an air shock wave of certain amplitude were measured. The dynamic tomography method was then used to deduce from the gained data the mass flow velocity of the condensed phase and the pressure in the region occupied by the flow.

Measured pressure was found to be insufficiently high for initiation of HE compression induced reaction centers. That is why the rise of pressure could be only due to the combustion caused by filtration of hot gases from the region formed on the charge boundary upon shock-wave reflection.

The performed calculations showed that, under such conditions, the well-studied classical combustion processes were capable of ensuring only a burning velocity one order of magnitude lower compared to the experimentally registered value; such processes were therefore incapable of providing the experimentally measured level of pressure, and they therefore fail to offer an adequate description to the experimental data. The required rate of condensed-phase regression could be ensured by the ablation combustion observed while studying the gas-detonation-induced firing of individual ten particles. It was shown that during the ignition delay time a molten layer about one micrometer thick formed on a particle surface; this layer subsequently suffered disintegration in the high-speed flow under the action of wave disturbances. As a result, rapid ejection of melt particles into the region occupied by hot products occurred, leading to a significantly (more than ten-fold) enhanced integral rate of combustion.

2-25

ФОРМИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОТОКАХ ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ ЗА СЧЕТ ЕЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ТВЕРДЫМИ СТЕНКАМИ

В.А. Левин, И.С. Мануйлович, В.В. Марков

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

E-mail: manuylovich@imec.msu.ru

Галопирующая слоистая детонация

Рассматривается задача об иницировании детонации в сверхзвуковом потоке и неподвижной стехиометрической пропановоздушной смеси, заполняющей частично или полностью поперечное сечение плоского или осесимметричного канала. В потоке иницирование происходит за счет уступа или стенки, полностью пере-

крывающей канал. Исследование проводится в рамках одностадийной кинетики горения численным методом, основанным на схеме С.К. Годунова. Новый режим распространения детонации, обнаруженный авторами ранее в плоском канале и названный режимом галопирующей слоистой детонации, получен в осесимметричном канале со стержнем в центре, имеющем сферическое скругление на конце. В канал, как и ранее, поступал воздушный, пропановоздушный или комбинированный сверхзвуковой поток. Для получения эффекта в осесимметричном случае необходимо оставить неизменным отношение площадей входного и выходного сечений. Определены критические условия возникновения детонации, связанные со скоростью набегающего потока и с геометрическими параметрами канала.

Детонация в изогнутом канале

Рассмотрена задача об иницировании детонации в сверхзвуковом потоке пропановоздушной смеси в плоском канале постоянного сечения с изгибами за счет взаимодействия потока со стенками канала. Получены значения критической скорости потока и критического угла поворота канала, разделяющие различные режимы течения. Горючая смесь подается в канал после установления стационарного воздушного потока. Представлены режимы течения без детонации, с детонацией, выходящей через входное сечение канала и режим со стационарной волной детонации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 11-01-00068, 11-01-12043-Офи), Совета по грантам Президента РФ (НШ 8424.2010.1), Программ фундаментальных исследований Президиума РАН.

FORMATION OF A DETONATION IN SUPERSONIC FLOW OF COMBUSTIBLE MIXTURE DUE TO ITS INTERACTION WITH SOLID WALLS

V.A. Levin, I.S. Manuylovich, V.V. Markov

NII Mechanics Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: manuylovich@imec.msu.ru

Galloping layered detonation

The paper considers the problem of initiation of detonation in supersonic flow and in an immobile stoichiometric propane-air mixture, filling in part or in whole cross-section of the plane or axisymmetric channel. The initiation in a flow occurs due to a ledge or wall which completely closes up the channel. The study is fulfilled within the framework of a single-stage kinetics of combustion of a stoichiometric propane-air mixture by the numerical method based on the Godunov's scheme. The new regime of detonation, which has been previously found by the authors in a flat channel and named by layered regime of galloping detonation, has been obtained now in the axisymmetric channel with the rod in the center, which has a spherical rounding at the end. It was supposed that as previously the supersonic flow of an air, of a propane-air mixture or of their combination flows in channel. To obtain the effect in axisymmetric case like that in plane channel the ration of input section area to the output one must be the

same in both cases. The critical conditions of detonation initiation associated with the incoming flow velocity and geometric parameters of the channel were obtained.

Detonation in curved channel

The problem of initiation of detonation in supersonic flow of propane-air mixture in the complex plane channel of constant cross-section with curves due to the flow interaction with the walls has been considered. The values of the critical flow velocity and the critical angle of the channel separating the various flow regimes were obtained. It was supposed the fuel-air mixture starts to inflow in the channel just after the establishment of steady air flow. The flow regimes without a detonation, with a detonation that goes through the inlet section of the channel and the mode of the stationary detonation wave were observed.

This work was supported by RFBR (grants № № 11-01-00068, 11-01-12043-ofi), by the Council on Grants of the President of the Russian Federation (NSh 8424.2010.1) and by the Programs of the Presidium of RAS.

2-26

ВОЗБУЖДЕНИЕ ГОРЕНИЯ АММИАЧНО-СЕЛИТРЕННЫХ СОСТАВОВ В ПОЛЕ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

Р.М. Вахидов, Д.А. Хадиева, В.Я. Базотов

Казанский национальный исследовательский
технологический университет, Казань, Россия

E-mail: ttxb@mail.ru

Экспериментально выявлен эффект инициирования горения в волноводе или резонаторе частично заполненном аммиачно-селитренными составами. Горение происходит в тонких слоях с периодом индукции 3–5 секунд при атмосферном давлении без катализаторов, что принципиально невозможно осуществить без СВЧ-излучения, при прерывании излучения горение прекращается, а при повторном включении магнетрона, горение возобновляется. Таким образом открываются новые возможности создания пульсирующего горения аммиачно-селитренных составов.

Выявленный эффект был успешно использован при разрушении бетонных блоков без измельчения. Анализ продуктов разложения указывает на то, что механизм разложения в поле СВЧ-излучения аналогичен механизму термического разложения.

EXCITATION OF BURNING A NITRATE OF AMMONIUM STRUCTURES IN THE FIELD OF THE MICROWAVE OVEN-RADIATIONS

R.M. Wahidov, D.A. Hadieva, V.J. Bazotov

Kazan National Research Technological University,
Kazan, Russia

E-mail: ttxb@mail.ru

During experiments, we have revealed the effect of initiation of burning in a wave guide or the resonator partially

filled with the ammonium nitrate compound. Burning occurs in thin layers at the induction period of 3–5 seconds, at the atmospheric pressure without catalysts. It is essentially impossible to carry out this process without microwave radiation. When the radiation is interrupted, the burning stops and renews at the repeated turning on of a magnetron. This discovery opens up new possibilities to create a pulsing burning of ammonium nitrate compounds.

The revealed effect has been successfully used to destruct concrete blocks without crushing. The analysis of products of decomposition indicates that the mechanism of decomposition in the field of microwave radiation is similar/analogous to the mechanism of thermal decomposition.

2-27

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОСТИ НИЗКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ВВ НА ПРОЦЕСС ПЕРЕХОДА УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ДЕТОНАЦИОННУЮ

Е.Б. Смирнов, А.Н. Аверин, Б.Г. Лобойко,
О.В. Костицын, Ю.А. Беленовский, А.В. Лебедев,
В.Н. Щербаков, К.В. Еганов, В.М. Волков,
К.М. Просвирнин, А.Н. Киселёв, В.В. Козель

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

В работе представлены результаты экспериментального исследования перехода ударной волны в детонационную в низкочувствительном ВВ различной начальной пористости с регистрацией при помощи пьезорезистивной и радиоинтерферометрической методик. Нагружение исследуемого ВВ плоскими ударными волнами различной интенсивности осуществлялось при помощи взрывного генератора. В экспериментах при помощи пьезорезистивных датчиков регистрировались параметры ударной волны, входящей в заряд из исследуемого ВВ, а также параметры ударной/детонационной волны, выходящей из него. При помощи радиоинтерферометра в экспериментах регистрировалась $x-t$ диаграмма процесса распространения ударной волны и переход ее в детонационную волну.

В ходе экспериментальных исследований показано, что повышение пористости приводит к возрастанию восприимчивости ВВ к ударно-волновому импульсу. При этом различия в процессе перехода ударной волны в детонационную проявляются в большей степени при низких уровнях давления инициирующей ударной волны. В области давлений, близких к давлению Чепмена-Жуге для исследуемого ВВ, процесс перехода ударной волны в детонационную практически не зависит от начальной пористости ВВ. При этом глубина возникновения детонации для исследуемого ВВ различной начальной пористости при давлении инициирующей волны ~26 ГПа стремится к конечному значению ~1,2 мм, близкому к величине протяженности зоны химической реакции данного ВВ.

INFLUENCE OF LOW-SENSITIVITY HE POROSITY ON THE SHOCK-TO-DETONATION WAVE TRANSITION

E.B. Smirnov, A.N. Averin, B.G. Loboiko,
O.V. Kostitsyn, Yu.A. Belenovsky, A.V. Lebedev,
V.N. Tscherbakov, K.V. Eganov, V.M. Volkov,
K.M. Prosvirnin, A.N. Kiselev, V.V. Koval

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

Shock-to-detonation wave transition in a low-sensitivity HE having different initial porosity was experimentally investigated and results of this investigation are presented. Piezoresistive and radiointerferometric techniques were used for registration. The test HE was loaded by the plane different-intensity shock waves with the help of the explosive generator. Piezoresistive gauges registered parameters of the shock wave entering the test HE charge, as well as parameters of the shock/detonation wave leaving this charge. In experiments, the interferometer was used to register the $x-t$ diagram of the shock wave propagation and shock-to-detonation wave transition.

Experimental studies demonstrated that porosity growth leads to increased susceptibility of HE to a shock-wave pulse. Differences in the process of shock-to-detonation wave transition reveal themselves under low pressures of the initiating shock wave. In the region of pressures being close to the Chapman-Jouget pressure for the test HE, the process of shock-to-detonation wave transition is practically independent of the initial HE porosity. The depth of detonation onset in the test HE having different initial porosity with the ~ 26 GPa pressure of the initiating wave tends to the ~ 1.2 mm final value that is close to the length of the chemical reaction zone for this HE.

В экспериментах использовался генератор импульсных напряжений Аркадьева-Маркса. В разрядной цепи измеряли: напряжение с помощью омического делителя и силу тока – шунтом коаксиальной конструкции. Исследовались ЭПМ, состоящие из уретанового сополимера, пластифицированного нитроэфирами, и порошка алюминия со средним диаметром (d) 5 или 12 мкм. Толщина образцов 3–5,6 мм и близка к критическому диаметру детонации. Процесс отверждения проведен в режиме, исключающем седиментацию наполнителя.

Как и следовало ожидать, наличие проводящих включений вызывает падение электрической прочности, и пробой ЭПМ происходит при напряженности поля, близкой к пробую воздуха в неоднородном поле. При одинаковой объемной доле Al-порошка электрическая прочность меньше при наполнении ЭПМ порошком большего диаметра. После прохождения пробоя образцы испытывали сильные механические разрушения. Окружающая среда (вода или воздух) не сказывается заметно на особенностях протекающих процессов. Так, в ненаполненном ЭПМ образовывалась одна сквозная трещина. В образце, наполненном порошком с $d \sim 5$ мкм, формировались радиально ориентированные трещины. Образцы, наполненные порошком с $d \sim 12$ мкм, после пробоя вспучивались. До максимальной мощности в разряде 9 МВт воспламенение или взрыв образцов отсутствовали. Полученные закономерности могут быть объяснены особенностями процесса энерговыделения в реакциях разложения ЭПМ, инициированных импульсным пробоем.

Литература

1. Садовничий Д.Н., Милёхин Ю.М. и др. // Физика горения и взрыва. 2010. № 4. С. 107.

MICROSECOND ELECTRICAL BREAKDOWN INFLUENCE ON POLYMERIC ENERGY-INTENSIVE SYSTEMS FILLED WITH DISPERSED ALUMINUM

D.N. Sadovnichii¹, Yu.M. Milekhin¹, S.A. Lopatkin²,
D.V. Zhgun², V.F. Vazhov², E.A. Butenko¹, S.A. Malinin¹

¹ Federal Center of Dual-Use Technologies «Soyuz»,
Dzerzhinsky, Russia

² Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

E-mail: fcdt@monnet.ru, tpu@tpu.ru

Submicrosecond electric breakdown passing through the volume of energy-intensive polymeric materials (EPM) leads to its strong mechanical destruction which is much greater than observed in non energy-intensive analogues [1]. The purpose of the present work is experimental study of impulse electrical breakdown features with a pulse of 1–26 microseconds, developing in the volume of EPM with up to 70% mass content of aluminum powder.

Arcad'ev-Marks pulsed voltage generator was used during the experiments. In the discharge circuit the following features were measured: voltage with the help of resistive divider, and amperage – by the coaxial shunt. EPM consisting of urethane copolymer plasticized with nitroester and aluminum powder with average diameter (d) of 5 or 12 micrometers were investigated. The sample thickness was 3–5,6 mm, which is close to detonation critical diameter.

2-28

ВОЗДЕЙСТВИЕ МИКРОСЕКУНДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ НА ПОЛИМЕРНЫЕ ЭНЕРГОЕМКИЕ СИСТЕМЫ, НАПОЛНЕННЫЕ ДИСПЕРСНЫМ АЛЮМИНИЕМ

Д.Н. Садовничий¹, Ю.М. Милёхин¹,
С.А. Лопаткин², Д.В. Жгун², В.Ф. Важов²,
Е.А. Бутенко¹, С.А. Малинин¹

¹ФГУП Федеральный центр двойных технологий «Союз»,
Дзержинский, Россия

²ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский Томский
политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: fcdt@monnet.ru; tpu@tpu.ru

Субмикросекундный электрический пробой, проходящий сквозь объем энергоемких полимерных материалов (ЭПМ), вызывает их сильное механическое разрушение, значительно большее, чем наблюдается в неэнергоемких аналогах [1]. Целью настоящей работы было экспериментальное изучение особенностей импульсного электрического пробоя с длительностью фронта 1–26 мкс, развиваемого в объеме ЭПМ, содержащих до 70% масс. алюминиевого порошка.

The curing process was held under the conditions which exclude sedimentation of the filler.

As expected, presence of conductive particles causes a fall of electric strength, and electrical breakdown of EPM occurs at the field intensity, which is close to air breakdown in nonhomogeneous field. At the equal volume fraction of Al-powder, the electric strength is less for the EPM filled with powder of greater diameter. After the breakdown samples underwent strong mechanical destruction. Environment (water or air) does not noticeably affect the features of ongoing processes. Thus in an unfilled EPM one through crack was formed. In the sample filled with powder of $d \sim 5$ micrometers a radial-oriented crack was formed. Samples filled with the powder of $d \sim 12$ micrometers were swollen after the breakdown. Up to a maximum discharge power of 9 megawatt there was no samples ignition or explosion. Obtained results may be explained by the features of energy-release in decomposition reactions of EPM, initiated by impulse breakdown.

Reference

1. Sadovnichii D.N., Milekhin Yu.M. et al. // Combustion, Explosions and Shock Waves. 2010. N 4. P. 464.

2-29

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ВЗРЫВА В ПОТОКЕ ПСЕВДОЖИДКОГО ТОПЛИВА

А.Г. Егоров, А.С. Тизилов

Тольяттинский государственный университет,
Тольятти, Россия
E-mail: eag@tltsu.ru

Закономерности теплового взрыва для одиночных частиц металлов и их совокупностей отличаются, поскольку в совокупностях имеет место тепловое взаимодействие между частицами.

Известно, что зажигание горючей газовой смеси искровым разрядом сводится к нагреванию некоторого сферического объема этой смеси, радиус которого должен превышать характерную ширину фронта ламинарного пламени b_n . Формулу $R_{кр} \geq 3,7b_n$, предложенную Я.Б. Зельдовичем, можно рассматривать только как качественную связь между мощностью источника воспламенения и параметрами горючей смеси. Полученное значение коэффициента пропорциональности указывает лишь на порядок этой величины ввиду допущений, принятых при выводе формулы. Поэтому окончательная оценка справедливости формулы может быть сделана только на основании экспериментальных данных.

Воспламенение аэрозвесей частиц алюминия искровым разрядом, сводится к нагреванию сферического объема, радиус которого должен превышать характерную ширину пламени b_n , составляющую $2 \cdot 10^{-3}$ м. Тогда, принимая полученное в эксперименте значение $R_{кр} = 5 \cdot 10^{-3}$ м, и следуя тепловой теории Я.Б. Зельдовича, условие обеспечения воспламенения турбулентного потока аэрозвесей частиц алюминия марки АСД-1 будет определяться выражением $R_{кр} \geq 2,5b_n$.

Установлено, что в отличие от однородной смеси в гетерогенной алюминиево-воздушной смеси воздей-

ствии интенсивности турбулентности на развитие пламени начального очага имеет свои особенности. В течение первой фазы ($\tau \approx 9 \cdot 10^{-3}$ с) темпы роста очага при установке решеток выше, чем при трубной турбулентности. Это связано с увеличением интенсивности тепломассообменных процессов, протекающих на поверхности частиц, приводящих к увеличению скорости химических реакций. Первая фаза, когда скорость выделения тепла в процессе химической реакции превосходит скорость теплоотвода в окружающую среду, составляет $\sim 1/3$ от общего времени развития очага. Во второй фазе ($9 \cdot 10^{-3} \dots 27 \cdot 10^{-3}$ с) темпы роста очага с увеличением интенсивности турбулентности (с установкой решетки) становятся ниже, чем при трубной турбулентности, что обусловлено усилением теплоотдачи от начального очага разогрева.

Полученные результаты можно использовать для уточнения существующих математических моделей воспламенения аэрозвесей частиц алюминия в воздушном потоке, а также при организации процесса зажигания порошкообразного алюминия, в камерах сгорания перспективных двигательных установок.

INVESTIGATION OF THERMAL EXPLOSION IN A PSEUDOLIQUID FUEL

A.G. Egorov, A.S. Tizilov

Togliatti State University, Togliatti, Russia
E-mail: eag@tltsu.ru

The laws of thermal explosion for single metal particles and their clouds differ because in clouds there is thermal interaction between particles.

Ignition of a combustible gas mixture by a spark discharge reduces to heating a certain spherical volume of this mixture whose radius R_{cr} should exceed the characteristic width of the laminar flame front b_n . The formula $R_{cr} \geq 3,7b_n$ proposed by Zel'dovich can be treated only as a qualitative relationship between the power of the ignition source and the parameters of the combustible mixture. The obtained value of the proportionality coefficient indicates only the order of magnitude of this quantity in view of the assumptions made in the derivation of the formula. Therefore, the final estimation of the validity of the formula can be made only using experimental data.

Based on the Zel'dovich thermal theory, ignition of the aluminum-air mixture by a spark discharge reduces to heating a spherical volume whose radius should exceed the characteristic flame width b_n (for aluminum particles suspended in air, $b_n = 2 \cdot 10^{-3}$ m). Then, R_{cr} is set equal to an experimental value of $R_{cr} = 5 \cdot 10^{-3}$ m, the ignition condition for ASD-1 aluminum particles in air in the recirculation zone is given by the expression $R_{cr} \geq 2,5b_n$.

During the first phase ($\tau \approx 9 \cdot 10^{-3}$ sec), the rate of expansion of the hot spot with the placement of the grid is higher than in the case of tubular turbulence. This is due to an increase in the rate of heat and mass transfer processes on the surface of the particles, which leads to an increase in the chemical reaction rate. The duration of the first phase, where the heat release rate during the chemical reaction exceeds the rate of heat transfer to the ambient medium, is $\approx 1/3$ of the total time of development of the hot spot. In the

second phase ($9 \cdot 10^{-3} \dots 27 \cdot 10^{-3}$ sec), the rate of expansion of the hot spot are lower under conditions of increasing turbulence than under tubular turbulence, which is due to the enhancement of the heat transfer from the initial hot spot.

The results can be used to refine existing mathematical models for ignition of aluminum particles in air flow, and implement ignition of aluminum powders in combustion chambers of advanced propulsion devices.

2-30

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ
О НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССАХ
В СОСУДЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ
С ТЕПЛОМ ИСТОЧНИКОМ
ТИПА «БЕГУЩАЯ ТЕПЛОВАЯ ВОЛНА»
ПРИ ВЫХОДЕ РАСПЛАВА
ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ ИЗ ИСТОЧНИКА
В ВОДНУЮ СРЕДУ**

В.П. Кобяков

Федеральное научное бюджетное учреждение
Институт структурной макрокинетики и проблем
материаловедения РАН, Черноголовка, Россия
E-mail: koba@ism.ac.ru

Рассмотрено функционирование герметичного импульсного теплового источника типа «бегущая тепловая волна», размещенного в стенде высокого давления с рабочей камерой, заполненной водой. В воздушной подушке над водой в рабочей камере давление 7,5 МПа, либо атмосферное. В герметичной полости теплового источника помещена высокоэнергетическая, не детонирующая композиция, фронтальное горение которой инициируется искро-дуговым разрядом. Горение композиции происходит со скоростью около 1 м/с, при этом удельное тепловыделение составляет до 5 МДж/кг. Выполнено экспериментальное исследование неравновесных теплофизических и гидродинамических процессов, протекающих в полости стенда после включения в работу теплового источника. Основное внимание обращено на эффекты, сопутствующие выходу высокотемпературного расплава продуктов горения тепловыделяющей смеси в окружающую водную среду. Возникают миллисекундные импульсы давления на стенку рабочей камеры на уровне от 2,7–3,4 ГПа при давлении в воздушной подушке 7,5 до 11,3–18,1 МПа при атмосферном давлении. Наблюдается диспергирование продуктов горения до субмикронных размеров при их контакте с водной средой. В «воздушной» подушке обнаруживается до 70–90% водорода. Наблюдаемые эффекты объясняются с позиций возникновения в системе локального парового взрыва.

**PHYSICAL REPRESENTATIONS
OF THE NONSTATIONARY PROCESSES IN
TO THE HIGH-PRESSURE VESSEL
WITH THE HEAT SOURCE
OF A «RUNNING HEAT WAVE» TYPE INSIDE.
OUTLET OF THE COMBUSTION PRODUCT MELT
INTO THE WATER SURROUNDINGS**

V.P. Kobiakov

Federal Science Budgetary Foundation Institute of Structural
Macrokinetics and Materials Science
Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia

E-mail: koba@ism.ac.ru

The functioning of the pulse heat source «running heat wave» type in the high pressure arrangement with the operating volume filling of the water was investigated. In the air space over the water level we establish the pressure of 7,5 MPa or 0,1 MPa. The high energetic non-detonate mixt was located into the heat source cavity preserved from water penetration. The frontal combustion of that mixt was initiated with aid of the spark-arc discharge. The linear combustion velocity was approximately 1 m/c and the specific heat evolving was up to 5 MJ/kg. The experimental investigation of the non-stationary thermo physical and hydro dynamical processes into the high pressure vessel after the start of heat source was perform. The main attention was attached to the effects which accompanied of the outlet of high temperature melt of the combustion products into the water surroundings. The millisecond pulses of the pressure of 2,7–3,4 GPa and 11,3–18,1 GPa on the vessel walls was occurred with pressure in the air space of 7,5 MPa and 0,1 MPa respectively. There was combustion product dispersal up to the submicron size when these products has the contact with water. Up to the 70–90% hydrogen was discovered into the air space at that time. These effects we explain as result of the appearing in the system of the local stem explosion.

2-31

**КРИТЕРИЙ
УДАРНО-ВОЛНОВОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ
КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ**

Ю.В. Петров¹, Г.Г. Савенков²,
В.А. Морозов¹, В.А. Брагин²

¹Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

²Научно-исследовательский институт «Поиск»,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: sav-georgij@yandex.ru

Предлагается новый критерий инициирования детонации твердых взрывчатых веществ, основанный на хорошо себя зарекомендовавшем при описании динамических переходных процессов во многих разделах механики сплошной среды, понятии «инкубационного времени» процесса. Предлагаемый критерий в общем виде формулируется следующим образом

$$\int_{t-t_{inc}}^t \left(\frac{p(s)}{p_{cr}} \right)^\alpha ds \leq t_{inc}, \quad (1)$$

где $p(s)$ – импульсное давление, прикладываемое к инициируемому ВВ; t_{inc} – инкубационное время развития процесса прямой детонации; p_{cr} – минимальное критическое давление инициирования заряда при фиксированных плотности и среднем размере частиц взрывчатого вещества; t и s – глобальное и локальное время; α – константа. Инкубационное время процесса детонации t_{inc} в данном случае является параметром, определяющим только свойства ВВ, и не зависящим от условий ударно-волнового нагружения заряда. При таком подходе к определению инкубационного времени в качестве этого параметра можно принять минимальное акустическое время $t_{ac\min}$ (время движения боковой волны разрежения к центральной части заряда), равное времени развития химической реакции t_{ch} , которое находится по соотношению

$$t_{inc} = t_{ch} = t_{ac\min} = \frac{d_{cr}}{2c}, \quad (2)$$

здесь d_{cr} – критический диаметр инициируемого заряда ВВ; c – скорость звука в ВВ. Применение предлагаемого критерия рассматривается для расчетов $p_m - t_{ign}$ зависимостей, которые экспериментально определены для многих индивидуальных взрывчатых веществ и составов, и являются важными условиями сравнительной ударно-волновой чувствительности. Сравнение экспериментальных и расчетных параметров указанных зависимостей для ряда взрывчатых веществ, определенных с помощью предложенного критерия, показали их высокую сходимость.

NEW CRITERION TO PREDICT IMPACT INITIATION OF CONDENSED EXPLOSIVE MEDIA

Y.V. Petrov¹, G.G. Savenkov²,
V.A. Morozov¹, V.A. Bragin²

¹St.-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

²Research Institute «Poisk», Saint-Petersburg, Russia

E-mail: sav-georgij@yandex.ru

New criterion to predict detonation initiation conditions based on an introduced concept of incubation time of the detonation process is proposed. Criteria based on the concept of incubation time of a transient process are widely and successfully used to predict critical conditions for different dynamic state transformations. Among such models one can mention the criterion for brittle dynamic fracture, the criterion for dynamic yielding of metals, the criterion for phase transitions caused by high rate energy input, the criterion for cavitation in liquids and the criterion for electrical breakdown in insulators. As a critical condition for detonation initiation a criterion using a new concept of incubation time of a transient detonation process is proposed. The corresponding criterion can be written in the form:

$$\int_{t-t_{inc}}^t \left(\frac{p(s)}{p_{cr}} \right)^\alpha ds \leq t_{inc}, \quad (1)$$

where $p(s)$ is a pulse pressure, applied to the explosive media, t_{inc} is the incubation time of the detonation process (physical nature of τ and possible ways of it's experimental evaluation will be discussed in the paper), being experimentally measured parameter characterising detonating media p_{cr} – is a critical (minimal) value of pressure that is able to initiate detonation of the media for fixed density and mean grain size of explosive media; t and s – global and local time; α is a parameter responsible for the sensitivity to the level of pressure. Incubation time of the detonation process t_{inc} is a characteristics determining a property of explosive media such as a sensitivity to the rate of energy input. We take it as a time $t_{ac\min}$ coincident to the time of development of chemical reaction t_{ch} , which can be found from the relation

$$t_{inc} = t_{ch} = t_{ac\min} = \frac{d_{cr}}{2c}, \quad (2)$$

where d_{cr} – critical diameter of charge sample; c – acoustic wave speed in explosive media. This approach allow us to calculate $p_m - t_{ign}$ dependencies, which are found experimentally for many media. It is shown that new criterion is able to give a correct description of known experiments on direct detonation initiation in condensed media. Utilising the introduced criterion it is possible to predict critical conditions for initiation of the detonation process in different media on the basis of experimentally measurable parameters being properties of corresponding media.

2-32

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ РАЗЛИЧНОЙ ДИСПЕРСНОСТИ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ БРИЗАНТНЫХ ВВ К ВЫСКОВОЛЬТНОМУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ РАЗРЯДУ

В.А. Брагин¹, И.А. Оськин¹, Г.Г. Савенков¹,
С.А. Душенок², В.Г. Куликов², Г.В. Семашкин²

¹Научно-исследовательский институт «Поиск»,
Санкт-Петербург, Россия

²Специальное конструкторско-технологическое бюро
«Технолог», Санкт-Петербург, Россия

E-mail: sav-georgij@yandex.ru

Рассматривается возбуждение детонации в прессованных бризантных взрывчатых веществах (PETN, FOX-7) с помощью высоковольтного электрического разряда. Методами теории протекания (перколяции) показано, что данный вид инициирования существенно упрощается при добавлении в ВВ порошковых металлических (проводящих) добавок с высокой удельной теплоемкостью и теплопроводностью. В рамках модели для перколяционного порога электрической проводимости

($z \sim 0,2$) получено соотношение для определения среднего размера d проводящих добавок

$$d \approx 0,3(d_{cr}a_c/5c_c)^{0,5},$$

где d_{cr} – критический диаметр ВВ; a_c – коэффициент температуропроводности материала проводящего порошка; c_c – его удельная теплоемкость.

Поскольку перколяционный порог z есть геометрическая характеристика системы, то из соотношений между массовой (y) и геометрической (z) долями порошка следует следующее уравнение

$$z = \frac{y}{(1-y)(\rho_n/\rho_e) + y},$$

где ρ_n, ρ_e – соответствующие плотности (которые не равны плотностям исходных монокристаллов материала) металлического порошка и взрывчатого вещества в заряде. Для того чтобы $z = y$, необходимо выполнение условия $\rho_n = \rho_e$. Для $z = 0,2$ это условие выполняется при $\rho_{0n}/\rho_{0e} \approx 5$ (индекс «0» относится к монокристаллам). Поскольку исходная плотность монокристаллов (ρ_{0e}) взрывчатых веществ, как правило (по крайней мере, используемых в настоящей работе), меньше 2 г/см^3 , то наилучшим материалом добавки является медь. Расчетом найдено, что размер частиц медного порошка $d \approx 60...70 \text{ нм}$.

Для проверки полученного соотношения и числового результата в работе в качестве проводящей добавки были использованы порошки меди марки М1 с размерами частиц $50-70 \text{ нм}$ и $\sim 50 \text{ мкм}$. Испытания проводились на двух типах ВВ: малочувствительном высокодисперсном взрывчатом веществе FOX-7 с размерами частиц $1-3 \text{ мкм}$ и высокочувствительном ВВ – PETN с размерами частиц $20-40 \text{ мкм}$. Для сравнения были проведены также испытания зарядов, состоящих из: смеси FOX-7 и нанопорошка алюминия с размерами частиц $50-70 \text{ нм}$ и смеси PETN с алюминием той же дисперсности, а также зарядов из FOX-7 и PETN без примесей.

Полученные результаты испытаний по инициированию зарядов из FOX-7 с массовой концентрацией частиц меди 20% электрическим разрядом с напряжением 9 и 7,5 кВ подтвердили расчетные результаты. Заряды детонировали только в случае наноразмерных добавок меди. Для зарядов с микронными размерами добавок наблюдалось только быстрое горение. Заряды из смеси PETN и 20% массовой долей наноразмерных частиц меди детонировали при импульсе напряжения 3 кВ, а в случае микронных размеров медного порошка наблюдалось только быстрое горение даже импульсе напряжения 9 кВ.

В зарядах из смесей ВВ с алюминием удалось достичь только быстрого горения при импульсе напряжения 9 кВ. В случае зарядов без примесей ни детонации ни быстрого горения достичь не удалось.

Отрицательные результаты по инициированию детонации в зарядах с наноалюминием, очевидно, связаны с образованием окисной пленки Al_2O_3 на поверхности наночастиц, толщина которой может быть соизмерима с размером наночастиц и на разрушение которой требуется значительно бо́льшая дополнительная энергия, чем на разрушение пленки CuO или CuO_2 .

INFLUENCE OF VARIOUS DISPERSION METAL POWDERS ADMIXTURES ON HIGH EXPLOSIVES SENSITIVITY TO HIGHT-VOLTAGE ELECTRIC DISCHARG

V.A. Bragin¹, I.A. Oskin¹, G.G. Savenkov¹,
S.A. Dushenok², V.G. Kulikov², G.V. Semashkin²

¹«Poisk» Research Institute, Saint-Petersburg, Russia
²«Tekhnolog» Special Design Bureau, Saint-Petersburg, Russia
E-mail: sav-georgij@yandex.ru

Detonation actuation in pressed high explosives (PETN, FOX-7) by high-voltage discharge is investigated.

It is proved by the means of percolation theoretic methods that such kind of detonation is getting easier if one adds into explosives power metal conductive admixtures having high specific heat and thermal capacity.

According to the percolation threshold of electric conductivity model ($z \sim 0,2$) the formula for definition d – average magnitude conductive admixtures: was obtained:

$$d \approx 0,3(d_{cr}a_c/5c_c)^{0,5},$$

where d_{cr} – critical diameter of explosives; a_c – thermal conductivity of material of conductive power; c_c – specific thermal capacity. As z – percolation threshold is the geometrical characteristic of a system and according the interpretations for geometrical and weight metallic power parts the following equation is defined:

$$z = \frac{y}{(1-y)(\rho_n/\rho_e) + y},$$

where ρ_n, ρ_e – corresponding density of metal powder and explosives in a charge (that aren't equal to the density of initial material's mono crystal). It is necessary that $\rho_n = \rho_e$ in order the equality $z = y$ is satisfied. For $z = 0,2$ it is necessary $\rho_{0n}/\rho_{0e} \approx 5$ (zero index relates to mono crystal). As the initial density of explosives' mono crystals (at least for that which were used in this work) (ρ_{0e}) is 2 г/см^3 less copper is the best material as admixture. The size of the copper particles was calculated and equals: $d \approx 60...70 \text{ нм}$. To corroborate the expressions and numerical results in the work model M1 copper powders and $50-70 \text{ nanometers}$ and $\sim 50 \text{ microns}$ sizes of particles have been used as a conductive admixture. Two types of explosives were used. One of them is the low – sensitive superfine FOX-7, $1-3 \text{ microns}$ size of particles and the high-sensitive PETN, $20-40 \text{ microns}$ size of particles is the other one. For comparisons they were tested the charges that consist of FOX-7 admixture jointly with aluminum nano powder, $50-70 \text{ nm}$ size of particles and of PETN admixture jointly with aluminum of the same dispersion, and the charges that consist of FOX-7 and PETN without admixtures. The results of the tests of the initiation of FOX-7 charges with 20% mass concentration of particles of copper by 9 and 7,5 kV and discharge confirmed the expected results. The charges detonated only in the case when particles of nano dimension size were added. If the particles of micron size had added in the charge just fast burn was observed only. The charges consisted of PETN admixture of 20% mass fraction nano dimension size particles of copper detonated if the voltage impulse was 2 kV. In the case when the particles of the copper powder had micron size and at 9 kV voltage impulse fast burn was observed only.

In charges consisting of explosives and aluminum admixtures just fast burn was obtained only. In the case when the charges didn't consist any admixture there was no detonation or born. The reason of negative results of initiation of detonation in charges jointly with nano aluminum is obviously Al_2O_3 oxide film formation on the surface of nano particles. The thickness of this film may be comparable with particles of nano sizes so one needs more significant destroying energy than in the case of CuO or CuO_2 films.

2-33

ВЛИЯНИЕ ФЛЕГМАТИЗАТОРА НА ДЕТОНАЦИОННЫЕ И МЕТАТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ ГЕКСОГЕНА

Е.И. Ермолович, В.П. Ильин, А.Г. Карачев,
В.Г. Кожевников, А.Н. Михайлюкова

ОАО ГосНИИ «Кристалл», Дзержинск, Россия

E-mail: kristall@niikristall.ru

Проведено рассмотрение ряда взрывчатых составов (ВС) на основе гексогена с различным массовым содержанием флегматизатора (от 2 до 10%). Анализ детонации проведен с учетом режима недосжатости ВС, обусловленного флегматизатором. Для моделирования газодинамического течения продуктов детонации (ПД) ВС были рассчитаны коэффициенты в обобщенное уравнение состояния в форме JWЛ, предложенное Миллером [1]. Полученные уравнения состояния ПД ВС были использованы для моделирования экспериментов по метанию оболочки медной трубки (методика Т-20). Результаты работы могут быть использованы при анализе влияния флегматизатора на работоспособность ПД ВС.

Литература

1. Miller P.J. A Reactive Flow Model with Coupled Reaction Kinetics for Detonation and Combustion in Non-ideal Explosives // Proc. MRS Sym. (MRS Society published), Vol. 418, 1996, pp. 413.

INFLUENCE OF PHLEGMATIZER ON DETONATION AND ACCELERATION CHARACTERISTICS OF EXPLOSIVES BASED ON HEXOGEN

E.I. Ermolovich, V.P. Ilyin, A.G. Karachev,
V.G. Kozhevnikov, A.I. Mikhailukova

JSC «GosNII «Kristall», Dzerzhinsk, Russia

A number of explosive compositions based on hexogen was considered with different content of phlegmatizers by mass (2–10%). Detonation analysis was performed taking into account insufficient compactness of the explosive compositions that was induced with phlegmatizer. For modeling gas-dynamic flow of explosive detonation products the coefficients of generalized EOS (equations of state) in JWЛ form suggested by Miller [1] were calculated. The derived EOS were used for simulation of experiments with copper

cylinder wall acceleration (procedure T-20). The results of this work can be used in the analysis of phlegmatizers influence on performance of explosive composition detonation products.

Reference

1. Miller P.J. A Reactive Flow Model with Coupled Reaction Kinetics for Detonation and Combustion in Non-ideal Explosives // Proc. MRS Sym. (MRS Society published), Vol. 418, 1996, pp. 413.

2-34

К ВЛИЯНИЮ ДЭТА НА ДЕТОНАЦИОННУЮ СПОСОБНОСТЬ СМЕСЕЙ НИТРОМЕТАНА С НЕВЗРЫВЧАТЫМИ ЖИДКОСТЯМИ

С.А. Колдунов, А.В. Ананьин

Институт проблем химической физики РАН,
Черноголовка, Россия

E-mail: skold@icp.ac.ru

Известно, что незначительная (до 0,02%) добавка диэтилентриаммина (ДЭТА) к чистому нитрометану (НМ) может существенно уменьшить его критический диаметра детонации [1, 2 и др.], то есть увеличить детонационную способность. Этот факт естественно было объяснять сокращением ширины зоны химической реакции (ШЗХР), а саму возможность сокращения ШЗХР связывать с ускоряющим каталитическим влиянием ДЭТА на разложение нитрометана и в целом на процесс энерговыделения в пределах детонационного фронта.

В работе исследовалось влияние ДЭТА на детонационную способность смесей нитрометана с ацетоном (Ац) и метанолом (М), которые подрывались в стальных оболочках диаметром (d) от 13 до 50 мм с толщиной стенок 3 мм. Факт прохождения детонации устанавливался по характеру разрушения оболочки в пределах длины, непосредственно заполненной подрываемой (от $15d$ до $6d$) смесью, а также деформации конечного не заполняемого смесью участка оболочки длиной около 5 см. Были выполнены также эксперименты с применением щелевой фоторегистрации процесса с открытого торца жидкости. Исходные смеси содержали такое количество невзрывчатой компоненты, при котором они не способны детонировать не только в конкретных условиях эксперимента (диаметрах оболочки), но оказываются не способными детонировать в принципе (НМ/Ац 73/27, НМ/М 57/43). В последнем случае речь идет о смесях с соотношением компонентов, которое отвечает достижению истинного (абсолютного по характеру) предела распространения детонации по концентрации [3].

Показано, что при добавлении соответствующего количества ДЭТА и такие смеси становятся детонационно-способными. Минимальные количества ДЭТА, которые в состоянии обеспечить такую способность, могут составлять от нескольких до десятых долей процента. Конкретные значения, зависят, помимо условий эксперимента, от содержания нитрометана в исходной смеси и оказываются тем меньше, чем его больше.

Существуют, как и следовало ожидать, ограничения по максимуму содержания ДЭТА для реализации детонационного процесса. Содержание ДЭТА в этом случае достигает нескольких десятков процентов и в итоге становится близким для обеих смесей (около 45%), но всегда оказывается несколько ниже для смеси с меньшим содержанием разбавителя. Естественно полагать, что минимальные количества химически активной добавки ДЭТА снимают затруднения кинетического характера, в том числе связанных с присутствием посторонних инертных молекул. Ограничения же по максимуму содержания ДЭТА имеют, в основном, отношение к энергетическим возможностям обеспечения самораспространения процесса энерговыделения в детонационной форме.

Направление и результаты настоящих исследований могут представлять интерес для обсуждения и понимания особенностей механизма взаимодействия молекул различной природы и влияния собственно ДЭТА на превращение НМ в специфических (экстремальных) условиях детонационного процесса и ударного сжатия в жидких средах.

Работа поддержана РФФИ, проект № 11-03-01251-а.

Литература

1. Кондриков Б.Н., Козак Г.Д., Райкова В.М., Старшинов А.В. О детонации нитрометана // ДАН, 1977. Т. 233. № 3. С. 402–405.
2. R. Engelke. Effect of a chemical inhomogeneity on steady-state detonation theory // Phys. Fluids, 1980. V. 23. № 5. P. 875–880.
3. Dremin A.N. On the limit of detonation on concentration of liquid explosives mixtures with nonexplosive diluents // Proc. 13th Det. Symp. 2006. P. 720–224.

TOWARD INFLUENCE OF DETA ON DETONATION ABILITY OF NITROMETHANE MIXTURES WITH NON-EXPLOSIVE LIQUIDS

S.A. Koldunov, A.V. Ananin

Russian Academy of Sciences, Institute of Problems
of Chemical Physics, Chernogolovka, Russia

E-mail: skold@fcp.ac.ru

It is known that a small (up to 0.02%) addition of diethylenetriamine (DETA) to pure nitromethane (NM) can significantly reduce its critical detonation diameter [1, 2 etc.] that is to increase of the detonation ability. This fact was natural to explain the reduction in the chemical reaction zone length (CRZL), believing th CRZL e possibility itself of the CRZL 's reduction may be linked to the catalytic influence of DETA on the decomposition of nitromethane and in general on the process of energy release within the detonation front.

The DETA's effect on the detonation ability of nitromethane's mixtures with acetone (Ac) and with methanol (M) is investigated. The mixtures are blown into the steel shells of diameter (d) from 13 to 50 mm with wall thickness of 3 mm. The fact of detonation is established proceeding from character of the destruction of the shell along the length filled with mixture (from $15d$ to $6d$) and also from deformation of the final section of the shell non filled (length of about 50 mm). The initial mixtures have been contained a such number of non-explosive compo-

nents, under which they can not detonate not only in the specific experimental conditions (diameter of the shell), but are not able to detonate in principle (NM/Ac 73/27, NM/M 57/43). In the latter case it is considered the component ratio in mixtures corresponds to the achievement of the true (absolute in nature) limit of detonation on concentration [3].

It is shown that by adding the appropriate amount of DETA such mixtures are capable of detonation. The minimum amount which needs for turning these mixtures in ability to detonate are in the range from a few percent up to few tenth of percent. Specific values depend, in additional, to experimental conditions, on the content in the mixture of nitromethane and prove to be less than its content the greater. There are, as expected, limiting the maximum content of DETA for the implementation of the detonation process. The content of DETA in this case amounts to several tens of percent, and eventually becomes close to both blends (45%), but it always turns out to be somewhat lower for the mixture with a more lower content of the diluent. Natural to assume that minimal amount of chemically active additive of DETA removes difficulties of kinetic nature, including those associated with the presence of extraneous inert molecules. Restrictions as to the maximum content of DETA are mainly related to energy capabilities to propagate the process of energy release in the form of a detonation.

The subject and results of these studies may be of interest for discussion and understanding of the mechanism of interaction between molecules of different nature and also of DETA's influence on the transformation of NM in special (extreme) conditions of the detonation process and of the shock compression in liquid mediums.

The work is supported by RFBR, project № 11-03-01251-а.

References

1. Kondrikov B.N., Kozak G.D., Raikova V.M., Starshinov A.V. Detonation of nitromethane // Dok. Akad. Nauk SSSR, 1977. V. 233. № 3. P. 402–405.
2. Engelke R. Effect of a chemical inhomogeneity on steady-state detonation theory // Phys. Fluids, 1980. V. 23. № 5. P. 875–880.
3. Dremin A.N. On the limit of detonation on concentration of liquid explosives mixtures with nonexplosive diluents // Proc. 13th Det. Symp. 2006. P. 720–224.

2-35

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОЙ СЖИМАЕМОСТИ И СТРУКТУРЫ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В ЭМУЛЬСИОННЫХ ВВ

В.В. Лавров¹, А.А. Голубев², В.С. Демидов²,
А.В. Канцырев², С.А. Колесников¹, А.А. Логвиненко³,
В.М. Мочалова¹, А.Н. Савченко¹, А.В. Уткин¹

¹Институт проблем химической физики РАН,
Черноголовка, Россия

²Институт теоретической и экспериментальной физики,
Москва, Россия

³Московский физико-технический институт,
Долгопрудный, Россия

В работе проведено исследование ударной сжимаемости и структуры детонационных волн в зарядах

эмульсионного взрывчатого вещества (ЭВВ) различного диаметра с использованием методов лазерной доплеровской интерферометрии VISAR и протонной радиографии на ускорителе ИТЭФ-ТВН.

Основные измерения проводились для ЭВВ, изготовленного из эмульсионной матрицы плотностью 1,355 г/см³, содержащей 92,2% окислителя (нитрата аммония) и 7,8% горючего, включая эмульгатор, с добавкой 2,2–3,0% по массе сенсibiliзирующих полых стеклянных микросфер со средним размером частиц 80 мкм. Заряды ЭВВ помещались в тонкостенные пластиковые оболочки с внутренним диаметром $d = 15, 20$ и 36 мм и длиной 5–10 d . Исследование ударной сжимаемости эмульсионной матрицы проводилось для зарядов диаметром 70 мм, длиной 10 мм в стальных оболочках, ударное нагружение осуществлялось металлическими ударниками со скоростью 1–2 км/с.

Профили массовой скорости взрывных и детонационных волн в зарядах ЭВВ, зарегистрированные лазерным интерферометром VISAR, показали, что детонационная волна в них имеет характерную треугольную зону повышенных давлений («химпик»), предсказанную классической теорией детонации, при этом его характерная длительность составляет около 1 мкс и плавно возрастает по мере уменьшения диаметра заряда. При этом внутри зоны химической реакции, соответствующей химпику, обнаруживается наличие хорошо воспроизводимых изломов на профилях скорости. Их наличие может быть объяснено двухстадийным характером взрывчатого превращения в ЭВВ, либо потерей стационарности волны при приближении к критическому диаметру детонации.

Проведенные эксперименты по исследованию ударной сжимаемости эмульсионной матрицы позволили построить ее ударную адиабату в диапазоне 10–100 кбар. При давлении волны 100 кбар в матрице инициируется химическая реакция, при этом время ее задержки составляет около 1 мкс.

Метод протонной радиографии позволяет осуществлять регистрацию эволюции пространственного распределения плотности в детонирующем заряде ВВ. Проведенные на установке ИТЭФ-ТВН эксперименты показали, что при диаметре заряда 15 мм, по всей видимости, близком к критическому, реализующийся режим взрывного процесса сильно зависит от флуктуаций плотности и микроструктуры заряда, так как в аналогичных зарядах при одинаковых условиях инициирования наблюдалось распространение как детонационных и детонационно-подобных волн, так и затухающих взрывных процессов.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SHOCK COMPRESSIBILITY AND DETONATION WAVE STRUCTURE IN EMULSION EXPLOSIVES

V.V. Lavrov¹, A.A. Golubev², V.S. Demidov²,
A.V. Kantsyrev², S.A. Kolesnikov¹, A.A. Logvynenko³,
V.M. Mochalova¹, A.N. Savchenko¹, A.V. Utkin¹

¹Institute of Problems of Chemical Physics RAS,
Chernogolovka, Russia

²Institute for Theoretical and Experimental Physics,
Moscow, Russia

³Moscow Institute of Physics and Technology,
Dolgoprudny, Russia

Investigation of shock compressibility and detonation wave structure in charges of Emulsion Explosive (EEX) with different diameters was conducted by VISAR Laser Doppler Interferometer and by proton radiography at ITEP-TWAC accelerator facility.

Main measurements were carried out for EEX prepared from emulsion matrix with 1.355 g/cc initial density which consisted of 92.2% of oxidizer (ammonium nitrate), 7.8% of fuel (diesel oil with emulgator) with addition of 2.2–3.0 wt.% of sensitizing hollow glass microballoons with mean particle size of 80 μm . EEX charges were placed in thin-walled plastic containers with internal diameter $d = 15, 20$ and 36 mm and with length of 5–10 d . Shock compressibility studies were conducted for 10 mm long emulsion matrix charges with steel walls and diameter of 70 mm. Shock loading was performed by metal flyer plates accelerated to 1–2 km/s.

Particle velocity profiles of explosion and detonation waves in EEX charges that were registered with VISAR laser interferometer showed that they have a characteristic triangular zone of high pressures that was predicted by classical detonation model («Von Neumann spike»). Its duration is about 1 μs and is smoothly increases with a decrease of a charge diameter. Within the chemical reaction zone which corresponds to the Von Neumann spike on particle velocity profiles a certain kind of kink was observed for various charges. Its presence can be explained by possible two-stage behavior of explosive transformation in EEX or by a loss of steadiness of the wave near the critical detonation diameter.

Shock compressibility studies for emulsion matrix allowed us to construct its shock Hugoniot in the range of 10 to 100 kbar. At the pressure of 100 kbar a chemical reaction is initiated in emulsion matrix after 1 μs after the shock front.

Proton radiography technique gives the opportunity to register an evolution of 2D and 3D density distribution within a detonating high explosive charge. Proton radiography experiments with EEX conducted at ITEP-TWAC facility showed that at the diameter of 15 mm which is possibly close to critical detonation diameter for investigated EEX composition the explosion process is strongly influenced by fluctuations of density and microstructure of a charge, because in similar charges in similar initiation conditions, but in different experiments both detonation or detonation-like waves and fading explosive processes were observed.

2-36

ХИМИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТНЫХ ТОПЛИВ

М.М. Русаков, Д.А. Павлов, А.М. Козин

Тольяттинский государственный университет,
Тольятти, Россия

E-mail: Pavlov-DA@yandex.ru

Установление зависимостей изменения пределов детонации от различных факторов и возможность регулирования этих пределов позволяет рационально организовать рабочий процесс ряда энергетических установок. Одним из возможных направлений позволяющих значительно изменять пределы детонации топливовоздушной смеси (ТВС) является использование газовых добавок. Целью работы являлось установление диапазона возможного регулирования пределов детонации углеводородного топлива, путем добавок различных газов, к исходной ТВС. В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния различных добавок на детонационные свойства композитного топлива в условиях камеры сгорания переменного объема. Показано значительное их влияние на детонационные свойства таких топлив. Экспериментально определены пределы детонации от степени повышения давления в камере сгорания и количества добавок. Добавка свободного водорода (H_2) в количестве 6% от массы топлива расширяет область детонации в среднем на 10–15%, добавка свободного кислорода (O_2) в ТВС в количестве 8% – в среднем на 15–20%.

Результаты работ могут быть использованы для повышения эффективных и экологических показателей энергетических установок различного назначения, в т. ч. и двигателей внутреннего сгорания.

CHEMICAL REGULATION OF DETONATION PROPERTIES FUEL

M.M. Rusakov, D.A. Pavlov, A.M. Kozin

Togliatti State University, Togliatti, Russia

E-mail: Pavlov-DA@yandex.ru

The change of limit detonation and possibility regulation limits allows organizing effective process of the power installations. The possible change of the limits detonation properties fuel mixture (FAM) is to use a gas additive. Main task was to establish the range of possible regulatory detonation limits in depending of various additives. Results of experimental studies on the effect of various additives on the detonation properties of the fuel in combustion chamber. Presents the results of detonation properties of such fuels.

2-37

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА НА ДЕТОНАЦИОННУЮ СПОСОБНОСТЬ ВТОРИЧНЫХ ВВ

А.В. Пинаев¹, П.А. Пинаев²¹Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, Россия²Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия
E-MAIL: avpin@ngs.ru

Проведены эксперименты в вертикальной ударной трубе длиной 7 м, диаметром 70 мм. Исследовано влияние воздуха при начальном давлении $p_0 = 0,01 \dots 0,3$ МПа на детонационную способность взвеси ВВ (тэна) с весом столба от 3,7 до 33,6 г (среднеобъемная плотность $k = 0,14 \dots 1,28$ мг/см³). Иницирование взвеси ВВ осуществляли с помощью двух секций длиной 0,9 м, диаметром 50 мм, расположенных диаметрально противоположноверху трубы и заполняемых смесью $C_2H_2 + 2,5O_2$ при начальном давлении 0,1–0,3 МПа.

Установлено, что низкоскоростная детонация в аэровзвесах ВВ распространяется по конвективно-струйному механизму. Обнаружена устойчивость конвективно-струйного механизма иницирования при переходе от вакуумированной среды к газонаполненной и показано, что во всех опытах не реализуется классический механизм ударно-волнового иницирования. В аэровзвесах ВВ регистрируется скачок давления на переднем фронте. При низких p_0 за фронтом волны наблюдается плавный подъем давления. С увеличением начального давления воздуха профиль давления за фронтом волны становится вначале прямоугольным, а затем спадающим треугольным. Зона свечения на осциллограммах отстоит от скачка давления на 15–50 см.

Определены структура и основные параметры детонации в зависимости от величин k и p_0 . Скорость детонации D уменьшается с ростом начального давления воздуха, наличие газовой фазы перед фронтом волны затрудняет (по сравнению с вакуумом) иницирование и распространение детонации. В исследованном диапазоне p_0 и k величина $D = 1800 \dots 1300$ м/с. Определены нижние концентрационные пределы детонации ВВ. С увеличением p_0 возрастает величина критической (минимальной) среднеобъемной плотности k^* , ниже которой детонация не распространяется. Зона реакции (расстояние от начала свечения до точки Чепмена-Жуге) в волнах вакуумной детонации и в аэровзвесах достигает 0,5 м. Сравнение расчетов структуры и параметров волны детонации во взвесах ВВ с экспериментом дает удовлетворительное согласие. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №09-01-00317а).

EFFECT OF INITIAL PRESSURE ON DETONATION CAPABILITY OF SECONDARY HE

A.V. Pinaev¹, P.A. Pinaev²

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

²Institute of Laser Physics, SB RAS, Novosibirsk, Russia
E-mail: avpin@ngs.ru

Experiments in a vertical shock tube length of 7 m and 70 mm in diameter were performed. The influence of air on the detonation ability of He dredge (PETN) with the column weight from 3.7 to 33.6 g (average volume density $k = 0.14 \dots 1.28$ mg/cm³) at an initial pressure $p_0 = 0.01 \dots 0.3$ MPa was investigated. Initiation of HE suspension was performed with two long sections 0.9 m in length, diameter 50 mm, located diametrically opposed to each other on the top of the tube and filled with a mixture of C₂H₂ + 2.5O₂ at an initial pressure of 0.1–0.3 MPa.

It is established that the low-velocity detonation in HE air-suspensions spreads by convective-jet mechanism. Stability of the convective-jet initiation mechanism in the transition from a vacuum medium to the gas-filled was detected and it is shown that in all the experiments do not realized by the classical mechanism of shock-wave initiation. In HE air-suspensions a jump of pressure at the forward front is recorded. At low p_0 behind the wave front gradual pressure rise is observed. With the increase of initial pressure of the air pressure profile behind the shock front is initially rectangular, then triangular decreasing. Emission zone on the oscillograms is separated from the pressure jump at 15–50 cm.

The structure and main parameters of detonation in depending on the values of k and p_0 were obtained. The detonation velocity D decreases with increasing initial pressure, presence of gas phase in front of the wave impedes (as compared to vacuum) initiation and propagation of detonation. In the investigated range of p_0 and k value $D = 1800 \dots 1300$ m/sec. The lower concentration limits of detonation were defined. The critical (minimum) average volume density k^* (below which the detonation does not spread) increases with the growth of p_0 . The reaction zone (the distance from the emission beginning to the Chapman-Jouguet point) in waves of vacuum detonation and in air-suspensions detonation reaches 0.5 m. The comparison of calculations of structure and parameters of detonation wave in HE suspensions with the experiment gives satisfactory agreement. This work was supported by RFBR (grant № 09-01-00317a).

2-38

О ГРАДИЕНТНЫХ СООТНОШЕНИЯХ НА ДЕТОНАЦИОННОМ ФРОНТЕ В ГАЗАХ

Е.С. Прохоров

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

E-mail: prokh@hydro.nsc.ru

При естественном предположении к форме записи калорического уравнения состояния (внутренней энер-

гии) среды для одномерных видов движения в [1] получены, так называемые градиентные соотношения, которые устанавливают однозначное соответствие между первыми частными пространственными производными (градиентами) давления $(\partial p/\partial r)_*$, плотности $(\partial \rho/\partial r)_*$, массовой скорости $(\partial u/\partial r)_*$ газа на ударном фронте и производной по времени скорости (ускорением) dD/dt самого фронта. С учетом теплового эффекта химических реакций эти соотношения применимы и для детонационного фронта (сильного разрыва с тепловыделением), что позволяет расширить область их практического использования.

В данной работе общие формулы градиентных соотношений адаптированы для упрощенного описания распространения пересжатых режимов детонации в химически реагирующем газе. При этом полагали, что для интенсивно взрывающихся газовых смесей с температурой химической реакции порядка $2500 \div 4000$ К показатель равновесной адиабаты близок к единице [2], т. е. продукты детонации представляют почти изотермическую среду. В рамках этой модели газодинамические параметры на детонационном фронте можно явным образом выразить через скорость фронта D , точнее, через степень пересжатия детонационной волны (ДВ) – $\alpha = D/D_{CJ}$. Здесь и далее нижний индекс «CJ» используется для обозначения параметров стационарной (установившейся) детонации Чепмена-Жуге. В результате получены градиентные соотношения, имеющие следующую характерную структуру:

$$(\partial y/\partial r)_* = g_* \cdot d\alpha/dt, \quad (1)$$

где $y = \{p/p_{CJ}, \rho/\rho_{CJ}, u/u_{CJ}\}$, $g_* = g_*(\alpha)$ – явная функция от степени пересжатия.

Соотношения (1) могут быть использованы при построении аналитических приближенных решений газодинамических задач, например: они могут найти применение в инженерных расчетах для оценки значений производных $(\partial y/\partial r)_*$ по изменения скорости фронта ДВ. Для подтверждения этого проведен следующий вычислительный эксперимент.

Так была численно решена одномерная нестационарная задача о затухании пересжатой ДВ, сформированной при взрыве стехиометрической ацетиленокислородной смеси в секции детонационной трубы с повышенным начальным давлением и последующем выходе детонации в сопряженную секцию, где взрывчатая смесь имеет начальное давление на порядок ниже. Рассчитанные профили параметров равновесного газового потока за фронтом ДВ сопоставлялись с приближенным решением – $y = y_* + (r - r_*) \cdot (\partial y/\partial r)_*$, восстановленным с помощью формул (1) и пространственно-временной диаграммы $r_* = r_*(t)$ текущего положения фронта, которая может служить аналогом получаемых в реальном эксперименте фоторазверток самосвечения (см. например, [3]) фронта ДВ через щель параллельную оси трубы. Здесь полагали, что $D = dr_*/dt$ и $dD/dt = d^2r_*/dt^2$.

Установлено, что приближенное решение хорошо аппроксимирует распределение давления и массовой скорости вблизи фронта ДВ. Например, отличие этих параметров (точнее y_*) и их градиентов $(\partial y/\partial r)_*$ на фронте от решения нестационарной задачи не превышают 1%

и 5% соответственно. Это может служить основанием для применения соотношений (1) при обработке реальных экспериментальных данных и позволит сопоставлять результаты, полученные независимыми экспериментальными методами (например, с измерением давления с помощью датчиков).

Литература

1. Прохоров Е.С. Градиентные соотношения на фронте ударных и детонационных волн // Физика горения и взрыва, 2009. Т. 45. № 5. С. 92–94.
2. Николаев Ю.А., Топчий М.Е. Расчет равновесных течений в детонационных волнах в газах // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13, № 3. С. 393–404.
3. Дубовик А.С. Фотографическая регистрация быстропротекающих процессов. М.: Наука, 1964. 468 с.

ON GRADIENT RELATIONS AT DETONATION FRONT IN GASES

E.S. Prokhorov

Lavrent'ev Institute of Hydrodynamics, SB RAS,
Novosibirsk, Russia

E-mail: prokh@hydro.nsc.ru

Under a natural assumption on form caloric equation of state (internal energy) for one-dimensional of motion in [1], are obtained, the so-called gradient relationships that give a one-to-one correspondence between the first partial spatial derivatives (gradients) of pressure $(\partial p/\partial r)_*$, density $(\partial \rho/\partial r)_*$, mass velocity $(\partial u/\partial r)_*$ of gas at the shock front and the time derivative of velocity (acceleration) dD/dt of the front. Taking into account the thermal effect of chemical reactions, these relations are applicable to the detonation front (a strong discontinuity with heat release), thus extending the area of their practical use.

In this paper, general formulas for gradient relations are adapted for a simplified description of the propagation regimes of overdriven detonation in a chemically reacting gas. At the same time believed that for the intensively explosive gas mixtures with the temperature of chemical reaction about 2500 ÷ 4000 K the equilibrium specific heat ratio is close to unity [2], i.e. the detonation products represent nearly isothermal environment. In this model the gas-dynamic parameters at the detonation front can be explicitly expressed in terms of velocity of the front, or rather, by the degree of overdrive of detonation wave (DW) – $\alpha = D/D_{CJ}$. Here and later the subscript «CJ» is used to denote the parameters of the stationary (steady) of the Chapman-Jouguet detonation. As a result, we obtained the gradient relations, having the following characteristic structure:

$$(\partial y/\partial r)_* = g_* \cdot d\alpha/dt, \quad (1)$$

where $y = \{p/p_{CJ}, \rho/\rho_{CJ}, u/u_{CJ}\}$, $g_* = g_*(\alpha)$ is an explicit function of the degree of overdrive.

Relations (1) can be used to construct analytical approximate solutions of gas-dynamics problems. For example, they can be used in engineering calculations to estimate the values of the derivatives $(\partial y/\partial r)_*$ from changes the velocity of the DW front. To confirm this, held following computational experiment.

Thus was solved numerically the one-dimensional non-stationary problem of the decaying overdriven DW, formed

by the explosion of a stoichiometric acetylene-oxygen mixture in a section of the detonation tube with a high initial pressure and the subsequent transition of detonation in the conjugated section, where an explosive mixture has an initial pressure on the order of magnitude lower. The calculated profiles of the equilibrium gas flow behind the DW front compared with the approximate solution – $y = y_* + (r - r_*) \cdot (\partial y/\partial r)_*$, reconstructed by means of (1) and the space-time diagram $r_* = r_*(t)$ of the current position of the front, which can serve as an analogue of produced in real experiment a photographic sweep of self-illumination (see for example [3]) of the front through a slit which is parallel to the tube axis. Here it is believed that $D = dr_*/dt$ and $dD/dt = d^2r_*/dt^2$.

It is established that the approximate solution agrees well with the distributions of pressure and mass velocity near the DW front. For example, the deviations of these parameters and their derivatives from the solution of the non-stationary problem are less than 1% and 5% respectively. It can serve as the basis for application of (1) when processing real experimental data and allows comparing the results obtained by independent experimental methods (for example, the measurement of pressure using gauges).

References

1. Prokhorov, E.S. Gradient relations at the front of shock and detonation waves // Combustion, explosion, and shock waves, 2009. Vol. 45, No. 5, pp. 92–94.
2. Nikolaev Yu. A., Topchiyan M.E. Calculation of equilibrium flows in detonation waves in gases // Combustion, explosion, and shock waves, 1977. Vol. 13, No. 3, pp. 393–404.
3. Dubovik A.S. Photographic recording of high-speed processes [in Russian]. Moscow: Nauka, 1964. 468 p.

2-39

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПРИ ДЕТОНАЦИИ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВВ

Н.П. Сатонкина, Э.Р. Прууэл, А.П. Ершов,
Д.И. Карпов, А.В. Пластинин

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

E-mail: snp@hydro.nsc.ru

Проведено экспериментальное исследование электропроводности продуктов детонации двух составов эмульсионных ВВ на основе аммиачной и натриевой селитры. Получены профили электропроводности при содержании сенсibilизатора от 3 до 50%. Для состава на основе аммиачной селитры амплитуда электропроводности и форма распределения сильно зависит от доли стеклянных микросфер. Амплитуда электропроводности слабо зависит от состава и составляет величину $0,3 \pm 0,23$ 1/(Ом·см). При высоком содержании сенсibilизатора становится различим химпик, ширина которого составляет 0,25 мкс, этот результат коррелирует с данными других методик. Выяснено, что определяющую роль в высокой равновесной электропроводности играет натрий, образующий легко ионизирующиеся соединения. Получены профили электропроводности

при добавлении 3% сенсibilизатора, демонстрирующие роль горячих точек в инициировании эмульсии. Выяснена роль давления на примере ВВ с 50% сенсibilизатора: при увеличении давления равновесная электропроводность растет.

SPACE DISTRIBUTION OF THE CONDUCTIVITY AT THE DETONATION OF EMULSION EXPLOSIVES

N.P. Satonkina, E.R. Prueel, A.P. Ershov,
D.I. Karpov, A.V. Plastinin

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, SB RAS,
Novosibirsk, Russia

E-mail: snp@hydro.nsc.ru

The electric conductivity of the detonation products of the compounds of emulsion explosives from ammonium nitrate and sodium nitrate was experimentally studied. The conductivity profiles were measured at sensitizer volume fraction from 3 to 50 percents. The magnitude and the time profile of the conductivity depends strongly on the fraction of glass microspheres in ammonium nitrate. The magnitude of the conductivity depends slowly on the composition and is equal to 0.3 ± 0.23 1/(Ohm·cm). The chemical peak is revealed with measurements at the high concentrations of the sensitizer. Its duration is 0.25 microseconds that is in a good agreement with the results obtained with other methods. It was obtained that sodium is responsible for the high value of the equilibrium conductivity since it reacts forming easily ionized compounds. The electric conductivity profiles obtained at the fraction of the sensitizer of 3 percents demonstrates the role of the hot spots in the process of the initiation of the emulsion explosive. The role of the pressure is stated using emulsion explosive with 50 percents of the sensitizer. The equilibrium conductivity was shown to increase with the pressure.

тана с помощью лазерного интерферометра VISAR [3] не удалось обнаружить пульсаций на его фронте. Можно лишь утверждать, что размер неоднородностей, по крайней мере, меньше 5 микрон. Такой размер неоднородностей не может быть разрешен методом отражения света.

С помощью фотокамеры CORDIN исследован ФД смеси нитрометан/ацетон 81/19. Время экспозиции составляло 5 нс, время между кадрами 5 нс. Опыты проведены в двух постановках: при регистрации собственного свечения фронта и при освещении фронта посторонним источником света (свечение фронта ударной волны в аргоне). Последовательность кадров позволяет наблюдать рождение, развитие и исчезновение тройных конфигураций [1] и измерить их поперечный размер.

С помощью лазерного интерферометра VISAR зафиксированы неоднородности на ФД смеси нитрометан/ацетон 81/19 и оценен их продольный размер. Рельеф фронта является «слабохолмистым», то есть продольный размер на порядок меньше поперечного, что соответствует модели о наличии тройных конфигураций на ФД ЖВВ. Применение высокоскоростной камеры CORDIN позволяет убедиться в достоверности результатов, получаемых с помощью интерферометра VISAR. Однако, для визуального наблюдения неоднородностей на ФД нитрометана временного разрешения камеры CORDIN недостаточно. Необходимо использовать стрик-камеры с пикосекундным разрешением.

Литература

1. А.Н. Дремин, С.Д. Савров, В.С. Трофимов, К.К. Шведов. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970. 171 с.
2. Я.Б. Зельдович, С.Б. Корнер, М.В. Сеницын, К.Б. Юшко // Доклады АН СССР, 1961. Т. 138. С. 1333.
3. V.M. Mochalova; A.V. Utkin; V.A. Garanin. Investigation of Detonation Wave in Tetranitromethane, Nitromethane, and Their Solutions with Methanol // Journal of Energetic Materials, 2010, Vol. 28, Issue S1, P. 231–240.

2-40

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ФРОНТА СТАЦИОНАРНОЙ ДЕТОНАЦИИ ЖИДКИХ ВВ

С.И. Торунов, М.И. Кулиш, В.М. Мочалова,
А.В. Уткин, В.В. Якушев

Институт проблем химической физики РАН,
Черноголовка, Россия

E-mail: torunov@fcp.ac.ru

Классические эксперименты по исследованию структуры фронта детонации (ФД) жидких взрывчатых веществ (ЖВВ) были выполнены с помощью торцевой фоторазвертки [1]. Разрешающая способность этой методики мала и не позволяет регистрировать неоднородности в таком ЖВВ, как нитрометан. Значительно лучшее разрешение (5 микрон) имеет метод отражения света [2]. Опыты по рассеянию света от ФД нитрометана свидетельствовали о негладкости фронта [1]. Однако, при исследовании структуры ФД нитроме-

EXPERIMENTAL METHODS FOR INVESTIGATIONS OF RELIEF OF STEADY-STATE DETONATION FRONT IN LIQUID HIGH EXPLOSIVES

S.I. Torunov, M.I. Kulish, V.M. Mochalova,
A.V. Utkin, V.V. Yakushev

Institute of Problems of Chemical Physics RAS,
Chernogolovka, Russia

E-mail: torunov@fcp.ac.ru

Classical experiments on investigations of structure of steady-state detonation front (SDF) in liquid high explosives (LHE) have been carried out using streak camera [1]. The resolution of the technique was low and didn't allow registering disturbances of SDF in such LHE as nitromethane. Method of reflecting of light [2] has much more high resolution (5 micrometers). Results of experiments on light scattering from SDF of nitromethane have shown that the front is not smooth [1]. However, the disturbances of SDF of nitromethane have not been recorded using laser interferometer VISAR. One can only suggests that the size of disturbances at least less than 5 micrometers.

SDF of nitromethane/acetone 81/19 mixture has been investigated using photo camera CORDIN. Time of exposure (gate-time) was 5 nanoseconds and time between frames was 5 nanoseconds. The experiments have been carried out recording the front luminescence and the luminescence of outside source scattering by the front (luminescence of shock wave front in argon). The sequence of frames enables to observe the appearance, development and disappearance of three-shock configurations [1] and to measure their crosscut size.

The disturbances of SDF of nitromethane/acetone 81/19 mixture have been recorded using laser interferometer VISAR and their longitudinal size has been estimated. The relief is «slightly hilly», i. e. the crosscut size is single-order more than longitudinal size. This corresponds to the model of three-shock configuration. The use of the photo camera CORDIN enables to get added evidence of reliability of the results obtained using laser interferometer VISAR. However, the temporary resolution of the camera CORDIN is not enough to record the disturbances of SDF in nitromethane. It is necessary to use streak camera with picosecond resolution.

References

1. Dremin A.N., Savrov S.D., Trofimov V.S., Shvedov K.K. Detonatsionnye volny v kondensirovannykh sredakh (Detonation waves in condensed matters). M.: Nauka, 1970. 171 p.
2. Zel'dovich Ya.B., Kormer S.B., Sinitsyn M.V., Yushko K.B. // Doklady AN SSSR (Reports of the Academy of Sciences of the USSR), 1961. V. 138. P. 1333.
3. Mochalova V.M., Utkin A.V., Garanin V.A. Investigation of Detonation Wave in Tetranitromethane, Nitromethane, and Their Solutions with Methanol. Journal of Energetic Materials, 2010, Vol. 28, Issue S1, P. 231–240.

2-41

ВЛИЯНИЕ ДИЭТИЛЕНТРИАМИНА НА СТРУКТУРУ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В НИТРОМЕТАНЕ

А.В. Уткин, В.М. Мочалова, С.И. Торунов

Институт проблем химической физики РАН,
Черноголовка, Россия

E-mail: utkin@icp.ac.ru

Известно, что малые добавки аминов могут приводить к резкому снижению давления инициирования детонации и уменьшению критического диаметра жидких ВВ. До сих пор, однако, не исследовалось влияние сенсибилизаторов на характер течения в зоне реакции при стационарной детонации. С этой целью в работе проведены эксперименты по изучению влияния диэтиленetriamina (ДЭТА) на структуру детонационных волн в нитрометане (НМ). Концентрация ДЭТА изменялась в интервале от 0,1 до 10,0 массовых процентов. Регистрация профилей скорости на границе с водяным окном осуществлялась лазерным интерферометром VISAR.

В результате проведенных исследований обнаружено сильное влияние ДЭТА на структуру зоны реакции в смеси с нитрометаном. В чистом НМ за фронтом ударной волны скорость монотонно уменьшается, тогда

как в смеси регистрируется качественно иной характер течения. После скачка скорость продолжает возрастать, в окрестности 10 нс достигает максимума и только затем уменьшается. Кроме того, добавка ДЭТА приводит к существенным количественным изменениям параметров химика. Например, его амплитуда уменьшается в несколько раз. Отмечается также небольшое увеличение параметров Чепмена-Жуге, если концентрация ДЭТА менее 2%. При концентрации 2% параметры такие же, как и в чистом НМ, а при дальнейшем увеличении количества ДЭТА детонационные параметры снижаются.

Качественное изменение характера течения за ударным скачком объясняется резким увеличением начальной скорости реакции ВВ даже при малых, составляющих десятые доли процента, концентрациях ДЭТА. В результате это приводит к началу разложения ВВ непосредственно во фронте ударной волны, что и проявляется в уменьшении амплитуды химика и формировании пологого максимума скорости. Подобный характер изменения параметров в зоне реакции невозможно объяснить в рамках классической теории детонации, не учитывающей возможность реакции ВВ во фронте ударной волны.

Работа выполнена при финансовой поддержки РФФИ, проект № 11-03-01251-а.

THE INFLUENCE OF DIETHYLENTRIAMINE ON THE DETONATION WAVE STRUCTURE IN NITROMETHANE

A.V. Utkin, V.M. Mochalova, S.I. Torunov

Institute of Problems of Chemical Physics of RAS,
Chernogolovka, Russia

E-mail: utkin@icp.ac.ru

It is known that small additions of amines can lead to sharp decrease of pressure of detonation initiation and to drop of failure diameter of liquid HE. Up to now the influence of sensitizer on character of flow in reaction zone at steady-state detonation hasn't investigated. So in this work the experiments were conducted which study the influence of diethylenetriamine (DETA) on the detonation wave structure in nitromethane (NM). DETA concentration changed from 0.1 up to 10 mass percents. Registration of velocity profiles on the boundary with water window was performed by laser interferometer VISAR.

In result of conducted experiments it was found strong influence of DETA on reaction zone structure in solution with nitromethane. In neat NM behind the shock wave front the velocity decreases monotonously, while in solution the other character of flow is registered. After jump the velocity continues to increase, after 10 ns reaches maximum and then decreases. Addition of DETA results in considerable quantitative changes of Von Neumann spike parameters. For example, its amplitude decreases in several times. Little increase of C-J parameters is observed if DETA concentration is less than 2%. At concentration 2% parameters are the same as in neat NM. At further increase of DETA addition the detonation parameters decrease.

Qualitative change of flow character behind the shock jump is explained by sharp increase of initial rate of HE reaction even at small DETA concentration (one tenth of

percent). In results it causes HE decomposition in shock wave front, and the amplitude of Von Neumann spike decreases and sloping velocity maximum is formed. Such character of parameters changes in reaction zone is impossible to explain by means of classical detonation model which doesn't take into account possibility of HE reaction in shock front.

The work was supported by Russian Foundation for Basic Research (project 11-03-01251-a).

2-42

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ЗОНЫ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ,
СОСТОЯНИЙ ПИКА НЕЙМАНА
И ЧЕПМЕНА-ЖУГЕ В ГОМОГЕННЫХ
И ГЕТЕРОГЕННЫХ ВВ**

А.В. Федоров, А.Л. Михайлов, Л.К. Антонюк,
Д.В. Назаров, С.А. Финюшин

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия
E-mail: root@gdd.vniief.ru

С помощью метода лазерного интерферометра Фабри-Перо проведено исследование параметров детонации индивидуальных и смесевых взрывчатых веществ (ВВ) на основе октогена, гексогена, ТЭНа, ТАТВ, тротила, монокристаллов ТЭНа и октогена. Для исследуемых ВВ определены величины состояний пика Неймана (25–64 ГПа), Чепмена-Жуге (19–43 ГПа), параметров ширины зоны химической реакции (ЗХР) (4–620 нс). Для смесевых жидких ВВ на основе тетранитрометана (ТНМ), нитрометана (НМ) и нитробензола (НБ) в зависимости от состава компонентов зарегистрированы как устойчивые, так и неустойчивые режимы детонации. Переход от устойчивого к неустойчивому режиму происходит в том случае, когда величина критического давления инициирования детонации превышает давление Чепмена-Жуге. В смесевых ВВ (типа горючее-окислитель) критическое давление инициирования растет с увеличением массовой доли горючего. Например, для смеси ТНМ/НБ критическое давление инициирования превышает давление Чепмена-Жуге и режим становится неустойчивым при массовой концентрации НБ $\geq 20\%$. В гомогенных жидких ВВ при затухании пересжатого режима и переходе к неустойчивой детонации зарегистрирован профиль нормальной детонационной волны с затянутым ударноволновым скачком и определена величина периода индукции теплового взрыва (≈ 5 нс).

Для гомогенных и гетерогенных ВВ определены зависимости длительности ЗХР от критического диаметра ($d_{кр}$), которые позволяют оценивать параметры ЗХР если известна величина $d_{кр}$. Установлено, что длительность ЗХР в монокристаллах ВВ во много раз выше, чем в гетерогенных ВВ, например, для монокристалла ТЭНа превышение составляет более 20 раз. В монокристаллах октогена скорость детонации и величина пика Неймана в высокочувствительном кристаллографическом направлении существенно выше по сравнению с высокоплотными гетерогенными ВВ и мо-

нокристаллами, в которых детонация распространяется вдоль малочувствительных направлений. Так, для монокристалла октогена в высокочувствительном направлении скорость детонации $D = 9,8$ км/с и величина пика Неймана $P_N = 63,9$ ГПа выше, чем в высокоплотном гетерогенном ВВ и малочувствительном направлении монокристалла ($D = 8,8 \dots 9,1$ км/с, $P_N = 49$ ГПа).

**DETERMINATION OF PARAMETERS
OF CHEMICAL REACTION ZONE,
NEUMANN SPIKE STATE
AND CHAPMAN-JOUGUET STATE IN
HOMOGENEOUS HE AND HETEROGENEOUS HE**

A.V. Fedorov, A.L. Mikhailov, L.K. Antonyuk,
D.V. Nazarov, S.A. Finyushin

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific Research
Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia
E-mail: root@gdd.vniief.ru

By using the Fabry-Perot laser interferometric method the authors studied detonation parameters of individual and mixed liquid HE based on HMX, RDX, PETN, TATB, trotyl, single crystals of PETN and HMX. The quantities of Neumann spike states (25–64 GPa), of Chapman-Jouguet states (19–43 GPa) and the quantities for parameters of a width of a chemical reaction zone (CRZ) (4–620 ns) were determined for HE under study. Both stable conditions and unstable conditions were recorded for mixed liquid HE on the basis of tetranitromethane (TNM), nitromethane (NM) and nitrobenzene (NB) depending on a composition of components. The transfer of stable conditions to unstable conditions takes place in the event that a quantity of a critical pressure for initiating detonation exceeds Chapman-Jouguet pressure. In mixed HE (of the combustible–oxidizer type) a critical pressure of initiation grows with increase in a mass fraction of combustible. For example, a critical initiation pressure exceeds Chapman-Jouguet pressure for a TNM/NB mixture and a regime becomes unstable at mass concentration of NB $\geq 20\%$. When decreasing over-compressed conditions and transferring to unstable detonation a profile of a normal detonation wave having a protracted shock-wave jump was recorded and a value of an induction period of thermal explosion was determined (≈ 5 ns) in homogeneous liquid HE.

Dependences of the CRZ length/duration from the critical diameter (d_{cr}) were found for homogeneous and heterogeneous HE what enables one to estimate CRZ parameters given the value d_{cr} . It was established that the CRZ length/duration is many times higher in single crystals of HE than in heterogeneous HE, for instance, the excess is about twenty times more for monocrystals of PETN. A velocity of detonation and a value of Neumann spike are considerably higher in single crystals in a high-sensitive crystallographic direction as compared to high-density heterogeneous HE and single crystals, in which detonation propagates along low-sensitive directions. In that way for a single crystal of HMX the velocity of detonation is more by 7.7% in high-sensitive directions than in low-sensitive directions, the quantity of Neumann spike $P_N = 63.9$ GPa is more than in high-density heterogeneous HE and in a low-sensitive direction of a single crystal ($P_N = 49$ GPa).

2-43

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МЕТАНИЯ ПЛАСТИНЫ ПЛОСКОЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНОЙ

И.А. Ахлюстин, Е.Б. Смирнов, Б.Г. Лобойко,
О.В. Костицын, Ю.А. Беленовский,
К.М. Просвирнин, А.Н. Киселев

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Для численного моделирования детонации в различных устройствах, содержащих ВВ, необходимо уравнение состояния продуктов взрыва. Уравнение состояния ПВ в совокупности с параметрами Жуге определяет изэнтропу расширения ПВ, проходящую через точку Жуге. Изэнтропа расширения ПВ определяет начальные параметры ударной волны, создаваемой в окружающей среде детонирующим зарядом, и работу, совершаемую расширяющимися ПВ. Для определения работы, совершаемой продуктами взрыва, проводят эксперименты по метанию пластин плоской детонационной волной.

Процесс метания пластины регистрировался электроконтактным методом. Большое количество и специальное расположение электроконтактных датчиков позволили детально с шагом от 0,3 до 4 мм отслеживать процесс движения пластины, а также контролировать плоскостность пластины на протяжении процесса ее движения. На начальной стадии полета пластины удалось зарегистрировать характерные ступеньки на зависимости скорости пластины от пути, соответствующие циркуляции ударной волны в пластине.

INVESTIGATION OF PLATE THROWING BY A FLAT DETONATION WAVE

I.A. Akhlyustin, E.B. Smirnov, B.G. Loboiko,
O.V. Kostitsyn, Yu.A. Belenovsky,
K.M. Prosvirnin, A.N. Kiselev

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

Numerical simulation of detonation in various HE-containing devices requires an equation of state for explosion products (EP). This EOS, when combined with the Jouget parameters, determines the EP expansion isentrope passing through the Jouget point. The EP expansion isentrope determines both the initial parameters of a shock wave generated in the environment by a detonating charge, and the work of the expanding EP. Experiments on plate throwing by a flat detonation wave are performed to determine the explosion products work.

The process of plate throwing was recorded using the electrical contact technique. Great number and special location of electrical contact gauges made it possible to trace the plate movement with a step from 0.3 up to 4 mm, as well as to control the plate flatness during its movement. At the initial stage of plate flight, the authors managed to record typical steps on the plate rate vs. path relationship. These steps correspond to the shock wave circulation in the plate.

2-44

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА ВВ

А.Н. Киселёв, Е.Б. Смирнов, Б.Г. Лобойко,
О.В. Костицын, Ю.А. Беленовский,
К.М. Мирошкин, К.М. Просвирнин, А.В. Коваль

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики
им. академ. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

Процесс совершения работы над окружающей средой при детонации, а так же параметры ударной волны, создаваемой в окружающей среде, для каждого ВВ однозначно определяются уравнением состояния продуктов взрыва (ПВ). Уравнение состояния ПВ взрывчатого вещества определяется на основе изэнтропы расширения ПВ, проходящей через точку Чепмена-Жуге. Для определения хода изэнтропы в широком диапазоне степеней расширения продуктов взрыва используются эксперименты по метанию цилиндрических оболочек.

В работе приведены экспериментальные данные по разлету медных цилиндрических оболочек, полученные при помощи двух оптических и электроконтактного методов. Результаты, полученные различными методами показали хорошее согласие. Отмечены преимущества и недостатки используемых методов.

Полученные разными методами экспериментальные данные были аппроксимированы единой функциональной зависимостью, не противоречащей физике исследуемого процесса. Использование аналитической зависимости позволило получить функциональные зависимости для скоростей и ускорений оболочек, метаемых деталями из ВВ различного диаметра.

STUDYING THE CYLINDRICAL SHELLS MOVEMENT UNDER THE IMPACT OF HE EXPLOSION PRODUCTS

A.N. Kiselev, E.B. Smirnov, B.G. Loboiko,
O.V. Kostitsyn, Yu.A. Belenovsky, K.M. Miroshkin,
K.M. Prosvirnin, A.V. Koval

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

For each explosive, impact of detonation onto the environment, as well as parameters of a shock wave generated in the environment are known to surely depend on the equation of state of explosion products (EP). The equation of state of explosion products is derived from an EP expansion isentrope that passes through the Chapman-Jouget point. Experiments on the cylindrical shells throwing are used to determine the isentrope shape in a wide range of EP expansion levels.

The paper presents experimental data on the scatter of copper cylindrical shells. These data were obtained with the help of two optical methods and one electrical contact technique. Different techniques gave results that showed to be in a good agreement. Advantages and disadvantages of both techniques are noted.

The experimental data given by different techniques were approximated by a single functional dependence that is not inconsistent with the physics of the test process. Analytical dependence allowed functional dependences to be derived for velocities and acceleration of shells thrown by HE parts having different diameters.

2-45

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТОНКОСЛОЙНЫХ ЗАРЯДОВ
ПЛАСТИЧЕСКОГО ВВ
НА ОСНОВЕ БЕНЗОТРИФУРОКСАНА**

Н.Г. Багаветдинов, А.В. Городнов, А.С. Деев,
С.И. Карачинский, С.В. Мытареv,
Е.А. Потеряева, И.Р. Шакиров

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Исследованы технологические, детонационные и энергетические характеристики листовых зарядов нового пластического ВВ на основе бензотрифуроксана с полимерным связующим из смеси полиизобутиленов различной молекулярной массы, обладающего критической толщиной $\approx 0,18$ мм. Проведено сравнение нового ВВ с известными составами на основе высокодисперсного ТЭНа и гексогена.

**INVESTIGATION INTO DETONATION
AND ENERGY PROPERTIES
OF THIN-LAYER CHARGES
OF BENZOTRIFUROXAN-BASED PLASTIC
EXPLOSIVES**

N.G. Bagavetdinov, A.V. Gorodnov, A.S. Deev,
S.I. Karachinsky, S.V. Mytarev,
E.A. Poteryaeva, I.R. Shakirov

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

Processing, detonation, and energy properties of sheet charges made of new benzotrifuroxan-based plastic explosives with polymer binders that contain polyisobutylenes having different molecular weight and critical thickness ≈ 0.18 mm were investigated. A new explosive was compared to the known compositions based on high-dispersive PETN and RDX.

2-46

**СВЯЗЬ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ
С КРИВИЗНОЙ ФРОНТА
ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ**

К.М. Просвирнин, Е.Б. Смирнов, Б.Г. Лобойко,
О.В. Костицын, Ю.А. Беленовский, А.Н. Киселёв

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

В работе приведены результаты исследования процесса распространения фронта детонационной волны в цилиндрических образцах различного диаметра из низкочувствительного ВВ при одноточечном и плоско-волновом инициировании. Исследуемое ВВ различного начального диаметра заключалось в оболочку из меди, а также окружалось слоем взрывчатого вещества, имеющего скорость детонации, превышающую скорость детонации исследуемого ВВ. В экспериментах регистрировалась форма и скорость детонационного фронта.

Полученные результаты анализировались в совокупности с ранее определенными данными на открытых цилиндрических образцах. Полученные данные демонстрируют однозначную связь скорости детонации с кривизной фронта детонационной волны для исследуемого ВВ, в том числе в области отрицательной кривизны фронта детонационной волны.

**RELATION OF DETONATION RATE
TO DETONATION WAVE FRONT CURVATURE**

K.M. Prosvirnin, E.B. Smirnov, B.G. Loboiko,
O.V. Kostitsyn, Yu.A. Belenovskiy, A.N. Kiselev

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

The process of detonation wave front propagation in the cylindrical different-diameter samples of low-sensitivity HE in the case of the single-point and plane-wave initiation is investigated and this investigation results are presented. The test HE having different initial diameters was enclosed in a copper shell and surrounded by a layer of high explosive with the detonation rate exceeding that of the test HE. Experiments registered the shape and the rate of the detonation front.

The results were analyzed together with the earlier data for the uncovered cylindrical samples. These data demonstrate the detonation rate to be in apparent relation to the curvature of the detonation wave front for the test HE including the region of negative detonation wave-front curvature.

2-47

ВЫБОР И ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ ДЛЯ СВАРКИ ВЗРЫВОМ ЛИСТОВЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК

Н.Г. Багаветдинов, С.И. Карачинский,
Е.А. Потеряева, О.А. Тимофеев, И.Р. Шакиров

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Приведены результаты исследований детонационных характеристик и характеристик безопасности взрывчатых смесей на основе тротила, ТЭНа, гексогена, аммонита №6ЖВ и аммиачной селитры с инертными добавками, проведенных с целью выбора рецептур, оптимальных для использования при сварке взрывом листовых биметаллических заготовок. Сделана оценка тротилового эквивалента смесей по теплоте взрыва и по интенсивности воздушной ударной волны. Описаны результаты выполнения работ по сварке взрывом листов нержавеющей стали 08X18N10T и марганцовистой стали 12XM площадью до 15,5 м² с использованием исследованных смесей.

IDENTIFYING AND OPTIMIZING PROPERTIES OF EXPLOSIVE COMPOSITIONS FOR EXPLOSION WELDING OF BIMETAL PLATES

N.G. Bagavetdinov, S.I. Karachinsky,
E.A. Poteryaeva, O.A. Timofeev, I.R. Shakirov

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

Investigation of detonation and safety properties of explosive compositions based on TNT, PETN, RDX, # 6GW ammonite, and ammonia nitrate with inert additives was carried out to identify formulations being optimal for explosive welding of bimetal plates and results of this investigation are presented. The TNT equivalent of compositions was estimated based on explosion heat and air shock wave intensity. The paper describes results of explosion welding of 08Cr18N10T stainless steel plates with 12Cr Mn manganese steel plates having up to 15.5 m² area.

2-48

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ КОМПОНЕНТОВ В МОЩНЫХ СМЕСЕВЫХ СОСТАВАХ НА ИХ ВЗРЫВЧАТЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Ю.М. Милёхин, А.А. Матвеев, В.Н. Куликов,
А.Н. Осавчук, Н.И. Шишов

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Федеральный центр двойных технологий «Союз»,
Дзержинский, Россия

Исследование взрывчатых и энергетических характеристик многокомпонентных систем, состоящих из ВВ, металлического горючего, окислителя и полимерного связующего, представляет интерес, как с научной, так и с практической точки зрения [1–3]. Известно, что детонационные процессы в подобных системах являются неидеальными – для них характерно наличие увеличенной зоны реакции и догорание компонентов вне нее. Практическая сторона этой проблемы обусловлена тем, что в течение последних нескольких десятков лет проводятся исследования по разработке рецептур и оценке возможности использования многокомпонентных взрывчатых составов (ВС) в различных изделиях [1, 2, 4]. В работе (в продолжение [5, 6]) приведены экспериментально-расчетные результаты исследований по оценке влияния на взрывчатые и энергетические характеристики ВС содержания окислителя (перхлората аммония (ПХА)) и металлического горючего (АI). Изучены две группы ВС, которые при равном содержании связующего отличались количеством окислителя в 5 раз (6 и 30%, соответственно). В каждой группе варьировали содержание (10–40%) высокодисперсного АI за счет ВВ.

Взрывчатые свойства образцов ВС определяли по стандартным методам. Скорость детонации (D) регистрировали на заряде диаметром 40 мм длиной ≈ 300 мм фотографическим способом. Эффективность дробящего действия оценивали по методике [3, 5] в осколочных цилиндрах № 12 на основе количественных характеристик осколочных масс.

Расчет скорости детонации (D_{C-J}), теплоты взрыва Q_D и Q_F (соответственно, детонационной – при давлении продуктов детонации в точке Чепмена-Жуге и фугасной, а также полной идеальной работы (A_{id})) были выполнены по термодинамической методике [3] в рамках модели идеальной детонации Чепмена-Жуге в предположении полного химического и теплового равновесия.

Получено, что с увеличением содержания АI в ВС каждой из групп осколочная эффективность, а также скорость детонации, как экспериментальная, так и расчетная, снижаются. Чувствительность к трению, Q_D , Q_F и A_{id} возрастают, причем работа взрыва проходит через максимум при содержании АI $\approx 30\%$. Замена 45% мелкодисперсного алюминиевого порошка более крупным (АСД-1) не уменьшила D .

С увеличением содержания ПХА D уменьшается, причем с увеличением АI различие между ними возрастает, а чувствительность к механическим воздействиям

и осколочная эффективность практически не изменяются, не изменяются энергетические характеристики – Q_D , Q_F и A_{id} .

Литература

1. Талавар М.Б., Сивабалан Р., Аннияппан М., Горе Г.М., Астана С.Н., Гандхе Б.Р. Новые тенденции в области создания перспективных высокоэнергетических материалов. // ФГВ, 2007, т. 43, № 1. С. 72–85.
2. Вадхе П.П., Павар Р.Б., Синха Р.К., Астана С.Н., Субхананда Р. Алюминизированные литевые взрывчатые вещества (обзор) // ФГВ, 2008, Т. 44, № 4. – С. 98–115.
3. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, в 2 т. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.
4. Одинцов В.А., Имховик Н.А., Меркулов В.М., Зайчиков Ю.Е., Осавчук А.Н., Куликов В.Н., Якимцев И.В. Осколочно-кинетические боеприпасы с адаптивными зарядами ВВ двойного назначения (на основе баллистических и смесевых ТРТ) // Ударные волны в конденсированных средах: Доклады VIII научной конференции. 23–26 ноября 2008 – Санкт-Петербург, – С. 112–120.
5. Милехин Ю.М., Меркулов В.М., Осавчук А.Н., Зайчиков Ю.Е., Куликов В.Н., Шишов Н.И., Имховик Н.А., Одинцов В.А. Экспериментально-теоретические исследования взрывчатых свойств, бризантного и метательного действия многокомпонентных ВС // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Труды Международной конференции XI Харитоновские тематические научные чтения. Под ред. А.Л. Михайлова. – г. Саров, 16–20 марта 2009, ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ» С. 5–10.
6. Милехин Ю.М., Осавчук А.Н., Куликов В.Н., Бестужева Т.А., Одинцов В.А., Имховик Н.А. Влияние содержания компонентов в мощных взрывчатых составах на их взрывчатые и энергетические характеристики // Сборник тезисов докладов на Международной конференции XIII Харитоновские тематические научные чтения, 14–18 марта 2011, г. Саров, ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ», – С. 7–9.

STUDY OF THE INFLUENCE OF COMPONENTS IN HIGH-POWER MIXED COMPOSITIONS ON THEIR EXPLOSIVE AND ENERGETIC CHARACTERISTICS

Yu.M. Milekhin, A.A. Matveev, V.N. Kulikov,
A.N. Osavfchuk, N.I. Shishov

FSUE «FCDT «Soyuz», Dzerzhinsky, Russia

The study of explosive and energetic characteristics of multi-component systems, consisting of explosive, metal fuel, oxidation and polymer binding, has scientific and practical aspects [1–3]. It is known that detonation processes in such systems are imperfect – they are characterized by the presence of increased reaction zone and the burning of components outside of it. The practical side of this problem is conditioned by the fact that over the past several decades the studies on the development of formulations and evaluation of the possibility of using the multi-components explosive composition (EC) in the different articles are conducted [1, 2, 4]. This paper (in continuation [5, 6]) presents the results of experimental and theoretical studies on the evaluation of influence of oxidizer content (ammonium perchlorate (AP) and metal fuel (Al) on explosive and energetic characteristics of EC. Two groups of explosives were studied, which, with an equal content of binder differed in the content of the oxidizer

by 5 times (6 and 30%, respectively). In each group were varied the content (10–40%) of fine Al for the explosive.

The explosive properties of the EC samples were determined by the standard methods. Detonation rate (D) was measured on a charge, 40 mm in diameter and ~300 mm in length, by photographic method. Efficiency of the crushing action was assessed by the technique [3, 5] in fragment cylinders № 12 on the basis of quantitative characterizations of fragment masses. The calculation of detonation rate (D_{C-J}), the heat of explosion Q_D and Q_F (respectively, of detonation – on pressure of the products of detonation (PD) in the point Chapman-Juguet (C-J) and of high explosive – on isentropic expansion of PD up to ≈ 1 bar), and also a full ideal work (A_{id}) was done by the thermodynamic method [3] in the framework of ideal detonation model by C-J in supposition of full chemical and heat equilibrium.

It was found that with increasing content of Al in EC of each group the fragment efficiency, as well as the detonation rate, as experimental, so as the theoretical, decrease. Sensitivity to friction, Q_D , Q_F and A_{id} increase, moreover the work of explosion goes through the maximum when the content of Al $\approx 30\%$. Replacement 45% of fine aluminum powder by the largek did not decreased D . With the increase of content AP D decreases, so with the increase of Al the difference between there grows, and sensitivity to mechanical impact and fragment efficiency practically do not change, and energetic characteristics also do not change – Q_D , Q_F and A_{id} .

References

1. Talavar M.B., Sivabalan R., Anniyappan M., Gore G.M. and Asthana S.T. et al.. Emerging trends in advanced high energy materials. Combustion, Explosion and Shock Waves, 2007, v. 43, № 1. P. 62–72.
2. Vadhe P.P., Pavar R.B., Sinha R.K., Asthana S.N., Subkhananda A.Rao. Cast aluminized explosives (review) Combustion, Explosion and Shock Waves, 2008, v. 44, № 4. P. 461–477.
3. Physics of explosion / on red. L.P. Orlenko – Edit. 3-e, in 2 t. – M: FIZMATLIT, 2002.
4. Odintsov V.A., Imkhovik N.A., Merkulov V.M., Zaichikov Yu.E., Osavfchuk A.N., Kulikov V.N., Yakimtsev I.V. Fragment-kinetic ammunition with adaptive charges of dual-use explosives (based on ballistite and composite solid rocket propellant) // The shock waves in condensed matters: Papers VIII Scientific Conference. S-Pb. 2008. P. 112–120.
5. Milekhin Yu.M., Merkulov V.M., Osavfchuk A.N., Zaichikov Yu.E., Kulikov V.N., Shishov N.I., Imkhovik N.A., Odintsov V.A. Experimental and theoretical studies of explosive properties of brisant and low explosives actions for multi-component explosive compositions // Proceeding of International Conference «XI Chariton's Topical Scientific Readings», RFNC – VNIIEF. Sarov, 16–20 March 2009. P. 5–10.
6. Milekhin Yu.M., Osavfchuk A.N., Kulikov V.N., Bestuzheva T.A., Odintsov V.A., Imkhovik N.A. Influence content of components in powerful explosive compositions on there explosive and energetic characteristics // Proceeding of International Conference «XIII Chariton's Topical Scientific Readings», RFNC – VNIIEF. Sarov, 14–18 March 2011. P. 7–9.

2-49

СТРУКТУРА ЗОНЫ РЕАКЦИИ ДЕТонирующего мелкозернистого ТАТБ. ЭКСПЕРИМЕНТ

Е.А. Козлов, В.И. Таржанов, И.В. Теличко,
А.В. Воробьев, К.В. Левак, В.А. Маткин,
А.В. Павленко, С.Н. Малюгина, А.В. Дулов

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: V.I.Tarzanov@vniitf.ru

В развитие работ РФЯЦ – ВНИИТФ по исследованию поведения и свойств материалов при динамическом нагружении с использованием лазерно-интерферометрической диагностики процессов [1] изучена структура зоны реакции детонационной волны в мелкозернистом триаминотринитробензоле (ТАТБ) пониженной плотности ($1,815 \text{ г/см}^3$) с применением лазерного интерферометра VISAR. Заряды ТАТБ $\varnothing 60 \times 20 \text{ мм}$ и $\varnothing 60 \times 60 \text{ мм}$ инициировались плоской детонационной волной вспомогательного заряда ТГ55 $\varnothing 60 \times 10 \text{ мм}$, действующего линзовым зарядом. Регистрировалась скорость контактной поверхности между фтористым литием, играющим роль оконного материала, и тонким буферным слоем из алюминия, прилегающим второй поверхностью к ТАТБ. Получены временные профили детонации с буферными алюминиевыми слоями толщиной 400, 300, 200, 100 и 20 мкм, а также без буферного слоя, но с вакуумным покрытием из алюминия толщиной 0,3 мкм. Волновые профили характеризуются резким фронтом с длительностью около 2 нс, определяемой временным разрешением комплекса. Пиковые значения массовой скорости на профилях лежат в диапазоне 1,8–2 км/с. За фронтом для профилей характерен гладкий спад массовой скорости. При обработке первичных профилей исключалось искажающее влияние буферных слоев. Точка Жуге выявлялась на профилях их представлением в полулогарифмических координатах и дифференцированием на двух участках в соответствии с подходом [2]. С использованием литературных данных по ударной сжимаемости и скорости детонации высокоплотного ТАТБ построениями в координатах давление – массовая скорость вычислены параметры пика ЗНД и точки Жуге для исследованного ТАТБ пониженной плотности: $p_s = 32,2 \pm 0,6 \text{ ГПа}$, $u_s = 2,40 \pm 0,05 \text{ км/с}$, $p_J = 26,5 \pm 0,6 \text{ ГПа}$, $u_J = 1,99 \pm 0,04 \text{ км/с}$, $\tau_J = 108 \text{ нс}$. Эти значения хорошо согласуются с соответствующими параметрами ТАТБ разных плотностей и взрывчатых составов на основе ТАТБ. Полученные волновые профили содержат кинетическую информацию о зоне реакции, которая извлекается при расчетном моделировании выполненных экспериментов.

Литература

1. Е.А. Козлов, С.А. Бричиков, Д.С. Боярников, Д.П. Кучко, В.И. Таржанов, И.В. Теличко, А.В. Воробьев, Е.В. Какшина, Ю.С. Морева, А.В. Павленко, В.Н. Ногин, А.В. Петровцев, Д.М. Шалковский, Д.А. Варфоломеев. Динамические свойства стали 30ХГСА по результатам лазерно-интерферометрических измерений. Эксперимент и расчетно-теоретическое моделирование. Труды X Международной конференции «За-

бабахинские научные чтения», Снежинск, РФЯЦ – ВНИИТФ, 2010, С. 223.

2. С.Н. Любятинский, Б.Г. Лобойко. Зоны реакции детонации твердых ВВ. Труды V Международной конференции «Забахинские научные чтения», Снежинск, РФЯЦ – ВНИИТФ, 1999, с. 140–151.

STRUCTURE OF DETONATING FINE-GRAIN TATB REACTION ZONE. EXPERIMENT

E.A. Kozlov, V.I. Tarzhanov, I.V. Telichko,
A.V. Vorobyev, K.V. Levak, V.A. Matkin,
A.V. Pavlenko, S.N. Malyugina, A.V. Dulov

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

E-mail: V.I.Tarzanov@vniitf.ru

RFNC – VNIITF activities aimed to investigate the behavior and properties of materials under their dynamic loading using laser-interferometric diagnostics of processes [1] were continued by studying the structure of detonation wave reaction zone in the fine-grain low-density (1.815 g/cm^3) triaminotrinitrobenzene (TATB) with the help of VISAR laser interferometer. TATB charges with $\varnothing 60 \times 20 \text{ mm}$ and $\varnothing 60 \times 60 \text{ mm}$ were initiated by a plane detonation wave from the $\varnothing 60 \times 10 \text{ mm}$ boosting charge made of TNT/RDX55 and initiated by the lens charge. Velocity of contact surface between the lithium fluoride used as a window material and the thin buffer aluminum layer contacting TATB was registered. Time profiles of detonation were obtained with buffer aluminum layers having the thickness of 400, 300, 200, 100, and 20 μm , as well as without a buffer layer but with vacuum aluminum coating having the thickness of 0.3 μm . Wave profiles are characterized by a sharp front with $\sim 2\text{-ns}$ duration determined by interferometer resolution. Peak values of mass velocity on the profiles range from 1.8 to 2 km/s. Behind the front, smooth drop of mass velocity is typical for profiles. While processing primary profiles, distorting influence of buffer layers was excluded. Jouget point was found on the profiles by their representation in semilogarithmic coordinates and by differentiation in two intervals according to approach [2]. Literature data on shock compressibility and high-density TATB detonation rate were used to calculate in «pressure – mass velocity» coordinates the parameters of ZND peak and Jouget point for test low-density TATB: $p_s = 32.2 \pm 0.6 \text{ GPa}$, $u_s = 2.40 \pm 0.05 \text{ km/s}$, $p_J = 26.5 \pm 0.6 \text{ GPa}$, $u_J = 1.99 \pm 0.04 \text{ km/s}$, $\tau_J = 108 \text{ ns}$. These values are in good agreement with the appropriate parameters of TATB having various densities and TATB-based explosive compositions. Registered wave profiles contain kinetic information about the reaction zone and this information comes from numerical modeling of performed experiments.

References

1. E.A. Kozlov, S.A. Brichikov, D.S. Boyarnikov, D.P. Kuchko, V.I. Tarzhanov, I.V. Telichko, A.V. Vorobyev, E.V. Kakshina, Yu.S. Moreva, A.V. Pavlenko, V.N. Nogin, A.V. Petrovtsev, D.M. Shalkovsky, D.A. Varfolomeev. Dynamic properties of steel 30XGSA according to the results of laser-interferometric measurements. Experiment and calculation-theoretical modeling. Transactions of X International Conference «Zababakhin Scientific Talks», Snezhinsk, RFNC – VNIITF, 2010, p. 223.

2. S.N. Lyubyatinsky, B.G. Loboiko. Zones of solid HE detonation reaction. Transactions of V International Conference «Zababak-hin Scientific Talks», Snezhinsk, RFNC – VNIITF, 1999, p.140–151.

2-50

ГОРЕНИЕ И ДЕТОНАЦИЯ ПРОПАНОВОЗДУШНЫХ СОСТАВОВ В ДЕМОНСТРАЦИОННЫХ ОПЫТАХ

В.И. Таржанов, В.Г. Вильданов, В.И. Сдобнов,
И.В. Теличко, А.Д. Зинченко, А.Е. Макаров,
И.А. Литвиненко, В.А. Огарков, В.В. Власов,
А.В. Воробьев, И.Г. Корецкий, С.Л. Мухин,
А.Ф. Ханин, А.Н. Грачев,
В.А. Маткин, В.А. Поташников

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: V.I.Tarzanov@vniitf.ru

Приведены результаты двух демонстрационных опытов, поставленных для выявления условий развития детонации при воспламенении пропановоздушных составов в аварийных приземных облаках. Объемы модельных облаков с размерами $15 \times 6 \times 4,2$ м и $15 \times 6 \times 2$ м фиксировались пластиковыми палатками. Градиентная по длине область смеси исходных реагентов с зажигающими их горячими продуктами детонации создавалась при выбросе последних из отверстий в стенке трубы инъекции с размерами $\varnothing 0,82 \times 23$ м, проложенной сквозь пространство палатки. Детонация пропановоздушного состава в трубе инициировалась подрывом у ее торца заряда мощного ВВ. Продемонстрировано развитие спонтанной детонации в объеме, ограниченном с одной стороны вертикальной жесткой стенкой. Показано отсутствие детонации в аналогичном пропановоздушном объеме с аналогичной инъекцией ГПД при отсутствии вертикальной стенки. Сделан вывод о недостаточности одного лишь увеличения размеров области с горячими продуктами детонации и необходимости некоторого сжатия горячей смеси у препятствий.

COMBUSTION AND DETONATION OF PROPANE-AIR COMPOSITIONS IN DEMONSTRATION EXPERIMENTS

V.I. Tarzanov, V.G. Vildanov, V.I. Sdobnov, I.V. Telichko,
A.D. Zinchenko, A.E. Makarov, I.A. Litvinenko,
V.A. Ogarkov, V.V. Vlasov, A.V. Vorobyev, I.G. Koretsky,
S.L. Mukhin, A.F. Khanin, A.N. Grachev,
V.A. Matkin, V.A. Potashnikov

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

E-mail: V.I.Tarzanov@vniitf.ru

The paper presents the results of two demonstration experiments aimed to identify detonation occurrence conditions in the case when propane-air compositions inflame in the accident near-the-ground clouds. The

model clouds of size $15 \times 6 \times 4.2$ m and $15 \times 6 \times 2$ m were fixed by plastic tents. The length-gradient region of initial reagents mixed with hot detonation products (HDP) was formed when the latter were ejected from holes in the wall of the injection tube with the size $\varnothing 0,82 \times 23$ m. This tube was running through the tent space. Detonation of the propane-air composition in the tube was initiated by HE explosion near its face end. Spontaneous detonation was demonstrated to develop in the volume limited on one side by a vertical rigid wall. In the absence of the vertical wall, no detonation was observed in the similar propane-air volume with identical HDP injection. The conclusion is that solely increase in the size of the region with HDP is insufficient for detonation occurrence and that certain compression of the burning mixture near the barrier is also needed.

2-51

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛАЗЕРНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ: ФОТОХИМИЧЕСКИЙ И ТЕРМИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМЫ ИНИЦИИРОВАНИЯ

Э.Д. Алукер, А.Г. Кречетов,
А.Ю. Митрофанов, А.С. Зверев

Кемеровский государственный университет,
Кемерово, Россия

E-mail: lira@kemsu.ru

Практически единственным реальным методом повышения чувствительности ВВ к лазерному инициированию, не затрагивающим его чувствительности к другим воздействиям, остается управление оптической стадией процесса инициирования [1, 2].

Изучение возможностей управления оптической стадией процесса инициирования приводит к следующим выводам.

1. При возбуждении ТЭНа первой гармоникой неодимового лазера может быть реализован режим селективного фотоинициирования, заключающийся в фотовозбуждении в полосе с максимумом при $\lambda = 1020$ нм и термически активированной фрагментации фотовозбужденных состояний, приводящей к образованию активных радикалов, обеспечивающих развитие цепной реакции взрывного разложения. Однако прямое использование этого механизма ограничивается малым значением коэффициента поглощения.

2. Для повышения эффективности использования падающего светового потока может быть использовано увеличение длины траектории фотонов в образце за счет рассеяния на светорассеивающих включениях. Оптимизация размеров и концентрации светорассеивающих частиц а также технологии подготовки образцов могут, по-видимому, довести пороги лазерного инициирования до величин ≤ 1 Дж/см².

3. Эффективность метода введения светопоглощающих включений может быть значительно увеличена за счет оптимизации размера и формы включений. В частности, значительно более эффективным способом, по сравнению с методом «горячих точек», может быть метод «горячей поверхности», т. е. нанесение на поверх-

ность ВВ тонкого светопоглощающего слоя и использование геометрии «горячей оболочки», т. е. нанесение тонкого светопоглощающего слоя на отдельные зерна ВВ (окраска!). В этом случае порог инициирования можно понизить до значений 10 Дж/см².

В целом же, использование фотохимических механизмов инициирования, в частности механизма селективного фотоиницирования представляется более перспективным, по сравнению с термическими механизмами.

Литература

1. Aluker E.D., Krechetov A.G., Mitrofanov A.Y., Nurmukhmetov D.R., and Kuklja M.M. Laser Initiation of Energetic Materials: Selective Photoinitiation Regime in Pentaerythritol Tetranitrate // *J. Phys. Chem. C*, 2011. V. 115. N. 14. P. 6893–6901.
2. Алукер Э.Д., Кречетов А.Г., Митрофанов А.Ю. Условия реализации механизма теплового инициирования взрыва энергонасыщенных материалов импульсным лазерным излучением // *Бутлеровские сообщения*, 2010. Т. 23. № 14. С. 96–100.

EFFICIENCY OF LASER INITIATION: PHOTOCHEMICAL AND THERMAL INITIATION MECHANISM

E.D. Aluker, A.G. Krechetov,
A.Y. Mitrofanov, A.S. Zverev

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

E-mail: lira@kemsu.ru

About the only realistic method of increasing the sensitivity to laser initiation of explosives, not affecting its sensitivity to other influences, is control of the optical stud her initiation process [1, 2].

The study of management capabilities of the optical phase of the process of initiation leads to the following conclusions.

1. In the excitation of PETN first harmonic neodymium laser mode can be implemented selectively photoinitiation consisting of photo-excitation in the band with maximum at $\lambda = 1020$ nm, and thermally activated fragmentation of the photoexcited states, leading to the formation of active radicals, ensuring the development of a chain reaction of explosive decomposition. However, the direct use of this mechanism is limited by low value of absorption coefficient.

2. To improve the efficiency of the incident light beam can be used by increasing the length of the trajectory of photons in the sample due to scattering by light-scattering inclusions. Optimize the size and concentration of light-scattering particles as well as sample preparation technology may seem to bring laser initiation thresholds to values ≤ 1 J/cm².

3. The effectiveness of the method of introducing light-absorbing impurities can be significantly improved by optimizing the size and shape of inclusions. In particular, much more effective way than the method of «hot spots» may be the method of «hot surface», i.e. coating the surface of a thin light-absorbing layer of explosives and the use of the geometry of the «hot shell», i.e. light-absorbing layer is a thin application of the individual grains of explosive. In this case, the initiation threshold can be lowered to values of about 10 J/cm².

In general, the use of photochemical mechanisms of initiation, in particular the mechanism of selective photoinitiation is more promising in comparison with the thermal mechanism.

References

1. Aluker E.D., Krechetov A.G., Mitrofanov A.Y., Nurmukhmetov D.R., and Kuklja M.M. Laser Initiation of Energetic Materials: Selective Photoinitiation Regime in Pentaerythritol Tetranitrate // *J. Phys. Chem. C*, 2011. V. 115. N. 14. P. 6893–6901.
2. Aluker E.D., Krechetov A.G., Mitrofanov A.Y. Usloviya realizatsii mekhanizma teplovogo initsirovaniya vzryva energonasyshennykh materialov impulsnym lazernym izlucheniem // *Butlerov Communication*, 2010. V. 23. No 14. P. 96–100 [in Russian].

2-52

ФОТОТЕРМИЧЕСКАЯ И ФОТОФРАГМЕНТАЦИЯ МОЛЕКУЛ ТЭНА ПРИ ФОТОИНИЦИИ

Э.Д. Алукер, А.Г. Кречетов, В.Н. Швайко,
Д.А. Мальцев, Н.В. Полеева

Кемеровский государственный университет,
Кемерово, Россия

E-mail: lira@kemsu.ru

Изучалось влияние температуры на порог лазерного инициирования (1060 нм, 20 нс). Исследовалось инициирование образца с открытой поверхностью (для чистого тэна и с добавлением 0,5% светорассеивающей добавки – MgO), а также образца с поверхностью, закрытой кварцевой пластинкой.

Для чистого ТЭНа с открытой поверхностью зависимость порога инициирования от температуры оказалась термоактивационной с энергией активации $0,4 \pm 0,05$ эВ, обусловленная фототермическим характером инициирования: фотовозбуждение в полосе 1020 нм и термоактивированная фрагментация возбужденного состояния ($E = 0,4$ эВ), приводящая к появлению активного радикала (по-видимому, NO₂).

Однако, при усложнении условий инициирования (закрытая поверхность, добавка MgO), термоактивационная зависимость наблюдалась только при достаточно высоких температурах. Понижение же температуры приводило к существенному ослаблению зависимости от температуры.

Мы полагаем, что такое изменение характера температурной зависимости может быть связано с особенностями процесса фрагментации молекул в дефектных областях кристаллической решетки, где облегчен процесс удаления отрываемого радикала NO₂, и фотовозбуждение может протекать без термоактивационной стадии.

Изменение соотношения вкладов этих механизмов в создание «затравочной» концентрации активных радикалов при различных условиях инициирования могло бы послужить причиной наблюдаемых различий в характере температурных зависимостей порога инициирования при различных условиях эксперимента.

PHOTOTHERMAL AND PHOTOFRAGMENTATION OF MOLECULES PETN IN PHOTOINITIATION

E.D. Aluker, A.G. Krechetov, V.N. Shvayko,
D.A. Maltsev, N.V. Poleeva

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

E-mail: lira@kemsu.ru

We investigated the effect of temperature on the threshold of laser initiation (1060 nm, 20 ns). We studied the initiation of the sample with an open surface (for pure PETN and 0.5% with the addition of a light-scattering additives – MgO), as well as the sample surface, a closed quartz plate.

For pure PETN with an open surface dependence of the threshold of initiation of the temperature was thermally activated with an activation energy of 0.4 ± 0.05 eV. Due to the nature of the photothermal initiation: photoexcitation at 1020 nm band and thermally activated fragmentation of the excited state ($E = 0.4$ eV), which leads to the appearance of active radical (apparently, NO_2).

However, with increasing complexity of the initiation conditions (closed surface, the addition of MgO), thermally activated dependence of the observed only at sufficiently high temperatures. Lowering the temperature also led to a substantial weakening of the temperature.

We believe that such a change in the temperature dependence may be related to the process of fragmentation of molecules in the defective regions of the crystal lattice, which facilitated the removal of the radical severing, NO_2 , and photoexcitation can occur without thermal activation step.

Changing the ratio of the contributions of these mechanisms in the creation of «seed» the concentration of active radicals under different conditions of initiation could be the reason for the observed differences in the nature of the temperature dependence of the threshold of initiation under different experimental conditions.

2-53

РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕПЛООВОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Э.Д. Алукер, А.Ю. Митрофанов, А.В. Бояркина,
А.С. Дулепова, Н.Н. Ильякова, А.О. Терентьева

Кемеровский государственный университет,
Кемерово, Россия

E-mail: lira@kemsu.ru

Анализируются условия, при которых может быть реализован тепловой механизм. Рассматриваются два случая: однородный нагрев слабо поглощающего лазерное излучение ВВ и нагрев специально введенных в ВВ светопоглощающих частиц («горячих точек»), нагреваемых лазерным излучением.

Принимается, что инициирование взрыва происходит при нагреве ВВ, выше температуры вспышки, предполагается адиабатический режим нагрева.

Для случая однородного нагрева образца при обычных для большинства вторичных ВВ значениях плотности, теплоемкости, температуры вспышки и коэффициента поглощения, получается расчетное пороговое значение, по крайней мере, на 1–2 порядка выше фактического, что однозначно свидетельствует о нетепловом механизме инициирования.

Для случая сферических поглощающих частиц радиусом r в прозрачном ВВ принимается, что инициирование взрыва происходит при нагреве критической толщины слоя ВВ (a), окружающего поглощающее включение выше температуры вспышки в адиабатическом режиме нагрева. Зависимость пороговой плотности энергии от размера частиц представляет из себя кривую, проходящую через минимум, который находится при $r \sim a$. При $r \ll a$, пороговая плотность энергии $H_c \sim a^3/r^2$, а при $r \gg a$, $H_c \sim r$. Такой характер зависимости обуславливает бесперспективность попыток создания «горячих точек» путем введения в матрицу ВВ наноразмерных частиц светопоглощающего вещества.

В случае, если геометрия вводимых частиц – это пластина, ориентированная перпендикулярно лучу лазера, получаем линейную зависимость порога от толщины покрытия с наибольшей эффективностью при минимальных толщинах. Данная геометрия является энергетически более выгодной, по сравнению с геометрией «горячих точек».

IMPLEMENTATION OF THERMAL INITIATION EXPLOSIVES PULSED LASER RADIATION

E.D. Aluker, A.Y. Mitrofanov, A.V. Boyarkina,
A.S. Dulepova, N.N. Ilyakova, A.O. Terentyeva

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

E-mail: lira@kemsu.ru

The conditions under which can be implemented by the thermal mechanism. Two cases are considered: homogeneous heating of a weakly absorbing laser light and heat explosives specially introduced in the light-absorbing particles of explosives («hot spots»), heated by laser radiation.

It is assumed that the initiation of the explosion is the explosive when heated above the flash point, it is assumed adiabatic heating.

For the case of homogeneous heating of the sample at normal for most values of secondary explosives density, heat capacity, the flash and the absorption coefficient, obtained the estimated value of the threshold for at least 1–2 orders of magnitude higher than the actual, which clearly indicates the non-thermal mechanism of initiation.

For the case of spherical absorbing particles of radius r in a transparent explosive is assumed that the initiation of the explosion involves the heating of the critical layer thickness of explosives (a), surrounding an absorbing inclusion above the flash point in the adiabatic heating. The dependence of the threshold energy density of the particle size is a curve passing through a minimum, which is located at $r \sim a$. When $r \ll a$, the threshold energy density $H_c \sim a^3/r^2$, and if $r \gg a$, $H_c \sim r$. This dependence causes the futility of attempts to create «hot spots» by the introduction nanometer-sized particles light-absorbing substance into the matrix of explosive.

If the input geometry of the particles – a plate oriented perpendicular to the laser beam, we obtain a linear dependence of the threshold on the thickness of the coating with the greatest efficiency in of minimal thickness. This geometry is energetically more favorable compared to the geometry of the «hot spots».

2-54

**ЛАЗЕРНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ
ТЕТРАНITРОПЕНТАЭРИТРИТА
С ДОБАВКАМИ НАНОЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ
И ОКСИ АЛЮМИНИЯ**

Б.П. Адуев¹, Д.Р. Нурмухаметов¹,
Р.И. Фурега¹, С.Ю. Бугров²

¹Институт углекислоты и химического материаловедения
СО РАН, Кемерово, Россия

²ФБГОУ Кемеровский государственный университет,
Кемерово, Россия

E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

Исследованы зависимости вероятности взрыва при импульсном лазерном воздействии (1064 нм, 12 нс) на образцы тетранитропентаэритрита (тэна) с плотностью $\rho = 1,73 \text{ г/см}^3$ с различным содержанием наночастиц алюминия. Размер частиц в максимуме распределения 100 нм, содержание активного Al в частице 73% по массе и 27% Al_2O_3 . Установлено, что максимальная чувствительность ($H_{кр} = 1,75 \text{ Дж/см}^2$) достигается при оптимальной концентрации наночастиц 0,1% по массе. При этом чувствительность смеси к лазерному инициированию увеличивается в ~100 раз относительно образцов, не содержащих наночастицы. Для выяснения влияния рассеяния и поглощения излучения наночастицами проведены эксперименты по измерению порога взрывчатого разложения тэна с использованием оптимальной концентрации наночастиц и различным содержанием активного алюминия в частице в пределах 73–0% (Al_2O_3) по массе, которое достигалось отжигом исходных частиц до различной степени окисления. Наночастицы Al_2O_3 прозрачны для лазерного излучения, поэтому в данном случае влияние на порог взрывчатого разложения могут оказывать только эффекты рассеяния излучения. Показано, что в наблюдаемый эффект снижения порога взрывчатого разложения тэна основной вклад вносят частицы с высоким содержанием активного алюминия. Этот результат позволяет сделать вывод, что в результате поглощения излучения, происходит нагрев наночастиц с образованием очагов химического разложения в окрестности «горячей точки», а эффекты рассеяния излучения играют второстепенную роль.

**LASER INITIATION OF PENTAERYTHRITOL
TETRANITRATE WITH ADDITIVES OF
ALUMINIUM AND ALUMINA NANOPARTICLES**

B.P. Aduev¹, D.R. Nurmukhametov¹,
R.I. Furega¹, S.Ju .Bugrov²

¹Institute of Coal Chemistry and Material Science, SB RAS,
Kemerovo, Russia

²Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

Dependences of explosive probability under impulse laser exposure (1064 nm, 12 ns) of pentaerythritol tetranitrate (PETN) with the density $\rho = 1.73 \text{ g/sm}^3$ with various content of aluminum nanoparticles were investigated. Particles size in the maximum distribution is 100 nm, content of active Al in a particle is 73% mass and 27% Al_2O_3 . It was observed the more sensitivity ($H_{cr} = 1.75 \text{ J/sm}^2$) is achieved when optimal concentration of nanoparticles is 0.1% mass. At that mixture sensitivity to the laser initiation rises in 100 times in comparison with the same for samples without nanoparticles. For clearing of influence of dispersion and absorption of radiation by nanoparticles the following experiments were realized. PETN explosive decomposition threshold was measured. Optimal concentration of nanoparticles with various content of active aluminum in a particle within 71%–0% (Al_2O_3) was used. This variance of active aluminum content was obtained by annealing of initial particles up to various oxidation rates. Al_2O_3 particles are transparent for laser radiation and in this case only effects of radiation dispersion can influence to threshold of explosive decomposition. It is showed the observed effect of falling of PETN explosive decomposition threshold is based mainly on presence of particles with high concentration of active aluminum. This fact results in the conclusion that as a result of radiation absorption there is heating of nanoparticles with forming focuses of chemical decomposition about a «hot-point», and dispersion effects play sidetrack.

2-55

**РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА
МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ
В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ**

В.Г. Кригер¹, А.В. Каленский¹, А.А. Звекон¹,
И.Ю. Зыков¹, Б.П. Адуев²

¹ФБГОУ ВПО Кемеровский государственный университет,
Кемерово, Россия

²Институт углекислоты и химического материаловедения
СО РАН, Кемерово, Россия

E-mail: kriger@kemsu.ru, lira@kemsu.ru

Работа посвящена модернизации микроочаговой модели лазерного инициирования теплового взрыва энергетических материалов. Один из основных постулатов модели состоит в том, что эффективности поглощения света не зависит от размера включения. Сечение поглощения обычно принимается равным геометрическому

сечению включения. Цель работы: расчет в рамках теории Ми коэффициентов эффективности поглощения первой и второй гармоник неодимового лазерного излучения наноразмерными металлическими включениями в объеме энергетических материалов (азид серебра, азид свинца и пентаэритрит тетранитрата (ТЭНа)).

Коэффициенты эффективности поглощения (Q_{abs}) рассчитываются как сумма бесконечного ряда от коэффициентов разложения электрического и магнитного поля рассеянной световой волны по специальным функциям Риккати-Бесселя с использованием рекуррентных соотношений между ними. Показано, что для большинства металлов максимум эффективности поглощения приходится на область радиусов включений 70–100 нм. При меньших значениях радиуса включения Q_{abs} монотонно уменьшается и стремится к нулю (при $r \rightarrow 0$ по закону Рэлея), при больших – Q_{abs} уменьшается с затухающими осцилляциями, приближаясь к постоянному значению меньше единицы. Максимальный коэффициент эффективности поглощения лежит в интервале 0,1–1,9, причем его значение выше у веществ с менее выраженными металлическими свойствами. Так для включений серебра в матрице ТЭНа $Q_{abs} = 0,1087$, а для железа в той же матрице 1,6731.

Результаты расчетов свидетельствуют, что наиболее перспективными для практических применений в качестве поглощающих лазерное излучение добавок в энергетические материалы являются наноразмерные металлические частицы подгруппы железа с радиусом порядка 100 нм, для которых коэффициенты эффективности поглощения света максимальны. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 11-03-00897).

CALCULATION OF LIGHT ABSORBANCE EFFICIENCIES OF METAL INCLUSIONS IN ENERGETIC MATERIALS

V.G. Kriger¹, A.V. Kalenskiy¹, A.A. Zvekov¹,
I.Yu. Zыkov¹, B.P. Aduев²

¹Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

²Institution for Chemistry of Coal and Chemical Material Science, Kemerovo, Russia

E-mail: kriger@kemsu.ru, lira@kemsu.ru

The paper is devoted to the hot-spot model of energetic materials heat explosion initiation by laser pulse updating. The independence of light absorbance efficiency on inclusion size is postulated in the model. Absorbance cross section is usually taken equal to the geometric cross section of inclusion. The aim of the work is calculation of absorbance coefficients of first and second harmonics of neodymium laser light by nano metal inclusions in energetic materials such as azide silver, azide lead and pentaerythritol tetranitrate (PETN).

Absorbance coefficients (Q_{abs}) were calculated as an infinite series expansion of magnetic and electric field in the scattered light wave into Rikky-Bessels' functions sum. The recurrent relationships for these functions were used. It was shown that for the most of metals maximum absorbance efficiency have inclusions with radii 70–100 nm. When the inclusion's radius is lower Q_{abs} monotonically decreases to the zero value (Rayleigh's limit), when the

radius is higher, Q_{abs} decreases with fading oscillation and tends to a constant value less than unity. Maximum absorbance coefficient has value between 0.1 and 1.9. The less metal features has a metal the higher this margin. For instance, $Q_{abs} = 0.1087$ for a silver inclusion in the PETN matrix and 1.6731 for an iron inclusion in the same matrix.

The calculation results states that the most promising for practical utilization as an additive for energetic materials are nano particles of iron group metals having radius about 100 nm which have maximum light absorbance efficiency. The work is supported by RFBR (grant № 11-03-00897).

2-56

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУР РАЗОГРЕВА ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ВКЛЮЧЕНИЙ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

А.В. Каленский, А.А. Звекков,
И.Ю. Зыков, А.П. Никитин

ФГБОУ ВПО Кемеровский государственный университет,
Кемерово, Россия

E-mail: kriger@kemsu.ru

Микроочаговая модель теплового взрыва энергетических веществ при иницировании излучением основывается на предположении, что в объеме вещества находятся сильнопоглощающие включения. Согласно модели, разогрев последних импульсным излучением может привести к образованию очага реакции и переходу разложения в самоускоряющийся режим. Оценка температуры разогрева включения является первым этапом при определении критических условий иницирования процесса в рамках данной модели. Целью работы является оценка максимальной температуры разогрева включения излучением с учетом температурной зависимости теплоемкости и процесса его плавления.

При расчетах использовалось приближения однородного прогрева металлического включения. Численное интегрирование проводили методом Рунге-Кутты 1–5 порядка с переменным шагом по времени. Шаг по координате составлял 1/25 долю радиуса включения. При расчетах использовали теплофизические параметры алюминия и пентаэритрит тетранитрата.

Для учета фазовых переходов предполагалось, что он происходит не при одной температуре, а в интервале температур ($\Delta T = 10$ К) вблизи точки плавления. С формальной точки зрения это приводит к эффективному увеличению теплоемкости вблизи температуры фазового перехода. Из физики конденсированного состояния известно, что теплоемкость твердого тела зависит от температуры, в расчетах эта зависимость задавалась в полиномиальном виде.

В зависимости от значения плотности энергии лазерного импульса, могут наблюдаться три режима разогрева:

1. Плотность энергии оказывается недостаточной для разогрева включения до температуры плавления, на кинетической зависимости отсутствуют участки параллельные временной оси.

2. Плотность энергии импульса достаточна для нагрева включения до температуры плавления, но не достаточна для фазового перехода, область максимума кинетической зависимости температуры включения от времени имеет вид плато.

3. Плотность энергии импульса достаточна для перехода включения в расплавленное состояние, на кинетической зависимости наблюдается два участка плато, один из которых соответствует плавлению при нагреве и затвердеванию при охлаждении после окончания импульса.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 11-03-00897).

ESTIMATION OF INCLUSIONS' TEMPERATURES IN ENERGETIC MATERIALS HEATED BY LASER PULSE

A.V. Kalenskiy, A.A. Zvekov, I.Yu. Zykov, A.P. Nikitin

Kemerovo state university, Kemerovo, Russia

E-mail: kriger@kemsu.ru

The hot-spot model of energetic materials heat explosion initiation by laser pulse is based on supposition that there are light absorbing inclusions in the substance volume. In accordance with the model their heating by laser pulse can cause a reaction area formation and self-accelerating decomposition initiation. The maximum inclusions' temperatures estimation is the first stage of the critical condition of the reaction initiation detection in terms of the model.

The aim of the work is estimation of the highest inclusions' temperatures in energetic materials heated by radiation with regard for their heat capacity temperature dependence and melting processes.

An approximation of metal inclusion's homogeneous heating is applied in calculations. Numerical integration is carried out by Runge-Kutta 1-5th order method with variable step of time. Step of coordinate was 1/25 of inclusions radius. Thermal parameters of aluminum and pentaerythritol tetranitrate (PETN) are used in calculations.

It was assumed that the phase transition occurs not at the constant temperature but in a temperature range ($\Delta T = 10$ K) near the melting point. From the formal point of view it brings into effective increase of heat capacity near the phase transition. As it is known from physics of the condensed state solids heat capacity depends on temperature; this dependence is set in the polynomial form.

There are three heating modes in dependence on value of laser energy density:

1. Laser energy density is not enough for inclusions' heating to the melting temperature, there is not parts parallel to time axis on the temperature kinetics.

2. Laser energy density is enough for heat inclusions to melting temperature, but is not enough for the phase transition, there is a maximum looking like a plateau on the temperature kinetics.

3. Laser energy density is enough for inclusions melting, there are two parts on the temperature kinetics that look like plateau, one of them corresponds to the melting and another to the freezing.

The work is supported by RFBR (grant № 11-03-00897).

2-57

ИНИЦИИРОВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ ТЕТРАНИТРОПЕНТАЭРИТРИТА ИМПУЛЬСНЫМ ПУЧКОМ ЭЛЕКТРОНОВ

Б.П. Адуев, Г.М. Белокуров,
С.С. Гречин, И.Ю. Лисков

Институт углеродной и химического материаловедения
СО РАН, Кемерово, Россия

E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

Приводится обзор результатов по измерению детонационных и спектрально-кинетических характеристик взрывного свечения и оптического поглощения монокристаллов тетранитропентаэритрита (тэна), инициируемых импульсным пучком электронов (0,25 МэВ, 20 нс, 15 Дж/см²).

С помощью стрик-камеры «Взгляд-2А» измерена пространственно динамическая картина свечения при взрыве монокристаллов тэна толщиной 1–1,5 мм. Установлено, что при воздействии пучка электронов с плотностью энергии 15 Дж/см² из облученной части кристалла распространяется ударная волна, при отражении которой от акустически жесткой преграды на тыльной стороне кристалла возникает детонационная волна, которая распространяется в сторону облученной области со скоростью 8000–8500 м/с. При отсутствии жесткой преграды детонация не наблюдается при плотностях энергии 40 Дж/см², однако присутствует электрический пробой, предвзрывная люминесценция и взрыв облученной части кристалла. С использованием полихроматора в сочетании со стрик-камерой измерены спектрально-кинетические характеристики взрывного свечения и оптического поглощения монокристаллов тэна, а также свечение продуктов взрыва. В спектрах свечения кристаллов на радиoluminesцентном этапе обнаружены экситоны (3,1 эВ), NO₂-радикалы (2,4 эВ) и, предположительно, NO₃-радикалы (1,5 эВ) на детонационном этапе доминирует полоса 1,5 эВ. В спектрах поглощения в момент воздействия пучка электронов обнаружены NO₂ и NO₃-радикалы.

Анализ результатов позволяет сделать вывод, что механизм инициирования детонации имеет ударно-волновой характер. Роль электронного пучка состоит в том, что при превышении порога в облученном слое во время импульса облучения инициируется экзотермическая реакция. В результате поглощения энергии пучка и тепловыделения химической реакции формируется усиленная ударной волна. Инициирование реакции связано, по видимому, с отрывом NO₃-группы от молекулы тэна.

INITIATION OF PENTAERYTHRITOL TETRANITRATE MONOCRYSTALS BY IMPULSE BEAM OF ELECTRONS

B.P. Aduев, G.M. Belokurov,
S.S. Grechin, I.Ju. Liskov

Institute of coal Chemistry and Material Science SB RAS,
Kemerovo, Russia

E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

Results of measurement of knock and spectral-kinetic values of explosive luminescence and optical absorption of pentaerythritol tetranitrate (PETN) monocrystals initiated by impulse beam of electrons (0.25 MeV, 20 ns, 15 J/cm²) are surveyed.

Spatial and dynamic picture of luminescence under explosion of PETN monocrystals with the thickness 1–1.5 mm was measured by using streak-camera «Vzglyad-2A». It is discovered under impact of electron beam with energy density 15 J/cm² shock wave spreads from irradiated part of crystal. When it is reflected from rigid barrier, on the back side of the crystal appears a detonation wave which spreads to the side of irradiated area with the velocity 8000–8500 m/s. When there is no a rigid barrier, detonation is not observed (under energy density 40 J/cm²), but there are electric disruption, fore-explosive luminescence and explosive of irradiated crystal area. Spectral-kinetic values of explosive luminescence, optical absorption of PETN monocrystals and luminescence of explosion products are measured with using polychromator coupled with streak-camera. In the spectrums of crystal luminescence at the radioluminescence stage excitons (3.1 eV), NO₂-radicals (2.4 eV) and, presumably, NO₃-radicals (1.5 eV) are observed. At the detonation stage band 1.5 eV is dominated one. At the moment of electron beam impact in the absorption spectrums NO₂ and NO₃-radicals are observed.

As a conclusion it can be noticed mechanism of detonation initiation is a shock-wave type. The action of electron beam results in threshold crossing in the irradiated layer and as a result of that initiation of exothermic reaction. Gain shock wave is formed as a result of beam energy absorption and heat generation of chemical reaction. Apparently reaction initiation relates to tearing away NO₃-group from PETN molecule.

2-58

ЛАЗЕРНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ТЕТРАНИТРОПЕНТАЭРИТРИТА С ДОБАВКАМИ МИКРОЧАСТИЦ УГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА «KEMERIT®»

Б.П. Адуев, Д.Р. Нурмухаметов, Р.И. Фурега,
Н.В. Нелюбина, Ч.Н. Барнаков

Институт углеродной и химической материаловедения
СО РАН, Кемерово, Россия

E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

Микроочаговая теория лазерного зажигания энергетических материалов базируется на поглощении из-

лучения оптическими неоднородностями, в результате чего происходит образование «горячей точки» и очага химического разложения в ее окрестности. Однако в настоящее время теория не учитывает ряд факторов, например, роль удельной поверхности включений, что может увеличивать площадь контакта с матрицей ВВ. Не рассматривается также возможность экзотермического окисления частицы в процессе нагрева лазерным излучением, что увеличит вероятность образования очага химического разложения. В настоящей работе в качестве включений в тетранитропентаэритрит использованы частицы размером ~1 мкм наноструктурированного углеродного материала «KEMERIT®», исходным продуктом для синтеза которого является каменный уголь [1]. Частицы имели удельную поверхность $S_{уд} = 900 \text{ м}^2/\text{г}$. Сравнительные измерения методом дифференциально-термического анализа показали, что энерговыделение на единицу массы в интервале 200–900 К в три раза превышает таковое для наночастиц Al при отжиге на воздухе при атмосферном давлении.

Использовались образцы с плотностью $\rho = 1,73 \text{ г/см}^3$. Исследовалась зависимость критической плотности энергии соответствующей 50% вероятности взрыва от концентрации включений при иницировании импульсами YAG : Nd³⁺ лазера (1064 нм, 12 нс). Установлено, что концентрация включений, при которой порог взрывчатого разложения достигает минимального значения ($H_{кр} = 3,2 \text{ Дж/см}^2$) составляет 0,1–0,3% по массе. Эксперимент, с использованием наночастиц Al, размером ~100 нм дает почти вдвое меньшую величину $N_{кр}$. Однако следует учесть, что расчеты в рамках микроочаговой теории зажигания для лазерных импульсов $\tau \sim 10 \text{ нс}$ дают оптимальный размер включений ~100–200 нм [2]. В связи с этим следует ожидать лучшего результата при использовании данного материала с меньшим размером частиц. Полученный результат свидетельствует о необходимости учета удельной поверхности включений, либо их экзотермического окисления, однако установление того какой, из этих факторов является главным, требует дальнейших экспериментальных исследований.

Литература

1. Патент РФ №2206394 Способ получения наноструктурированного углеродного материала. Барнаков Ч.Н., Сеит-Аблаева С.К., Козлов А.П. и др. Опубл. 20.06.2003. Бюл. № 17.
2. Александров Е.А., Вознюк А.Г., Ципилев В.П. Влияние поглощающих примесей на зажигание ВВ лазерным излучением // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 26, № 1. С. 3–9.

LASER INITIATION OF PENTAERYTHRITOL TETRANITRATE WITH ADDITIVES OF MICROPARTICLES OF CARBON MATERIAL «KEMERIT®»

B.P. Aduев, D.R. Nurmukhametov, R.I. Furega,
N.V. Nelyubina, Ch.N. Barnakov

Institute of Coal Chemistry and Material Science, SB RAS,
Kemerovo, Russia

E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

Microsources theory of laser lighting of energy materials is based on radiation absorption by optical hetero-

geneity, as a result of that there is forming of «hot point» and source of chemical decomposition next to. However at present this theory to leaves out of account a number of factors, e. g., part of specific surface of additives that can be resulted in increasing of contact with matrix of explosives. As well it leaves out of account possibility of exothermic oxidation of a particle in the process of heating by laser radiation that can results in forming of source of chemical decomposition. In the present as additives in pentaerythritol tetranitrate (PETN) particles of nanostructured carbon material «KEMERIT®» with size ~ 1 mcm were used, coal is a raw product for synthesis of it [1]. Specific surface of particles is $S_{sp} = 900$ m²/g. By differential-thermal analysis (DTA) it was established in interval 200–900°K energy-release per mass unit for this type of samples is more than for samples with Al in three times when annealing is realized in air and under atmosphere pressure.

Samples with density $\rho = 1.73$ g/sm³ were used. Dependence of critical energy density, which corresponds to 50% probability of explosion, on additives concentration under initiation by YAG : Nd³⁺ + laser impulses (1064 nm, 12 ns) was investigated. It was established additives concentration, when explosive decomposition threshold is minimum ($H_{cr} = 3.2$ J/sm²), is 0.1–0.3 mass%. With using Al nanoparticles (size ~ 100 nm) the value of H_{cr} is less twice. However it should be noticed in the context of microsources lighting theory calculations for laser impulses $\tau \sim 10$ ns show optimal size of additives ~ 100 –200 nm [2]. In this connection the result for this material with less size of particles should be better. Obtained result is an evidence for necessity of taking into account of additives specific surface or their exothermic oxidation. However for clarification what factor is the main one subsequent experiments are required.

References

1. Patent RF №2206394 The way of obtaining of nanostructured carbon material. Barnakov Ch.N., Seit-Ablaeva S.K., Kozlov A.P. and others. Publication 20.06.2003. Bul. № 17.
2. Alexandrov E.A., Voznyuk A.G., Csipilev V.P. Influence of absorbent additives on Explosives lighting by laser radiation // Physics of combustion and explosion. 1989. V. 26, № 1. P. 3–9.

2-59

АНАЛИЗ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЦЕПНОЙ РЕАКЦИИ ВЗРЫВНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В.Г. Кригер, А.В. Каленский,
Е.А. Гришаева, А.А. Звекон

ФГБОУ ВПО Кемеровский государственный университет,
Кемерово, Россия
E-mail: kriger@kemsu.ru

Работа посвящена анализу модели разветвленной твердофазной цепной реакции с ингибированием продуктами реакции и учетом изменения температуры в ходе процесса. В модели объединены процессы, ранее исследованные раздельно при термическом, фото-, радиационно-химическом и взрывном разложении:

- генерация электронно-дырочных пар за счет энергии внешнего излучения, химической реакции;

- разложение анионной подрешетки за счет локализации двух дырок на катионной вакансии, с образованием активированного комплекса N₆ и его последующим распадом до молекулярного азота и выделением значительной энергии;

- участие нанокластеров металла, растущих по схеме Митчелла в процессах рекомбинации электрон-дырочных пар.

Анализ модели позволил определить области устойчивости системы, когда процесс разложения протекает в квазистационарном режиме, найти аналитические выражения для концентраций всех реагентов и промежуточных продуктов реакции (всего 18), определить условия перехода реакции в самоускоряющийся режим, найти условия развития реакции взрывного разложения по цепному или тепловому механизму.

Для кинетического анализа модели был создан пакет прикладных программ. Рассчитаны закономерности:

- перехода реакции в стационарное состояние в зависимости от температуры кристалла и интенсивности внешнего воздействия,
- разложения образца при нагреве с различными скоростями,
- перехода реакции в самоускоряющийся режим в зависимости от условий нагрева и облучения кристалла.

Показана возможность возникновения затухающих автоколебаний концентраций носителей цепи после окончания внешнего воздействия, рассчитаны зависимости периода колебаний и амплитуды максимума концентраций реагентов от параметров модели. Рассчитана зависимость длительности индукционного периода от начальной температуры образца. Длительность индукционного периода уменьшается при росте температуры. Энергия активации в диапазоне температур от 500 до 600 К составляет 1,37 эВ. При дальнейшем увеличении температуры энергия активации уменьшается до 0,23 эВ. В этом температурном диапазоне отсутствует стадия разогрева вещества, а концентрация реагентов не является равновесной, что свидетельствует о цепном характере взрыва.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 11-03-00897).

NON-ISOTHERMAL CHAIN BRANCHING REACTION OF ENERGETIC MATERIALS EXPLOSIVE DECOMPOSITION ANALYSIS

V.G. Kriger, A.V. Kalensky,
E.A. Grishaeva, A.A. Zvekov

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia
E-mail: kriger@kemsu.ru

In the present paper a solid state chain branching reaction model that takes into account inhibition by reaction products and temperature changing during the process is analyzed. The model combines processes which were researched earlier separately during thermo, photo-, radiochemical and explosive decomposition such as:

- Electron-hole pairs generation by incident irradiation and chemical reaction.
- Reaction in the anion sublattice has two stages. The first one is two holes localization on a cation vacancy

with N_6 complex formation, the second stage is its dissociation to molecular nitrogen with a substantial amount of energy releasing.

– Metal nano clusters growing according to the Mitchell's mechanism participate in electron-hole recombination processes.

The model analysis allowed determination of the boundaries of steadiness when a sample decomposes in the steady state regime; receiving of analytical expressions for all the reaction products (18 species), determination of the conditions of self-acceleration decomposition mode realization; understanding of condition of chain and thermo mechanisms of explosion initiation.

A special complex of computer programs was elaborated for the model kinetic analysis. Following dependences were calculated:

- kinetics of the decomposition going to a steady state under different temperatures and incident influence intensity;
- explosive decomposition when a sample was heated with different rates of temperature rising;
- kinetics of self-accelerated decomposition under different conditions of heating and incident irradiation.

The possibility of chain carrier's concentration auto-oscillations with decreasing amplitude after the external influence ending was shown. The dependences of the oscillations period and maximum chain carrier's concentration on the model parameters were calculated. The dependence of the initiation delay on the initial sample temperature was calculated. Activation energy for the temperatures between 500 and 600 K is 1.37 eV. At higher temperatures the activation energy decreases to 0.23 eV. There is no stage of the substance heating in this temperature range and the chain carrier's concentration exceeds the equilibrium one which witnesses chain nature of the explosion.

The work is supported by RFBR (grant № 11-03-00897).

2-60

ПЕРВОПРИНЦИПНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ АЗИДА СЕРЕБРА ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Ю.Н. Журавлев¹, В.М. Лисицын²

¹ФГБОУ ВПО Кемеровский государственный университет,
Кемерово, Россия

²ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский Томский
политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: zhur@kemsu.ru; lisitsyn@tpu.ru

Первопринципным методом теории функционала плотности в базе локализованных орбиталей исследованы структурные, электронные, колебательные, термодинамические свойства и реакционная способность орторомбической, тетрагональной и моноклинной фаз азидов серебра. Для адекватного учета давления и температуры используется квазигармоническая модель Дебая. Реакционная способность азидов серебра анализируется с помощью энтальпийного и энтропийного факторов и констант равновесия.

Реакционная способность азидов серебра анализируется с помощью термодинамических функций для трех реакций $2AgN_3 \rightarrow 3N_2 \uparrow + Ag_2$ (I), $2AgN_3 \rightarrow 2N_3 \uparrow + Ag_2$ (II), $2AgN_3 \rightarrow 3N_2 \uparrow + 2Ag_{sol}$ (III). Принципиальная возможность разложения следует из возможности образования $N_3^- \rightarrow N_3^0$, которая является эндотермической и требует преодоления энергетического барьера $207,4 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ (2,15 eV), что практически совпадает с рассчитанной шириной запрещенной зоны. В качестве промежуточной рассматривается бимолекулярная модель с образованием макромолекулы N_6 и наиболее устойчивой оказалась форма с симметрией C_i .

Конечным продуктом разложения азидов серебра является газ, и поэтому разность энтропий реакции I–III положительная, разность энтальпий для реакций I, II положительная, но для реакции I энтропийный фактор превышает энтальпийный, поэтому такая реакция может протекать в положительном направлении только при $T > 200 \text{ K}$. Реакция же III осуществима при любых условиях.

При увеличении давления HP- AgN_3 энтальпия уменьшается, а энтропийный фактор практически не изменяется, в результате чего при $P > 11,6 \text{ GPa}$ реакция II становится принципиально осуществимой, а при $P > 14,8 \text{ GPa}$ экзотермической, т. е. может протекать самопроизвольно. Поскольку результатом такой реакции является образование свободных дырок N_3^0 , то давление в состоянии инициировать процесс твердофазного разложения.

В качестве возможной модели микроочагов реакции – горячих точек – рассматривается образование за счет надбарьерных туннельных переходов атомов азота в новое симметричное кристаллографическое положение метастабильной фазы динитрида нитрида серебра $AgNN_2$, которое представляет собой жесткий каркас из нитрида серебра, внутри которого как в клетке находится практически нейтральная молекула азота. По своим физическим свойствам оно резко отличается от исходного азидов серебра. Наличие таких областей в матрице AgN_3 приведет к гигантским внутренним напряжениям, а при повышении их концентрации к механическому разрушению.

FIRST-PRINCIPLES STUDY OF REACTIONARY ABILITY OF SILVER AZIDE UNDER PRESSURE

Yu.N. Zhuravlev¹, V.M. Lisitsyn²

¹FSBEI HPE Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

²FSBEI HPE National Research Tomsk Polytechnic University,
Tomsk, Russia

E-mail: zhur@kemsu.ru; lisitsyn@tpu.ru

The first-principles method of the density functional theory in basis localized orbitals is used for study of structural, electronic, vibrational, thermodynamic properties and reactionary ability of orthorhombic, tetragonal and monoclinic phases silver azide. For the correct account of pressure and temperature the quasiharmonious model of Debaja is used. Reactionary ability of silver azide is analyzed with the help enthalpy and entropy factors and balance constants.

Reactionary ability of silver azide is analyzed by means of thermodynamic functions for three reactions

$2\text{AgN}_3 \rightarrow 3\text{N}_2 \uparrow + \text{Ag}_2$ (I), $2\text{AgN}_3 \rightarrow 2\text{N}_3 \uparrow + \text{Ag}_2$ (II), $2\text{AgN}_3 \rightarrow 3\text{N}_2 \uparrow + 2\text{Ag}_{sol}$ (III). Basic possibility of decomposition follows from possibility of formation $\text{N}_3^- \rightarrow \text{N}_3^0$, which is endothermic and demands overcoming of a power barrier $207.4 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ (2.15 eV) which practically coincides with the calculated width of the forbidden zone. As the intermediate it is considered dimolecular model of formation of macromolecule N_6 and its form with symmetry C_i has appeared the steadiest.

Decomposition end-product of silver azide is gas and consequently a difference entropy reactions I–III positive, a difference enthalpy for reactions I, II positive, but for reaction I entropy the factor exceeds enthalpy. Such reaction can proceed in a positive direction only at $T > 200 \text{ K}$. Reaction III is realizable under any conditions.

At pressure increase in HP- AgN_3 enthalpy decreases, and entropy practically doesn't change, therefore at $P > 11.6 \text{ GPa}$ reaction II becomes essentially realizable, and at $P > 14.8 \text{ GPa}$ exothermal, i. e. can proceed spontaneously. As result of such reaction is formation of free holes N_3^0 and pressure in a condition to initiate process solid state decomposition.

As possible model of the microcenters of reaction – hot points – formation for the account tunnel transitions of atoms of nitrogen in new symmetric crystallographic position of a metastable phase dinitride nitride of silver AgNN_2 is considered. This structure represents a rigid skeleton from silver nitride in which as in a cage there is almost neutral molecule of nitrogen. On the physical properties it sharply differs from initial азида silver. Presence of such areas in matrix AgN_3 will lead to huge internal pressure, and at increase of their concentration to mechanical destruction. On the physical properties it sharply differs from initial silver azide. Presence of such areas in matrix AgN_3 will lead to huge internal pressure, and at increase of their concentration to mechanical destruction.

2-61

ЛАЗЕРНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ТЭНА С ПОМОЩЬЮ НАПЛАВА

В.И. Таржанов, В.И. Сдобнов,
А.Д. Зинченко, А.И. Погребов

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забахина,
Снежинск, Россия

E-mail: V.I.Tarzhanov@vniitf.ru

Приведены результаты РФЯЦ – ВНИИТФ 1981–1982 годов, касающиеся явления образования наплавов из смесей тэна с металлическими порошками и механизма инициирования тэна с помощью наплава. Наплавы – плотные светопоглощающие слои тэна с металлом примерно в одну оптическую толщину – получались при воздействии на смеси излучением неодимового лазера, работающего в режиме свободной генерации ($\lambda = 1,06 \text{ мкм}$, $\tau \sim 0,6 \text{ мс}$). Изучены закономерности образования наплавов, их геометрические и оптические характеристики. Получено, что применение наплава снижает энергию лазерного инициирования тэна

в 20–60 раз в зависимости от условий применения, и связано это с предельной оптимизацией макроочага инициирования. Показано, что напессы – такие же светопоглощающие слои, получаемые прессованием, эквивалентны наплавам. Предложен механизм лазерного инициирования с наплавом.

LASER INITIATION OF PETN USING A DEPOSIT

V.I. Tarzhanov, V.I. Sdobnov,
A.D. Zinchenko, A.I. Pogrebov

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

E-mail: V.I.Tarzhanov@vniitf.ru

The paper presents the RFNC – VNIITF results of 1981–1982 relating to formation of deposits of PETN mixed with metal powders and to the mechanism of PETN initiation using a deposit. Deposits – dense light-absorbing layers of PETN with a metal having about one optical thickness – were formed when mixtures were subjected to radiation from the neodymium laser operating in the free running mode ($\lambda = 1.06 \text{ }\mu\text{m}$, $\tau \sim 0.6 \text{ ms}$). Regularities of deposition formation, its geometric and optical characteristics were studied. The use of a deposit decreases laser initiation energy of PETN by a factor of 20–60 depending on application conditions. This decrease is due to ultimate optimization of the initiation macronuclei. The mechanism of laser initiation with a deposit is proposed.

2-62

ЗАВИСИМОСТЬ ПОРОГА ВЗРЫВНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ТЕТРАНИТРОПЕНТАЭРИТРИТА И СМЕСЕВЫХ СОСТАВОВ НА ЕГО ОСНОВЕ ОТ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ИНИЦИИРОВАНИИ

Б.П. Адуев, Д.Р. Нурмухаметов,
Р.И. Фурега, Г.М. Белокуров

Институт углеродной и химического материаловедения
СО РАН, Кемерово, Россия

E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

Измерены пороги взрывного разложения тетранитропентаэритрита (тэна), а также смесевых составов на его основе с использованием наночастиц размером в максимуме распределения $\sim 100 \text{ нм}$ Ni-C (0,3% по массе) и Al (0,1% по массе) в зависимости от начальной температуры при воздействии импульсов лазера (1060 нм, 20 нс). Использовались переплавленные (Ni-C, Al), а также прессованные образцы (Al, $\rho = 1,73 \text{ г/см}^3$).

Для обработки экспериментальных данных разработана модель, согласно которой поглощение лазерного излучения происходит на структурных дефектах тэна и наночастицами включений. В результате поглощения структурными дефектами происходит образование центров химического разложения. Этот процесс требует энергии активации ($\sim 0,45 \text{ эВ}$). Поглощение излучения

наночастицами приводит к их нагреву до высокой температуры и образованию очагов химического разложения в их окрестности, причем этот процесс в условиях эксперимента не зависит от начальной температуры. В рамках модели записаны дифференциальные уравнения и получены решения, которые удовлетворительно описывают все экспериментальные данные в исследованном интервале начальных температур (290 К–440 К).

Показано, что при $T \leq 300$ К основной вклад в наблюдаемый порог взрывчатого разложения смесевых составов дает поглощение лазерного излучения наночастицами.

**TEMPERATURE DEPENDENCE
OF EXPLOSIVE DECOMPOSITION
OF PENTAERYTHRITOL TETRANITRATE
AND ITS MIXTURES UNDER IMPULSE LASER
INITIATION**

B.P. Aduев, D.R. Nurmukhametov,
R.I. Furega, G.M. Belokurov

Institute of Coal Chemistry and Chemical Materials
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science,
Kemerovo, Russia

E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru

Pentaerythritol tetranitrate (PETN) and its mixtures formed with using nanoparticles sized in the maximum distribution ~ 100 nm Ni-C (0.3% mass) and Al (0.1% mass) explosive decomposition thresholds are measured versus initial temperature under impact of laser impulses (1060 nm, 20 ns). Melted (Ni-C, Al) and pressed (Al, $\rho = 1.73$ g/cm³) samples were used.

For experimental data processing a model was developed. According to this model laser radiation absorption is realized by PETN structure defects and nanoparticulates of inclusions. As a result of absorption by structure defects centers of chemical decomposition are formed. Activation energy (~ 0.45 eV) is needed for this process. As a result of absorption by nanoparticles there is their heating up to high temperature and forming chemical decomposition focuses in their neighborhood, and this process does not depend on initial temperature. Within the bounds of the model differential equations are noted and solutions of them are obtained, all experimental results are described satisfactorily by these solutions in the investigated interval of initial temperatures (290–440 K).

It is showed under $T \leq 300$ K the capital contribution into the observed threshold of explosive decomposition of mixtures gives absorption of laser irradiation by nanoparticles.

2-63

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
ВЗРЫВЧАТОГО РАЗЛОЖЕНИЯ
СМЕСЕВЫХ СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ ТЭНА
И УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ Al-C
ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

Б.П. Адуев¹, Д.Р. Нурмухаметов¹, Р.И. Фурега¹,
С.Ю. Бугров², В.П. Ципилев³

¹Институт углекислоты и химического материаловедения
СО РАН, Кемерово, Россия

²ФГБОУ Кемеровский государственный университет,
Кемерово, Россия

³Национальный исследовательский Томский
политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru, morozova@tpu.ru

Исследован порог взрывчатого разложения тетраэритропентаэритрита (тэна) с добавками ультрадисперсных частиц Al-C при воздействии импульсов YAG : Nd3 лазера (12 нс, 1064 нм).

Для приготовления экспериментальных образцов использовался порошок тэна с характерным размером зерен 1–2 мкм. В качестве добавок использовался порошок Al-C, изготовленный механоактивационным способом в ИХТТМ СО РАН. Размер частиц в максимуме распределения составил 220 нм. Содержание углерода в порошке по данным рентгено-флуоресцентного анализа ~ 48 масс%. По данным рентгеноструктурного анализа в порошке наблюдаются линии Al и Al₄C₃. Частицы Al-C добавлялись в нужной концентрации в порошок тэна, образцы изготовлялись методом прессования. Плотность образцов составляла величину 1,73 г/см³.

Оптимальная концентрация включений, при которой порог взрывного разложения достигает минимальной величины ($H_{0,5} = 4$ Дж/см², $E = 125$ мДж) составляет 0,1–0,3 масс%. Отметим, что при использовании в качестве добавок порошка алюминия без содержания углерода с характерными размерами зерен 120 нм, порог взрывного разложения составил 1,4 Дж/см² с добавкой Al 0,1–0,3 масс% [1]. По данным дифференциально-термического анализа (ДТА) при отжиге порошков в атмосфере воздуха для порошка Al-C наблюдаются две характерные области энерговыделения 300–600 °С и резкий пик с максимумами 707 и 748 °С. Первая связана с окислением углерода, второй пик – с окислением алюминия. При отжиге частиц Al, не содержащих углерод, наблюдали один пик энерговыделения при 748 °С. При этом суммарное энерговыделение на единицу массы (S/m , где S – площадь под кривой ДТА) в относительных единицах в первом случае составило $S/m = 626,67$ г⁻¹, во втором – $S/m = 1261$ г⁻¹.

Из этих результатов можно сделать предварительный вывод, что в результате поглощения лазерного излучения включениями происходит не только их нагрев до высокой температуры, но и экзотермическое окисление, дающее вклад в инициирование химической реакции в горячих точках в матрице тэна. При этом углерод, находящийся в механокомпозите Al-C, скорее всего, снижает эффективность лазерного зажигания тэна.

Литература

1. Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р. Влияние добавок наночастиц алюминия на чувствительность тетранитропентаэритрита к лазерному воздействию // Химическая физика. 2011. Т. 30. № 3. С. 63–65.

**INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS
OF EXPLOSIVE DECOMPOSITION
OF MIXTURES ON THE BASE OF PETN
AND ULTRADISPERSED PARTICLES Al-C
UNDER LASER EXPOSURE**

B.P. Aduev¹, D.R. Nurmukhametov¹, R.I. Furega¹,
S.Ju. Bugrov², V.P. Csipilev³

¹Institute of Coal Chemistry and Material Science SB RAS,
Kemerovo, Russia

²Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

³National Scientific Research Tomsk Polytechnic Institute,
Tomsk, Russia

E-mail: lesinko-iuxm@yandex.ru, morozova@tpu.ru

Pentaerythritol tetranitrate (PETN) with additions of ultradispersed particles Al-C explosive decomposition threshold is investigated under impulse YAG : Nd3 laser (12 ns, 1064 nm) exposure.

For preparing experimental samples PETN powder with typical size of grains 1–2 μm was used. Powder Al-C made by mechano-activation method in ICSM SB RAS was used as additives. Particles size in the maximum distribution was 220 nm. Carbon content in the powder was ~48 mass% according to fluorescent analysis. There are Al and Al₄C₃ lines in the powder according to the X-ray structure analysis. Required quantity of Al-C particles was added into the PETN powder, samples were made by pressed. Sample density was 1.73 g/sm³.

Optimal additives concentration, when explosive decomposition threshold was minimum ($H_{0,5} = 4$ J/sm², $E = 125$ mJ), is 0.1–0.3 mass%. It should be noticed, when additive (Al 0.1–0.3 mass%) was aluminum powder without carbon with typical size of gains 120 nm explosive decomposition threshold was 1.4 J/sm² [1]. According to the differentially thermal analysis (DTA) when powders are annealed in air for Al-C powder two typical areas of energy-release 300–600°C and peak with maximums 707 and 748°C are observed. The first area relates to carbon oxidation, the second peak relates to aluminum oxidation. When Al particles without carbon were annealed there was observed one peak of energy-release 748°C. At that total energy-release per unit mass (S/m , where S – square under the DTA curve) in the first case it is $S/m = 626.67$ g⁻¹, in the second one – $S/m = 1261$ g⁻¹ in relative units.

From these results the prior conclusion can be done, as a result of laser radiation absorption by inclusions they are not only heated up to high temperature but also they are oxidized exothermically, that makes its contribution on initiation of chemical reaction in hot-points of PETN matrix. At that carbon which is in mechanic composite Al-C reduces efficiency of PETN laser lighting.

Reference

1. Aduev B.P., Nurmukhametov D.R. Influence of additions of aluminum nanoparticles to the sensitivity of pentaerythritol tetranitrate to laser exposure // Chemical physics. 2011. V. 30. № 3. P. 63–65.

2-64

**ПОЛУЧЕНИЕ КРУПНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО
1,3,5-ТРИАМИНО-2,4,6-ТРИНИТРОБЕНЗОЛА
РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ
УЛЬТРАДИСПЕРСНОГО ПРОДУКТА**

В.А. Кашаев, Ю.Г. Печенев, Г.Х. Хисамутдинов,
С.И. Валешный, В.П. Ильин, А.П. Баврина

ФГУП «Государственный научно-исследовательский
институт «Кристалл», Дзержинск, Россия

E-mail: kristall@niikristall.ru

Изучена рекристаллизация ультрадисперсного 1,3,5-триамино-2,4,6-тринитробензола (УдТАТБ) с целью получения крупнокристаллического продукта. Установлено, что при рекристаллизации УдТАТБ в чистых или смесевых растворителях при различных температурах образуется крупнокристаллический ТАТБ изометричной округлой формы. Изменяя условия кристаллизации (температура, скорость перемешивания, соотношение растворителей и др.), можно добиться требуемого размера и формы кристаллов ТАТБ. В качестве растворителей использовали диметилсульфоксид и диметилформамид и их смеси с ацетоном, бензолом, изопропиловым спиртом и водой. Наилучшие результаты получены при использовании смесевых растворителей.

Полученный по данному способу продукт может использоваться для компоновки высоконаполненных литевых и прессовых малочувствительных взрывчатых составов.

**PREPARATION OF LARGE-SIZED
1,3,5-TRIAMINO-2,4,6-TRINITROBENZENE
BY RECRYSTALLIZATION
OF ULTRADISPERSED PRODUCT**

V.A. Kashaev, Yu.G. Pechenev, G.Kh. Khisamutdinov,
S.I. Valeshny, V.P. Ilyin, A.P. Bavrina

JSC GosNII «Krisatall», Dzerzhinsk, Russia

E-mail: kristall@niikristall.ru

The paper presents investigation of ultradispersed 1,3,5-triamino-2,4,6-trinitro-benzene (UdTATB) recrystallization with the aim to prepare the product with large-sized crystals. It was determined that in the process of UdTATB recrystallization in pure or mixed solvents at different temperatures large-sized TATB with isomeric round form was produced. It is possible to produce TATB crystals with required size and form by changing crystallization conditions (temperature, rate of mixing, proportion of solvents et al.). The following solvents were used: dimethyl sulfoxide and dimethyl formamide and their mixtures with acetone, benzene, isopropyl alcohol and water.

The product manufactured in this process can be used in high loaded cast and pressed low sensitive explosive compositions.

2-65

СВЕРХПОМЕХОУСТОЙЧИВЫЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ КАМЕРЫ НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА

М.И. Крутик¹, В.П. Майоров²,
В.В. Попов¹, М.С. Семин²

¹ООО «НПП НАНОСКАН», Москва, Россия

²ЗАО «НПК ВИДЕОСКАН», Москва, Россия

E-mail: mail@nanoskan.ru, mail@videoskan.ru

Работы по созданию электронно-оптических камер (ЭОК) и комплексов на их основе для работы в условиях сверхмощных импульсных электромагнитных помех ведутся на предприятии с 2005 года. Вначале это были устройства (камера ВС2), являющиеся неотъемлемой частью установки Заказчика. ВС2 имела встроенный источник питания (батарею), жестко заданные, не регулируемые параметры (длительности экспозиции, задержки пуска и коэффициента усиления ЭОП), металлический корпус цилиндрической формы и полностью гальванически изолированные от камеры цепи управления. В 2008 г. был разработан первый экспериментальный образец помехоустойчивой электронно-оптической камеры ПФК-1, которая имела такой же широкий диапазон регулировок параметров, как и серийные камеры серии НАНОГЕЙТ, длительность экспозиции от 20 нс до 20 мкс и задержки пуска от 40 нс до 1 300 мкс. В отличие от камер ВС2 камера ПФК-1 имела встроенный аккумулятор. Как камера ВС2, так и камера ПФК-1 имеют цилиндрический корпус значительных габаритов (диаметр порядка 170 мм и длина 280 мм). Проведенные в последние два года работы, направленные на снижение габаритов помехоустойчивых камер, привели к созданию экспериментального образца малогабаритной помехоустойчивой камеры СПУ-1. На фотографии внизу показан внешний вид СПУ-1. Габариты камеры: диаметр – 115 мм, длина – 195 мм. Резко уменьшить габариты помехоустойчивой ЭОК позволила разработка принципиально новая система питания камеры. Вместо встроенного аккумулятора, который обеспечивал питание камеры ПФК-1 в течение всего цикла работы устройства (включение камеры, запуск рабочего ПО, установка временных и энергетических параметров съемки и сам процесс регистрации изображения исследуемого процесса), в СПУ-1 используется встроенный малогабаритный ИП, на который переключается камера только в момент регистрации процесса. ЭОП 2-го поколения с фотокатодом диаметром 18 мм. Стыковка экрана ЭОП с матрицей ПЗС через фокон. Чувствительность ЭОК обеспечивает регистрацию единичных фотонов. Пространственное разрешение СПУ-1 при всех значениях длительности экспозиции не менее 32 мм⁻¹.

Технические характеристики ЭОК:

1. дистанционная установка всех основных параметров ЭОК:

- длительность затворного импульса от 10 нс до 20 мкс с шагом 10 нс;
- задержку открытия затвора ЭОП от 0 до 1000 мкс с шагом 5 нс;
- коэффициент усиления ЭОП от 1 до 50 000:

2. устойчивую работу ЭОК в момент регистрации изображений исследуемого процесса.

Передачу зарегистрированного изображения из ЭОК в удаленный компьютер по волоконно-оптическому кабелю после окончания действия помехи.

POWERFUL ELECTROMAGNETIC INFLUENCE STABILITY ICCD CAMERAS OF NANOSECOND RANGE

M.I. Krutik¹, V.P. Mayorov², V.V. Popov¹, M.S. Semin²

¹SPM «NANOSKAN», Moscow, Russia

²SPC «VIDEOSKAN», Moscow, Russia

E-mail: mail@nanoskan.ru, mail@videoskan.ru

The works on the creation of ICCD cameras and multycameras systems in conditions of powerful electromagnetic influence have been started by the company since 2005. There were the devices of type BC2, which are the integral part of customer installation. BC2 had the inside power source, fixed parameters (gate, delay and gain of image intensifier tube), metal box of cylinder shape and completely galvanic isolated from the camera control chain. The first sample of camera (PFK-1) working in conditions of powerful electromagnetic influence have been created in 2008. This camera had the wide range of parameters regulations as the camera of NANOGATE type. The gate from 20 ns to 20 μs and start delay from 40 ns to 1300 μs. As a difference from BC2 camera, the camera PFK-1 had the inside battery charge. Both cameras BC2 and PFK-1 having the cylinder box of big overall dimensions (diameter about 170 mm and length of 280 mm). As results of two years researches the dimensions of powerful electromagnetic influence stability camera have been reduced up to diameter of 115 mm, length of 195 mm. The new circuit of power supply had to significantly reduce box of camera. The inside small-size power supply has been used in CPU-1 at the moment of process registration. The camera CPU-1 has a tube GEN-II of 18 mm, the sensitivity up to single photons. The image intensifier coupled with CCD via fiber optic. The spatial resolution is not less of 32 mm⁻¹.

Specification of CPU-1 camera:

1. Remote control of main parameters:

- Gate duration from 10 ns to 20 μs with 10 ns step;
- Delay of gate opening from 40 ns to 1300 μs with 5 ns step;
- Gain of image intensifier tube from 1 to 50 000.

2. Stable operation of ICCD camera at the moment of process registration.

Transfer of registered data from camera to remote computer on fiber optical cable after electromagnetic influence collapse.

2-66

ИМПУЛЬСНО-ДЕТОНАЦИОННОЕ ГОРЕЛОЧНОЕ УСТРОЙСТВО НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ

С.М. Фролов, Ф.С. Фролов, В.С. Аксенов, В.С. Иванов,
С.Н. Медведев, В.А. Сметанюк, К.А. Авдеев

Учреждение РАН Институт химической физики
им. Н.Н. Семенова, Москва, Россия

E-mail: smfrol@chph.ras.ru

В существующих силовых установках и горелочных устройствах химическая энергия горючего преобразуется в тепло и механическую работу за счет медленного горения – дефлаграции. Кроме дефлаграции известен и другой режим горения – детонация. При детонации химическая реакция окисления горючего протекает в режиме самовоспламенения при высоком давлении за сильной ударной волной. До сих пор детонацию в энергетике не применяли. Основная причина – в проблеме инициирования детонационной волны: для получения детонации необходимо обеспечить надежный и управляемый переход горения в детонацию (ПГД) на кратчайших расстояниях при минимальной энергии зажигания, тогда как детонационная способность воздушных смесей практических топлив при нормальных условиях очень низка.

В ИХФ РАН впервые создан экспериментальный образец импульсно-детонационного горелочного устройства на природном газе – прообраз промышленных горелочных устройств нового поколения, совмещающих комбинированное воздействие на объекты, обдуваемые продуктами горения: ударно-волновое (механическое) и тепловое. Важнейший научный результат работы – доказательство возможности быстрого циклического ПГД в трубе околопредельного диаметра (94 мм) с открытым концом на расстоянии 2,5–3 м при раздельной непрерывной подаче природного газа и воздуха. Проблема инициирования детонации была решена в результате тщательного подбора формы и расстановки препятствий, обеспечивающих оптимальное согласование темпов ускорения пламени и усиления ударной волны.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт № 16.526.12.6018 «Разработка высокоскоростной энергосберегающей импульсно-детонационной газовой горелки для повышения эффективности тепловой работы промышленных печей и теплоэнергетических установок»).

PULSE DETONATION BURNER FUELED BY NATURAL GAS

S.M. Frolov, F.S. Frolov, V.S. Aksenov, V.S. Ivanov,
S.N. Medvedev, V.A. Smetanyuk, K.A. Avdeev

Semenov Institute of Chemical Physics, Moscow, Russia

E-mail: smfrol@chph.ras.ru

In existing power plants and burners the chemical energy of fuel is transformed into heat and mechanical work due to slow combustion – deflagration. Apart from defla-

gration there exists another known mode of combustion – detonation. In the detonation, the chemical reaction of fuel oxidation proceeds in the mode of self-ignition at high pressure behind a strong shock wave. So far, detonation was not utilized in power engineering. One of the main reasons is the detonation initiation issue: it is necessary to obtain a detonation via reliable and controllable deflagration-to-detonation transition (DDT) with the lowest ignition energy at the shortest distance, whereas the detonability of conventional fuels in air at normal conditions is very low.

In the Semenov Institute of Chemical Physics, the experimental demonstrator of a pulse detonation burner operating on natural gas – air mixture has been designed, fabricated and tested for the first time. This burner is considered as a prototype of industrial burners of new generation exerting a combined effect on the target object, namely, mechanical (due to strong periodic shock waves) and thermal (due to high-speed flow of detonation products). The most significant result of this work is the proof of a possibility to obtain fast repetitive DDT in a tube of near-limiting diameter (94 mm) with one open end at a distance of 2.5–3 m at separate but continuous supply of natural gas and air. The problem of detonation initiation via DDT was solved due to intelligent design of shape and position of obstacles ensuring the optimal coupling between the rates of flame acceleration and shock wave amplification.

This work was supported by the Ministry of Science and Education of Russian Federation (State Contract No. 16.526.12.6018 «Development of high-speed energy-saving pulse detonation gas burner to enhance the thermal efficiency of industrial furnaces and thermal power plants»).

2-67

КОМПАКТНОЕ ВЗРЫВНОЕ МЕТАТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕЩЕСТВА МЕТОДОМ ПРОТОННОЙ РАДИОГРАФИИ В УСЛОВИЯХ УДАРНОГО СЖАТИЯ

В.В. Якушев, А.В. Уткин, С.А. Колдунов, М.И. Кулиш

Институт проблем химической физики РАН,
Черноголовка, Россия

E-mail: yakushev@icp.ac.ru

Актуальность разработки малогабаритных взрывных метателных устройств (ВМУ) продиктована началом эксплуатации протонорадиографической установки ТВН-ИТЭФ в г. Москва и планирующимся вводом в действие установки PRIOR в GSI, г. Дармштадт (Германия).

В настоящей работе произведена модернизация малогабаритного генератора плоской ударной волны, использованного в работе [1], под более доступный для его снаряжения пластик на основе гексогена. На базе генератора разработано и аттестовано компактное ВМУ для разгона алюминиевых ударников диаметром 20 мм и толщиной 2 мм до ~3 км/с [2] с полной массой заряда ВВ, не превышающей 15 г. С помощью скоростного фоторегистратора в режиме щелевой развертки исследована кривизна фронта ударной волны, формируемой

плосковолновым генератором, и плоскостность метания ударников, разгоняемых продуктами взрыва таблетки ВВ. В по кадровом режиме (CCD-камера) заснят полет ударника и его столкновение с преградой из алюминиевой фольги на базе полета 10 мм. Проведена оценка скорости ударника и определен размер его плоского участка. Показана возможность использования ВМУ для изучения фазовых переходов методом протонной радиографии в таких веществах как церий и кремний, испытывающих большое изменение удельного объема при фазовом переходе.

Литература

1. Merzhievsky L.A., Bespalov E.V., Efremov V.P. et al. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, 2009, Vol. 603, pp. 164–166.
2. В. В. Якушев, А. В. Уткин, С. А. Колдунов, М. И. Кулиш. // ПТЭ, 2011, №. 3, С. 149–153.

A COMPACT EXPLOSIVE ASSEMBLY FOR RESEARCH OF MATTER UNDER SHOCK COMPRESSION USING PROTON RADIOGRAPHY

V.V. Yakushev, A.V. Utkin, S.A. Koldunov, M.I. Kulish

Institute of Problems of Chemical Physics RAS,
Chernogolovka, Russia

E-mail: yakushev@fcp.ac.ru

Developing of compact explosive throwing devices (ETD) is now very urgent because of bringing into operation of TWAC-ITEP proton microscope facility in Moscow and upcoming startup of PRIOR facility in GSI, Darmstadt (Germany).

In the present work a compact plane shock wave generator from [1] was changed for its filling of more widely-distributed RDX-based plastic explosive. On the basis of generator a compact ETD for acceleration of aluminium impactors of 20 mm in diameter and 2 mm in thickness to ~3 km/s was developed [2]. The whole weight of explosive in ETD was less than 15 gram.

A set of experiments was made to investigate throwing characteristics of ETD. To determine the curvature of a shock wave front at the generator output and to research the flatness of thrown impactors accelerated by explosion products of HE pellet streak camera was used. It was also recorded with CCD-camera the flight of the impactor and its collision with obstacle of aluminium foil on the acceleration base of 10 mm. Velocity estimation and determination of the size of flat part were made. It was shown that ETD can be applied practically for research of phase transitions using proton radiography of substances like cerium and silicon which undergo high change of specific volume at phase transition.

References

1. Merzhievsky L.A., Bespalov E.V., Efremov V.P. et al. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, 2009, Vol. 603, pp. 164–166.
2. V.V. Yakushev, A.V. Utkin, S.A. Koldunov, M.I. Kulish. // IET, 2011, Vol. 54, N3, pp. 430–434.

2-68

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКТА ТЕСТ-ОБРАЗЦОВ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ АППАРАТУРЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

В.В. Судаков, И.З. Ахметов,
В.П. Ильин, Ю.Л. Коробова

ФГУП «ГосНИИ «Кристалл»,
Дзержинск, Россия

В настоящее время в связи с широким распространением террористических актов с применением взрывчатых веществ (ВВ) задача борьбы с терроризмом становится проблемой общемирового масштаба. Эффективность деятельности правоохранительных органов по предупреждению, выявлению и пресечению преступлений с применением ВВ связана с использованием высокоразрешающей современной аналитической аппаратуры для обнаружения ВВ. Одним из направлений разработки такой аппаратуры является обнаружение паров ВВ методами газового анализа.

При разработке и эксплуатации газоанализаторов возникает необходимость проверки их работоспособности и чувствительности, что невозможно выполнить без наличия стандартных образцов ВВ.

Поскольку для работы с ВВ требуются особые условия и дополнительные разрешительные документы, которыми большинство разработчиков и пользователей не располагают, в нашей организации были проведены исследования по разработке комплекта тест-образцов ВВ, которые заменяют реальные ВВ.

В результате проведенных исследований был разработан комплект тест-образцов растворов нитросоединений, в который включены сильно разбавленные растворы основных штатных ВВ, и полный пакет рабочей конструкторской документации с literой «О1». Комплекту присвоен шифр «Шельф-КР-К». Изделие прошло государственные испытания межведомственной комиссии, были изготовлены образцы для опытной эксплуатации. В настоящее время изделие успешно используется разработчиками поисковой аппаратуры.

DEVELOPMENT OF TEST-SAMPLES FOR CALIBRATION OF EXPLOSIVE DETECTORS

V.V. Sudakov, I.Z. Akhmetov, V.P. Ilyin, Yu.L. Korobova

JSC «GosNII «Krisatall», Dzerzhinsk, Russia

At present the fight against terrorists becomes the worldwide problem because of wide distribution of terrorist acts with application of explosives. Efficiency of activity of law protection bodies for prevention, revelation and suppression of crimes with application of explosives is connected with the use of modern devices for detection of explosives. One of the trends concerning the development of such devices is detection of explosives steams with the use of gas analysis methods.

In the development and operation of gas-analyzers it is necessary to verify their performance and sensitivity and for this standard explosive samples are required.

Since for operations with explosives special conditions and additional permissive documents are required, which the most developers and users do not have, there were carried out investigations in our institute to develop the set of test-samples of explosives which replace real explosives.

Due to the carried out investigations a set of test-samples of nitro compound solutions was developed that included highly diluted solutions of basic standard explosives and a full package of design and service specifications marked with «O1». The set was officially tested and marked with a code «Shelf-KR-K». There were fabricated the samples for trial operation. Now the set is successfully applied by developers of search apparatus.

2-69

РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФТОРДИНИТРОЭТИЛМЕТИЛФУРОКСАНА

А.Р. Хайруллин¹, В.Г. Никитин¹, А.Т. Губайдуллин²,
Н.С. Хайруллина¹, Д.И. Хамидуллин¹

¹Казанский государственный технологический университет,
Казань, Россия

²Институт органической и физической химии
им. А.Е. Арбузова, КазНЦ РАН, Казань, Россия

Исследуемое соединение представляет научный и практический интерес как компонент сплавов, предназначенных для создания новых модельных литевых композиций.

Для установления взаимосвязи между структурой веществ и их поведением в различных процессах на молекулярном уровне необходимо знание строения исследуемых соединений, и одним из объективных методов идентификации строения новых веществ является рентгеноструктурный анализ.

Рентгеноструктурный анализ фтординитроэтилметилфуроксана был проведен на автоматическом рентгеновском дифрактометре Bruker Smart Apex II CCD (MoK α , графитовый монохроматор, $\lambda = 0,71073$ Å, ω -сканирование) методом вращения. Монокристалльные образцы выращены из раствора в ацетоне методом снижения температур.

Рентгеноструктурный анализ фтординитроэтилметилфуроксана показал, что кристаллы соединения C₅H₅FN₄O₆, моноклинные, параметры ячейки при 20°C следующие: $a = 6,1506$, $b = 14,2129$, $c = 10,4948(7)$ Å, $V = 897,9(3)$ Å³, $Z = 4$, $\rho_c = 1,747$ г·см⁻³, пространственная группа $P_2(1)/n$.

Структуры расшифрованы прямым методом по программе SHELXS и уточнены вначале в изотропном, затем в анизотропном приближении с использованием программы WinGX. Окончательные значения факторов расходимости $R = 0,0275$, $R_w = 0,0207$. Сбор данных, индексация, обработка результатов проведены с использованием программного пакета APEX2.

X-RAY STUDYING OF FTORDINITROETILMETILFUROKSAN

A.R. Khairullin¹, V.G. Nikitin¹, A.T. Gubaidullin²,
N.S. Khairullina¹, D.I. Khamidullin¹

¹The Kazan State Technological University, Kazan, Russia
²A.E. Arbuzov Institute of Organic and Physical Chemistry,
Kazan Research Center of the Russian Academy of Sciences,
Kazan, Russia

Studying connection represent scientific and practical interest as component of alloys that intended for creation new model injection compositions.

For an establishment of interrelation between structure of substances and their behaviour in various processes at a molecular level the knowledge of a structure of researched connections is necessary, and one of objective methods of identification of a structure of new substances is the X-ray analysis.

The X-ray analysis of a monocrystal ftordi-nitroetilmetilfuroksan has been executed on automatic X-ray diffractometer Bruker Smart Apex II CCD (MoK α , graphite monochromator, $\lambda = 0.71073$ Å, ω -scan) by a method of rotation. A monocrystal samples for carrying out the X-ray structural analysis have been prepared from the solutions in nitromethane by the lowering temperature method.

The X-ray analysis of a monocrystal ftordinitroetilmetilfuroksan showed that crystals of connection C₅H₅FN₄O₆ monoclinic, parameters of cell at 20°C: $a = 6.1506$, $b = 14.2129$, $c = 10.4948(7)$ Å, $V = 897.9(3)$ Å³, $Z = 4$, $\rho_c = 1.747$ gm⁻³, symmetry space group $P_2(1)/n$.

The structure is defined by a direct method by means of the program SHELXS and refined by full matrix. At first it was defined more exactly at isotropic and then in anisotropic approximation with WinGX program. The final values of factors $R = 0.0275$, $R_w = 0.0207$. Data collection, indexation, analysis of the results are executed with using program package APEX2.

2-70

ТЕРМОГАЗОГЕНЕРАТОР НА ОСНОВЕ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО СГОРАЕМОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ОБРАБОТКИ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

Р.Ш. Гарифуллин, А.С. Сальников,
В.Я. Базотов, А.А. Мокеев

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

E-mail: rus-garifullin@yandex.ru

Важная роль в решении задач по обеспечению высоких темпов добычи нефти принадлежит методам обработки призабойной зоны скважин. Перспективным направлением интенсификации добычи нефти является совершенствование и разработка принципиально новых устройств и технологий, использующих энергию сгорания энергонасыщенного материала. Однако используемые в устройствах сгораемые материалы обладают

рядом недостатков: повышенной взрывоопасностью, высоким содержанием твердых продуктов горения, а также изготавливаются по низкопроизводительным технологиям.

В работе разработаны новые рецептуры термопластичных сгораемых материалов и термогазогенератор на их основе. Предложенное устройство не обладает взрывчатыми свойствами, сгорает с выделением значительного количества теплоты и газов, низким содержанием твердых продуктов горения, изготавливается высокопроизводительными методами проходного пресования или экструзии.

**THERMOGASGENERATOR ON BASE
OF THERMOPLASTIC BURNING MATERIAL
FOR PROCESSING OF OIL CHINKS**

R.Sh. Garifullin, A.S. Salnikov,
V.J. Bazotov, A.A. Mokeev

Kazan National Research Technological University,
Kazan, Russia

E-mail: rus-garifullin@yandex.ru

The important role in the decision of problems on maintenance of high rates of an oil recovery belongs to processing methods face-zones of chinks. A perspective direction

of an intensification of an oil recovery is perfection and working out of essentially new devices and the technologies using energy of combustion of burning material. However used in devices burning material possess a number of lacks: the raised explosion hazard, the high maintenance of firm products of burning, and also are made on low-productive technologies.

In work new compounding thermoplastic of burning material thermogenerator on their basis are developed. The offered device does not possess explosive properties, burns down with allocation of a significant amount of warmth and gases, the low maintenance of firm products of burning, it is made by high-efficiency methods of pressing through passage or extrusion.

Секция 3

ЯВЛЕНИЯ В ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ

Section 3

DENSE PLASMA PHENOMENA

**СКОРОСТИ РЕАКЦИЙ
ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА
С УЧЕТОМ КВАНТОВЫХ ЭФФЕКТОВ
ПРИ БОЛЬШИХ ПЛОТНОСТЯХ
НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ**

А.Н. Старостин, М.Г. Гладуш, Ю.В. Петрушевич

ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и
термоядерных исследований, Троицк, Московская область,
Россия

E-mail: a.n.starostin@gmail.com

Скорости нерезонансных реакций, в частности реакций синтеза, определяются кинетической энергией взаимодействующих частиц в системе их центра масс, а также их распределением по энергиям и импульсам. При не слишком высокой температуре основной вклад в реакции синтеза будут давать частицы с энергией в несколько раз превышающей температуру плазмы.

Известно, что в плотных средах квантовая неопределенность энергии частиц, связанная с их частыми столкновениями с другими частицами, приводит к нарушению однозначной связи между энергией и импульсом частиц.

В.М. Галицкий и В.В. Якимец [1] показали, что в равновесном распределении частиц по импульсам за счет квантовых эффектов возникает степенная добавка к максвелловской функции распределения при больших значениях импульса – больших теплового или фермиевского. В работах [2, 3] предложена простая модель типа лоренцевского газа, в которой легкая частица рассеивается на тяжелой примесной частице и численно показано заметное отклонение функции распределения от максвелловского вида, связанное с учетом квантовых поправок. Было высказано предположение, что этот эффект должен влиять на скорости реакций этих частиц, приводя, в частности, к неэкспоненциальной температурной зависимости констант скоростей реакции неупругих процессов.

В настоящей работе было проведено моделирование реакций термоядерного синтеза с учетом влияния этого механизма на функцию распределения в реальных экспериментальных условиях, и вычислены скорости некоторых реакций. Показано, что в общем виде скорость реакции определяется обобщенной функцией распределения частицы по энергиям и импульсам, и сводящейся, в общем виде, к десятикратному интегралу. Т. е. в исходном выражении не предполагается простое усреднение сечения реакции, зависящего в основном от относительного импульса частиц, а не их энергии, по одночастичной квантовой функции распределения по импульсам.

Литература

1. Галицкий В.М., Якимец В.В. // ЖЭТФ, 1966. Т. 51. С. 957.
2. Starostin A.N., Savchenko V.I., Fish N.J. // Physics Lett. A, 2000. Т. 64. С. 274.

3. А.Н. Старостин, А.Г. Леонов, Ю.В. Петрушевич, Вл.К. Рерих // Физика плазмы, 2005. Т. 31. С. 146–156.

**ENHANCEMENT OF FUSION RATES DUE
TO QUANTUM EFFECTS
IN DENSE NONIDEAL PLASMAS**

A.N. Starostin, M.G. Gladush, Yu.V. Petrushevich

FSUE SRC RF Troitsk Institute for Innovation
and Fusion Research, Troitsk, Moscow region, Russia

E-mail: a.n.starostin@gmail.com

The rates of non-resonant nuclear reactions including fusion processes are determined by kinetic energies of the interacting particles in their center-of-mass system as well as by their distribution in energy and momentum. For moderate temperatures the main contribution to the fusion process is expected from particles with energies several times larger than the plasma temperature.

However, it is well known that in dense environments the quantum uncertainty in the energy of particles associated with their frequent collisions leads to disruption of the unambiguous relationship between the energy and momentum of particles.

In 1966 Galitsky and Yakimets [1] showed that the equilibrium momentum distribution of particles acquires a power correction term to the Maxwellian function due to quantum effects. In [2, 3] it was proposed a simple model using the Lorentz gas concept in which a light particle is scattered by a heavy impurity particle. It has been suggested that this effect should influence the reaction rate for these particles. In particular, it should give the nonexponential temperature dependencies of reaction rate constants for inelastic processes.

In this study we simulated the thermonuclear fusion reactions taking into account the impact of this mechanism on the distribution function under conditions that might be realized in a contemporary experiment. The rates of some reactions were calculated. It was shown that in general the reaction rate is determined by generalized distribution of energy and momentum and is reduced, in general, to a ten-fold integral. In other words, in the original expression, one should not perform a simple averaging of the reaction cross-section, depending mainly on the relative momentum of particles (rather than energy) for quantum single-particle momentum distribution function

References

1. Galitski V.M. and Yakimets V.V., Zh. Eksp. Teor. Fiz. (U.S.S.R.) 51, 957 (1966), [Soviet Phys. JETP, 24 (1967)].
2. Starostin A.N., Savchenko V.I., and Fisch N.J., Physics Letters A 274, 64 (2000).
3. Starostin A.N., Leonov A.G., Petrushevich Y.V., and Rerikh V.K., Plasma Physics Reports 31, 123 (2005).

3-2

ОТДАЧА ЭНЕРГИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ЭЛЕКТРОНАМ И ИОНАМ В ПЛАЗМЕ

Д.Л. Престон, Л.С. Браун, Р.Л. Синглетон

Лос-Аламосская национальная Лаборатория, США

Нами проведены расчеты распределения энергии заряженных частиц между электронами и ионами плазмы, у которой связь находится в диапазоне от слабой до умеренной. Данные вычислений основываются на уравнении Фоккера-Планка распределения заряженных частиц по фазовому объему, которая следует первому суб-лидирующему порядку в постоянной связи плазмы, т. е., включает члены порядка $n \ln n$ (лидирующие) и n (суб-лидирующие) в плотности плазмы n . Раньше оценивались только члены порядка n . Наши точные результаты верны для произвольных температур электронов и ионов. Что касается равных температур электронов и ионов, нами обнаружено, что наши результаты хорошо согласуются с подгонкой, полученной авторами Фрэйли, Линнебур, Мэйсон и Морзе. В докладе будет представлена простая, но точная модель распределения энергии для дейтерий-тритиевых плазм.

CHARGED PARTICLE ENERGY LOSS TO ELECTRONS AND IONS IN A PLASMA

D.L. Preston, L.S. Brown, and R.L. Singleton

Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, USA

We calculate the partition of the energy of a charged particle between the electrons and ions of a weakly to moderately coupled plasma. This computation is based on a Fokker-Planck equation for the phase space distribution of the charged particle that holds to first sub-leading order in the plasma coupling constant, that is, it includes terms of order $n \ln n$ (leading) and n (sub-leading) in the plasma density n . Previously, the order n terms have only been estimated. Our precise results hold for arbitrary electron and ion temperatures. For equal electron and ion temperatures we find that our results agree well with a fit obtained by Fraley, Linnebur, Mason, and Morse. A simple but accurate model of the energy partition for deuterium-tritium plasmas will be presented.

3-3

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО УДАРНОМУ СЖАТИЮ АЗОТА В МЕГАБАРНОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ

И.Л. Иосилевский^{1,2}, В.К. Грязнов³, В.Е.Фортвов^{2,3}

¹Московский физико-технический институт
(Гос. университет), Долгопрудный, Россия

²Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

³Институт проблем химической физики РАН,
Черноголовка, Россия

E-mail: ilios@orc.ru

Термодинамические свойства азота в мегабарном диапазоне давлений обсуждаются на основе анализа экспериментальных данных по ударному сжатию азота, полученных в последние годы во ВНИИЭФ (Саров) [1, 2]. Эти эксперименты дают важную информацию об адиабате Гюгонию плотного и нагретого азота в диапазоне давлений 100–350 ГПа и температур 10–80 К с плотностью, в разы превышающей плотность конденсированного состояния. Совместный термодинамический анализ новых данных по термическому и калорическому уравнениям состояния азота позволяет установить совокупность достаточно жестких ограничений, которым должны удовлетворять все теоретические модели, претендующие на адекватное физическое описание термодинамики азота при этих параметрах. Следствием квазиизохорического хода экспериментально зафиксированной адиабаты Гюгонию в интервале 100–350 ГПа, в сочетании с зафиксированным в эксперименте квазилинейным поведением температуры на этом участке адиабаты, является одновременное постоянство в этой области параметров сразу нескольких термодинамических характеристик плазмы азота: параметра Грюнайзена, изохорической теплоемкости, термического коэффициента давления и т. н. фактора сжимаемости.

Термодинамика ударно-сжатого азота анализируется теоретически с использованием т. наз. «химической модели плазмы» (код SAHA-N), в рамках которой плазма азота описывается как плотная сильно неидеальная смесь взаимодействующих атомов, молекул, ионов и электронов. Для сравнения также привлекаются данные полуэмпирического уравнения состояния, развитого во ВНИИЭФ [2]. Эти расчеты сравниваются с предсказаниями других теоретических моделей, описывающих ударно-сжатый азот в более низком диапазоне давления ($P < 100$ ГПа) как последовательность сменяющих друг друга молекулярного и полимерного состояний. Такое сравнение теоретических предсказаний, даваемых молекулярными и плазменными моделями, в совокупности с уже существующими и новыми экспериментальными данными, позволяет высказать предположение, что при $P \approx 100$ ГПа, $T \approx 16\ 000$ К, and $\rho \approx 3,3$ г/см³ ударно-сжатый азот испытывает новый тип «ионизации давлением», отличный от аналогичного процесса в водороде, происходящий не из молекулярного, как в водороде, а из полимерного состояния –

в состояние плотной неидеальной плазмы. В свете этой проблемы обсуждаются перспективы и возможности новых экспериментов и первопринципных теоретических расчетов, способных пролить дополнительный свет на обсуждаемые особенности «ионизации давлением» в азоте.

Литература

1. Мочалов М.А., Жерноклетов М.В., Илькаев Р.И., Михайлов А.Л., Фортвов В.Е., Грязнов В.К., Иосилевский И.Л., Межевов А.Б., Ковалев А.Е., Киришанов С.И., Григорьева Ю.А., Новиков М.Г., Шуйкин А.Н. // ЖЭТФ, 137, No. 1, 77–92 (2010).
2. Трунин Р.Ф., Борисков Г.В., Быков А.И., Медведев А.Б., Симаков Г.В., Шуйкин А.Н. Письма в ЖЭТФ 88, 220 (2008).

THERMODYNAMIC STUDY OF NEW EXPERIMENTAL DATA ON SHOCK COMPRESSION OF LIQUID NITROGEN IN 1-3 MEGABAR RANGE

I.L. Iosilevskiy^{1,2}, V.K. Gryaznov³, V.E. Fortov^{1,2}

¹Moscow Institute of Physics and Technology, (State University), Dolgoprudny, Russia

²Joint Institute for High Temperature RAS, Moscow, Russia

³Institute of Problems of Chemical Physics RAS, Chernogolovka, Russia
E-mail: ilios@orc.ru

Thermodynamic properties of strongly shock-compressed liquid nitrogen are under discussion. The base for discussion are experimental data, obtained recently in VNIIEF (Sarov) using hemispherical shock wave generators [1, 2]. These experiments covered nitrogen Hugoniot in pressure range 100–3500 GPa and temperature range 10–80 kK. Joint analysis of the data of measurement for thermal and caloric EOS-s leads to conclusions about strong constraints, which should be fulfilled by any theoretical model proposed for thermodynamic description of warm dense nitrogen in newly investigated region. A nearly isochoric behavior of nitrogen Hugoniot and quasi-linear behavior of measured temperature indicates existence for significant range in nitrogen plasma of nearly constant Grüneisen parameter, isochoric heat capacity, thermal pressure coefficient and so-called compressibility factor.

New data on thermodynamics of shock-compressed nitrogen are analyzed theoretically using so-called quasi-chemical model (code SAHA-N) where nitrogen plasma is described as strongly interacting (non-ideal) equilibrium mixture of atoms, molecules, ions and electrons. Calculation data obtained via semi-empirical EOS, developed in VNIIEF [2], are also used for comparison. This approaches supplement in the high- P –high- T region previous calculations of shock-compressed nitrogen of moderate parameters ($P < 100$ GPa) as series of molecular and polymeric states. Presently discussed experimental data combined with theoretical calculations lead to conclusion that approximately at $P \approx 100$ GPa, $T \approx 16\,000$ K, and $\rho \approx 3.3$ g/cm³ shock-compressed nitrogen comes through new type of «pressure ionization» – not from molecular (like hydrogen) but from polymeric state to the state of strongly non-ideal plasma.

References

1. Mochalov M.A., Zhernokletov M.V., Il'kaev R.I., Mikhailov A.L., Fortov V.E., Gryaznov V.K., Iosilevskiy I.L., Me-

- zhevov A.B., Kovalev A.E., Kirshanov S.I., Grigorieva Yu.A., Novikov M.G., Shuikin A.N., JETP, 137, 77 (2010).
2. Trunin R.F., Boriskov G.V., Bykov A.I., Medvedev A.B., G.V. Simakov, and A.N. Shuikin, JETP Lett. 88, 189 (2008).

3-4

ТЕРМОДИНАМИКА ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ ВОДОРОДА И ГЕЛИЯ ПРИ УДАРНОМ И ИЗОЭНТРОПИЧЕСКОМ СЖАТИИ В МЕГАБАРНОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ

В.К. Грязнов¹, И.Л. Иосилевский^{2,3}, В.Е. Фортвов^{1,2}

¹Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

²Объединенный институт высоких температур РАН, Долгопрудный, Россия

³Московский физико-технический институт, Москва, Россия
E-mail: grvk@fcp.ac.ru

В рамках химической модели предлагается модель сильно сжатого разогретого вещества. Ударно-сжатый газ представляется в виде многокомпонентной смеси атомов молекул электронов и ионов с сильным межчастичным взаимодействием. Учитывается кулоновское взаимодействие заряженных частиц, короткодействующее отталкивание и притяжение тяжелых частиц, вырждение свободных электронов. Вклад отталкивания атомов и молекул в термодинамические функции рассматривается в рамках расширенной модели мягких сфер и соответствует неэмпирическому атом-атомному приближению. Взаимодействие заряженных частиц описывается в рамках модифицированной псевдопотенциальной модели. Представлены результаты вычисления ударных адиабат, параметров для двойного и тройного ударного сжатия водорода и дейтерия, а также новые результаты, полученные для ударного и квазиэнтропического сжатия гелия. Полученные данные сравниваются с экспериментальными результатами, а также с результатами, полученными при помощи первопринципных методов.

THERMODYNAMICS OF DENSE HYDROGEN AND HELIUM PLASMA UNDER SHOCK AND QUASI-ENTROPIC COMPRESSION AT MEGABAR PRESSURE RANGE

V.K. Gryaznov¹, I.L. Iosilevskiy^{2,3}, V.E. Fortov^{1,2}

¹Institute of Problems of Chemical Physics RAS, Chernogolovka, Russia

²Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

³Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia
E-mail: grvk@fcp.ac.ru

The model for equation of state of warm dense matter is developed in frames of «chemical picture». Shock compressed gas is considered as a multi-component strongly interacted mixture of atoms, molecules, ions and electrons. Coulomb interaction of charged particles, short-range repulsion and attraction of heavy particles so as partial

degeneracy of free electrons are taken into account. Contribution of repulsion of atoms and molecules to thermodynamic functions is considered in frames of extended soft-sphere model and corresponds to non-empirical atom-atomic approximation. The modified pseudopotential model is used for description of interaction of charged particles. The results of calculation of principal Hugoniot and parameters for reshock states and third-shock reverberation of hydrogen and deuterium and new results obtained for shock and quasiisentropic compression of helium are presented. The calculation results are compared with experiments and the results of the first principle modeling.

3-5

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ И КИНЕТИЧЕСКИЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ МЕТАЛЛА В ДВУХТЕМПЕРАТУРНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Г.Ш. Болтачев^{1,2}, Н.Б. Волков^{1,2},
Е.А. Чингина¹, А.П. Яловец^{1,2}

¹Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

E-mail: nbv@ami.uran.ru, yalovets@physicon.ac.ru

Физические процессы, происходящие в металлах при импульсном воздействии интенсивных потоков электромагнитной энергии, существенно зависят от его длительности и интенсивности. Если длительность воздействия (τ_b), меньше или порядка времени установления равновесия между электронной и ионной компонентами вещества ($\tau_e \sim 10^{-12}$ с), то в металле возбуждается неравновесное состояние. Если при этом $\tau_b \sim \tau_e \gg \tau_p \sim 10^{-14}$ с (τ_p – время установления локального равновесия по импульсам) возбужденное состояние представляет собой неравновесную неизотермическую плазмopodobную среду, в которой температура электронов T_e существенно превышает температуру решетки (ионов) T_i . Релаксацию такого возбужденного состояния можно рассматривать в рамках двухтемпературного приближения электродинамики и механики сплошных сред. Для замыкания соответствующих дифференциальных уравнений в частных производных необходимо иметь уравнения состояния и кинетические коэффициенты. Цель предлагаемой работы – нахождение широкодиапазонных феноменологических выражений для термодинамических функций и кинетических коэффициентов металла в двухтемпературном приближении.

В основном состоянии энергия взаимодействия ионов со всей электронной подсистемы, подчиняющейся статистике Ферми-Дирака, и тензор упругих напряжений зависят от метрического тензора конденсированной среды. В случае шарового тензора напряжения для изотропной среды эти величины зависят от ее плотности (ρ). Для данного случая получены выражения для энергии и давления при $T_i = T_e = 0$, обеспечивающие правильную асимптотику при $\rho \rightarrow \rho_\infty < \rho_r$ (ρ_r – плотность, начиная с которой необходимо учитывать релятивизм электронной подсистемы). Фононы и электроны

проводимости, как общепринято, считаются коллективными возбуждениями. Вклад электронов проводимости при $T_e = 0$ учтен в энергии взаимодействия. Их вклад в термодинамические функции при $T_e > 0$ и концентрация определяются объемом атомной ячейки и T_e в рамках модели Томаса-Ферми с квантовыми и обменными поправками, в химпотенциал которой введены дополнительные поправки с целью правильного описания электронной подсистемы при нормальной плотности (ρ_0). Вклад в термодинамические функции твердого тела с одноатомной ячейкой равновесного фононного газа учитывается в рамках модели Дебая. При этом в энергетическом спектре фононного газа, зависящем от объема атомной ячейки, эффективно учтен вклад как длинноволновых, так и коротковолновых возмущений. Энергетический спектр электронов проводимости также зависит от объема. Предложенные выражения для описания термодинамических функций меди и алюминия оттестированы путем сравнения теоретических и экспериментальных ударных адиабат при $T_e = T_i = T$. Обсужден способ учета динамики электронного и фононного газов в металле с топологическими дефектами (дислокациями и дисклинациями) в рамках калибровочной теории классических полей.

Электронные кинетические коэффициенты находят решение кинетического уравнения, в котором эффективно учтено наличие топологических дефектов как в среднем поле, так и в интеграле столкновений, записанным в τ -приближении. Рассеяние электронов проводимости происходит на флуктуациях плотности, которые в общем случае определяются динамическим структурным фактором $S(\omega, q)$. В длинноволновом приближении статический структурный фактор $S(\omega = 0, q \rightarrow 0)$ определяется термодинамическими функциями среды. Последнее позволяет наравне с тепловым вкладом в флуктуации плотности учесть также вклад дефектной структуры металла. В рамках предложенного подхода сделан вывод о том, что основным механизмом наблюдаемого поглощения фемтосекундного лазерного излучения в алюминиевой мишени являются флуктуации плотности, возбуждаемые горячими электронами проводимости.

Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект No. 10-08-00691-а), Президиума УрО РАН в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Вещество при высоких плотностях энергии» (проект No. 12-П-2-1005) и поддержки исследований молодых ученых и аспирантов (проект No. 11-2-НП-590).

THERMODYNAMIC FUNCTIONS AND KINETIC COEFFICIENTS FOR METALS WITHIN TWO-TEMPERATURE APPROACH

G.Sh. Boltachev^{1,2}, N.B. Volkov^{1,2},
E.A. Chingina¹, A.P. Yalovets^{1,2}

¹Institute of Electrophysics UB RAS, Yekaterinburg, Russia

²South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: nbv@ami.uran.ru, yalovets@physicon.ac.ru

Physical processes, taking place in metals during the electromagnetic energy intensive flows pulse impact,

depend essentially on its duration and intensity. If impact duration (τ_b) is less or close to the time of electron-ion matter components equilibrium establishment ($\tau_e \sim 10^{-12}$ s), than non-equilibrium state is excited in the metal. If thereat $\tau_b \sim \tau_e \gg \tau_p \sim 10^{-14}$ s (τ_p is a time of an establishment of the local momentum balance in each of the substance component), then excited state represents the non-equilibrium non-isothermal plasma-like medium in which the electronic temperature T_e essentially exceeds the lattice (ion) temperature T_i . The relaxation of such excited state is possible to consider within the framework of two-temperature approximation of the continuum electrodynamics and mechanics. To close the corresponding partial differential equations it is necessary to have equations of state and kinetic coefficients. The objective of the suggested work is to obtain the wideband phenomenological expressions for thermodynamic functions and kinetic coefficients for metals within two-temperature approach.

While in ground state the energy of interaction of ions with the whole electronic subsystem, complying to Fermi-Dirac statistics, and elastic stress tensor both depend on the condensed matter metric tensor. In case of spherical tensor for some isotropic medium the quantities depend on its density (ρ). For the case we obtained the expressions for energy and pressure at $T_i = T_e = 0$, maintaining correct asymptotics at $\rho \rightarrow \rho_\infty < \rho_r$ (ρ_r – density, from which on one should take into account the electronic subsystem relativity). The phonons and conductivity electrons are generally accepted to be collective excitation. The conductivity electrons contribution at $T_e = 0$ is taken into account in interaction energy. Their contribution to the thermodynamic functions at $T_e > 0$ and concentration are defined via atomic cell volume and T_e within the Thomas-Fermi model with quantum and exchange corrections, where to the chemical potential were added corrections to represent the electronic subsystem at normal density (ρ_0) correctly. The equilibrium phonon gas contribution to the thermodynamic functions of the solid body with monoatomic cell is taken into account within the Debye model. Herein both long- and short-wave perturbations contribution is effectively taken into account for the atomic cell volume dependent phonon gas energy spectrum. Suggested expressions for Cu and Al thermodynamic functions description are tested through the theoretical and experimental shock Hugoniot curves comparison at $T_e = T_i = T$. The method of taking into account the dynamics of electron and phonon gases in metals having topological defects (dislocations and disclinations) within the classic fields gauge theory is discussed.

The kinetic coefficients for electrons can be found solving the kinetic equation, where topological defects presence in both mean field and collision integral is effectively taken into account, written within τ -approximation. The conductivity electrons scattering takes place on density fluctuations, which are generally defined by the dynamic structure factor $S(\omega, q)$. Within the long-wave approximation the static structure factor $S(\omega = 0, q \rightarrow 0)$ is defined by the thermodynamic functions of the medium. The above-mentioned allows for density fluctuations to account equally both thermal and metals defect structure contributions. Within the suggested approach it was deduced that for the major mechanism of the observed femtosecond laser irradiation absorption in Al target there are density fluctuations,

induced by hot conductivity electrons.

The work is carried out under partial financial support of the RFBR (project No. 10-08-00691-a), the Presidium of UB RAS within the program for basic research of the Presidium of RAS «Matter at high energy densities» (project No. 12-П-2-1005) and junior scientists and postgraduate students research support (project No. 11-2-НП-590).

3-6

ИЗУЧЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ МЕДНОЙ МИШЕНЬЮ

П.А. Лобода, Д.О. Замураев, Н.Г. Карлыханов,
А.А. Овечкин, А.В. Потапов, Н.А. Смирнов,
А.С. Тищенко, А.А. Шадрин, А.Л. Шамраев

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Проведено теоретическое и экспериментальное изучение поглощения 800-нм фемтосекундных лазерных импульсов нормального падения металлической медной мишенью. Теоретическое моделирование выполнялось с помощью усовершенствованной версии пакета одномерной гидродинамики ЭРА [1], использующей новые теоретические данные по термодинамическим функциям вещества мишени и частотам релаксации и энергообмена электронов с ионной решеткой. Эти данные были получены в рамках теории функционала плотности с помощью полнопотенциального метода линейаризованных маффин-тин орбиталей (FP-LMTO) [2, 3] и модели Либермана [4], реализованной в программе RESEOS [5], а также по химической модели плазмы, построенной с использованием суперкофигурационного подхода (CP-SC) [6].

Измерения коэффициентов поглощения лазерного излучения $A(I_L)$ медной мишенью проводились на фемтосекундной лазерной установке РФЯЦ – ВНИИТФ в диапазоне интенсивностей излучения на мишени $I_L \sim 10^{12} \div 10^{15}$ Вт/см².

Представлены оптическая схема экспериментов и сравнение теоретических зависимостей $A(I_L)$ с результатами измерений, а также с экспериментальными и расчетными данными других авторов [7, 8]. Исследованы роль электрон-ионного энергетического обмена и эффект упрочнения металлической связи в меди при фемтосекундном нагреве.

Литература

1. Барышева Н.М., Зуев А.И., Карлыханов Н.Г. и др. // ЖВММФ, **22**, 401–410 (1982).
2. Savrasov S.Yu. / Phys. Rev. B. **54**, 16470 (1996).
3. Sin'ko G.V., Smirnov N.A. Phys. Rev. B. **74**, 134113 (2006).
4. Liberman D.A. // J Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, **27**, 335–339 (1982).
5. Новиков В.Г., Овечкин А.А. // Мат. Моделирование, **22**, 69–82 (2010).
6. Loboda P.A., Popova V.V., Shadrin A.A. Contrib // Plasma Phys., **49**, 738–747 (2009).
7. Fisher D., et al. Laser Part. Beams **23**, 391–393 (2005).

8. Kirkwood S.E., Tsui Y.Y., Fedosejevs R., Brantov A.V., Bychenkov V.Yu. // *Phys. Rev. B.* **79**, 144120 (2009).

3-7

STUDIES OF ABSORPTION OF FEMTOSECOND LASER PULSES IN SOLID-DENSITY COPPER

P.A. Loboda, N.G. Karlykhanov, A.A. Ovechkin,
A.V. Potapov, A.A. Shadrin, A.L. Shamraev, N.A. Smirnov,
A.S. Tischenko, D.O. Zamuraev

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

We performed theoretical and experimental studies of absorption of 800 nm normal-incidence femtosecond laser pulses by a metal copper target. Numerical simulation was performed with a modified version of the 1D ERA hydro-code [1] that employs new theoretical data on thermodynamic functions of the target material along with an improved description of relaxation and electron-ion energy exchange rates. These new data were obtained within the density functional theory using the modified full-potential linear muffin-tin orbital method (FP-LMTO) [2, 3], Liberman's model [4] implemented in the RESEOS code [5], and a chemical-picture-based model of dense plasmas utilizing the superconfiguration approximation (CPSC) [6].

The measurements of laser-pulse absorption coefficients $A(I_L)$ in copper were performed on the RFNC – VNIITF femtosecond laser facility in the range of laser light intensities on the target $I_L \sim 10^{12}$ – 10^{15} W/cm². We present the layout of the experiments and the comparisons of theoretical dependences $A(I_L)$ with the results of measurements and with the other theoretical and experimental data [7, 8]. We also analyze the role of the electron-ion energy exchange and the effect of metal-bond hardening in copper heated by femtosecond laser pulses.

References

1. Barysheva N.A., Zuev A.I., Karlykhanov N.G., *et al.* // *Zh. Vychislit. Mat. i Mat. Fiz. (Sov. J. of Comput. Math. & Math. Phys)* **22**, 401–410 (1982) [in Russian].
2. Savrasov S.Yu. // *Phys. Rev. B.* **54**, 16470 (1996).
3. Sin'ko G.V., Smirnov N.A. // *Phys. Rev. B.* **74**, 134113 (2006).
4. D.A. Liberman. *J Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **27**, 335–339 (1982).
5. Novikov V.G., Ovechkin A.A., *Math. Models & Comput. Simulations* **3**, 290–298 (2011).
6. Loboda P.A., Popova V.V., Shadrin A.A. // *Contrib. Plasma Phys.*, **49**, 738–747 (2009).
7. Fisher D., *et al.* *Laser Part. Beams* **23**, 391–393 (2005).
8. Kirkwood S.E., Tsui Y.Y., Fedosejevs R., Brantov A.V., Bychenkov V.Yu. // *Phys. Rev. B.* **79**, 144120 (2009).

РАСЧЕТ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ И УДАРНЫХ АДИАБАТ МЕТАЛЛОВ ПО ТЕОРЕТИЧЕСКИМ МОДЕЛЯМ ПЛОТНОГО ИОНИЗОВАННОГО ВЕЩЕСТВА С УЧЕТОМ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ЭФФЕКТОВ

П.А. Лобода, А.А. Овечкин, А.А. Шадрин

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: a.a.shadrin@vniitf.ru

Изучение термодинамических и оптических свойств плотной неидеальной плазмы является одним из наиболее актуальных направлений фундаментальных исследований свойств веществ в экстремальных условиях, которое необходимо для решения широкого круга задач физики высоких плотностей энергии: описания взаимодействия интенсивных потоков энергии с веществом, различных астрофизических приложений и многих других важных задач. Поэтому разработка реалистических физических моделей и методов расчета, которые позволяют решать такие задачи, имеет большое значение.

В работе представлены результаты расчетов уравнений состояния (УРС) и ударных адиабат металлов с учетом оболочечных эффектов, проведенных по программам RESEOS [1] и EOSC [2], реализующих соответственно квантово-статистическую ячеечную модель Либермана [3] и т.н. химическую модель плотной плазмы [4–6] с использованием суперконфигурационного приближения [7] (CP-SC).

Расчеты проведены в широком диапазоне плотностей и температур, представляющем интерес для различных задач физики высоких плотностей энергии. Полученные результаты сравниваются с данными расчетов по модели Томаса–Ферми [8, 9] и широко используемого в практических расчетах УРС Г.Е. Клинишова [10]. Обсуждается важность учета оболочечных осцилляций при вычислении УРС.

Литература

1. Novikov V.G., Ovechkin A.A. *Math. Models and computer simulations*, **3**, 290–299 (2011).
2. Loboda P.A., Shadrin A.A., Popova V.V. *Contrib. Plasma Phys.*, **49**, 738–747 (2009).
3. Liberman D.A. *Phys. Rev. B*, **20**, 4981 (1979).
4. Hummer D.G., Mihalas D. *Astrophys. J.*, **331**, 794 (1988).
5. Nayfonov A., Dappen W., Hummer D., Mihalas D. *The Astrophys. J.*, **526**, 451 (1999).
6. Carnahan N.F., Starling K.E. // *J. Chem. Phys.*, **51**, 635 (1969).
7. Bar-Shalom A., *et al.* *Phys. Rev. A*, **40**, 3183 (1989).
8. Никифоров А.Ф., Новиков В.Г., Уваров В.Б. Квантово-статистические модели высокотемпературной плазмы и методы расчета росселандовых пробегов и уравнений состояния. М.: Физматлит (2000).
9. Калиткин Н.Н., Кузьмина Л.В. Таблицы термодинамических функций вещества при высокой концентрации энергии // Препринт № 35, ИПМ АН СССР (1975). В.П. Копышев. О термодинамике ядер одноатомного вещества // Численные методы механики сплошной среды, **8**, № 6, 54–67 (1977).
10. Елисеев Г.М., Клинишов Г.Е. Уравнение состояния твердых веществ и его сплайн-аппроксимация // Препринт ИПМ АН СССР, № 173 (1982).

**CLACULATION OF EQUATION OF STATE AND
SHOCK HUGONIOTS OF METALLS USING
THERETICAL MODEL OF DENSE IONIZED
MATTER WITH SHELL EFFECTS ACCOUNTING**

P.A. Loboda, A.A. Ovechkin, A.A. Shadrin

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

E-mail: a.a.shadrin@vniitf.ru

Study of thermodynamic and optical properties of dense nonideal plasma is the one of the actual concepts of fundamental research of matter in extreme conditions. It's important for the solution of wide range of high energy density physics applications: to simulate the interaction of laser pulses with matter, different astrophysical applications and many other important tasks. Therefore the development of realistic physical models and calculation methods to solve these tasks are of great importance.

We present the results of calculations of equations of state (EOS) and shock Hugoniots of metals with shell effects accounting using quantum-statistical cell model of Liberman [3] and so called chemical model of dense plasma [4–6] using superconfiguration approach [7] (CP-SC) that implemented in the RESEOS code [1] and the EOSC code [2].

Calculations were done in wide range of densities and temperatures that is important for different applications of high energy density physics. Calculated shock Hugoniots and thermodynamical functions are compared with data calculated using Thomas–Fermi model [8, 9] and Klinishov's EOS [10] widely used in practical calculations. Importance of shell oscillation for EOS calculations also discussed.

References

1. Novikov V.G., Ovechkin A.A. Math. Models and computer simulations, **3**, 290-299 (2011).
2. Loboda P.A., Shadrin A.A., Popova V.V. Contrib. Plasma Phys., **49**, 738–747 (2009).
3. Liberman D.A. Phys. Rev. B, **20**, 4981 (1979).
4. Hummer D.G., Mihalas D. Astrophys. J., **331**, 794 (1988).
5. Nayfonov A., Dappen W., Hummer D., Mihalas D. The Astrophys. J., **526**, 451 (1999).
6. Carnahan N.F., Starling K.E. // J. Chem. Phys., **51**, 635 (1969).
7. Bar-Shalom A., et al. Phys. Rev. A, **40**, 3183 (1989).
8. Nikiforov A.F., Novikov V.G., Uvarov V.B. Quantum-statistical models of hot dense matter. Methods for computation opacity and equation of state. Birkhäuser, Basel, Switzerland (2005).
9. Kalitkin N.N., Kuz'mina L.V. Thermodynamic functions of matter at high energy density // Preprint IPM RAS USSR, № 35 (1975).
10. Kopyshv V.P. Numerical methods of continuum mechnics, **8**, № 6, 54–67 (1977) [in Russian].
11. Eliseev G.M., Klinishov G.E. Equation of state of solid matters and spline-approximation // Preprint IPM RAS USSR, № 173 (1982) [in Russian].

**ЗАВИСИМОСТЬ
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН
ОТ ИСПОЛЬЗУЕМОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ
ДЛЯ ОБМЕННОГО ПОТЕНЦИАЛА В МОДЕЛЯХ
СРЕДНЕГО АТОМА**

В.Г. Новиков², П.А. Лобода¹, А.А. Овечкин¹

¹Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша,
Москва, Россия

Обменное взаимодействие электронов, как известно, имеет нелокальный характер [1], но в приближении самосогласованного поля оно часто учитывается локальным образом путем введения соответствующего слагаемого в электронном потенциале. Выражение для локального обменного потенциала обычно получается в квазиклассическом приближении, зависит явно от пространственного распределения плотности электронов и может также явно зависеть от температуры. В данной работе на примере модели Либермана [2] рассмотрены различные приближения для обменного потенциала. Проиллюстрирована зависимость уравнений состояния и ударных адиабат от выбора приближения для обменного потенциала и показана область температур и плотностей вещества, в которой учет явной зависимости обменного потенциала от температуры может приводить к нефизическим значениям электронных энтропии, теплоемкости, теплового давления и тепловой внутренней энергии.

Литература

1. А.Ф. Никифоров, В.Г. Новиков, В.Б. Уваров. Квантово-статистические модели высокотемпературной плазмы. Методы расчета росселандовых пробегов и уравнений состояния. М., Физматлит, 2000 (400 с.).
2. D.A. Liberman. Phys. Rev. B 20, 4981–4989 (1979).

**DEPENDENCE
OF THERMODYNAMIC FUNCTIONS
ON THE APPROXIMATION TO REPRESENT
THE EXCHANGE POTENTIAL
IN AVERAGE ATOM MODELS**

V.G. Novikov², P.A. Loboda¹, A.A. Ovechkin¹

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

²Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russia

The exchange interaction between electrons is well known to be non-local by nature [1] but in the self-consistent-field approximation it is routinely treated in a local manner by means of a corresponding term in the electron potential. The expression for local exchange potential is usually obtained in semi-classical approximation, explicitly depends on spatial distribution of electron density and may also explicitly depend on temperature.

We examine various approximations for the exchange potential as applied to Liberman model [2]. The dependence of equations of state and shock Hugoniots on the approximations chosen to represent the exchange potential is demonstrated. The range of temperatures and material

densities where the explicit dependence of exchange potential on temperature may result in unphysical values of electron components of entropy, heat capacity, thermal pressure, and thermal energy is also characterized.

References

1. Nikiforov A.F., Novikov V.G., Uvarov V.B. Quantum statistical models of hot dense matter. Methods for computation opacity and equations of state. Basel, Birkhauser, 2005.
2. Liberman D.A. // Phys. Rev. B 20, 4981–4989 (1979).

4. Novikov N.G. and Ovechkin A.A. // Math. Mod. and Comp. Simul. v. 3, p. 290 (2011).

3-9

ПЕРВОПРИНЦИПНЫЕ РАСЧЕТЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ НАГРЕТЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛЕ ПОКОЯЩИХСЯ ЯДЕР НА ПРИМЕРЕ МЕДИ

Н.А. Смирнов, П.А. Лобода,
А.А. Шадрин, А.А. Овечкин

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: nasmirnov@vniitf.ru

В работе проведены первопринципные расчеты полноэлектронным методом линейных маффин-тин орбиталей (FP-LMTO) ряда теплофизических свойств кристалла меди в случае, когда электроны разогреты до температур T_e порядка десятка электрон-вольт, а ядра покоятся в узлах кристаллической решетки. Такая ситуация реализуется при воздействии фемтосекундного лазерного излучения на вещество [1].

В представленной работе показано, что зависимость электронной теплоемкости от T_e , которая часто используется при моделировании взаимодействия лазерного импульса с веществом, не является линейной. Коэффициент электрон-фонноного обмена является величиной не постоянной при нагреве электронов и может изменяться на порядок в зависимости от температуры электронов. Также в работе рассчитаны упругие константы меди для различных значений T_e . Показано, что повышение температуры электронов приводит к упрочнению кристалла меди. Используя данные расчетов упругих констант, в работе вычислена зависимость температуры Дебая от T_e и приведена оценка зависимости температуры плавления T_m от T_e , полученная с помощью критерия Линдемана.

Проведено сравнение некоторых результатов расчетов методом FP-LMTO с результатами других расчетов, в частности, с химической моделью плазмы [3] и с моделью Либермана, реализованной в работе [4]. Отмечено хорошее согласие термодинамических величин, полученных различными методами в области их применимости.

Литература

1. Loboda P.A., Smirnov N.A., Shadrin A.A., Karlykhanov N.G., HEDP v. 7, p. 361 (2011).
2. Sin'ko G.V., Smirnov N.A., J. Phys. Cond. Mat. v. 14, p. 6989 (2002).
3. Loboda P.A., Popova V.V., Shadrin A.A. // Contrib. Plasma Phys. v. 49, p. 738 (2009).

AB INITIO CALCULATIONS FOR THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF A SYSTEM OF HEATED ELECTRONS IN THE FIELD OF COLD NUCLEI: COPPER AS A PROTOTYPE

N.A. Smirnov, P.A. Loboda,
A.A. Shadrin, A.A. Ovechkin

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

E-mail: nasmirnov@vniitf.ru

The paper presents ab initio calculations by the full-potential linear muffin-tin orbital method (FP-LMTO) for some thermophysical properties of a copper crystal where electrons are heated to a temperature T_e of ~ 10 electronvolts and nuclei are at rest in lattice nodes. This happens during the femtosecond laser pulse irradiation of a solid target [1].

It is shown that the dependence of electronic specific heat on T_e , which is often used for modeling laser interaction with matter, is not linear. The electron-phonon coupling factor is not constant as electrons heat and can change on an order of magnitude depending on electron temperature. We also calculated elastic constants for different values of T_e . These calculations suggest that copper become harder as electron temperature increases. With the calculated elastic constants, we obtained the Debye temperature as a function of electron temperature and evaluated how the melting temperature T_m depends on T_e with the Lindemann criterion.

Some FP-LMTO results are compared with other calculations, in particular, with the chemical-picture-based model provided in [3] and the Liberman model implemented in [4]. Thermodynamic quantities obtained with different methods agree well in their applicability ranges.

References

1. P.A. Loboda, N.A. Smirnov, A.A. Shadrin, N.G. Karlykhanov, HEDP v. 7, p. 361 (2011).
2. G.V. Sin'ko, N.A. Smirnov, J. Phys. Cond. Mat. v. 14, p. 6989 (2002).
3. P.A. Loboda, V.V. Popova, A.A. Shadrin, Contrib. Plasma Phys. v. 49, p. 738 (2009).
4. N.G. Novikov and A.A. Ovechkin, Math. Mod. and Comp. Simul. v. 3, p. 290 (2011).

3-10

РЕЛЕЙ-ТЕЙЛОРОВСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В ДВУХТЕМПЕРАТУРНОЙ МОДЕЛИ ПЛАЗМЫ

В.А. Адарченко

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: v.a.adarchenko@vniitf.ru

В двухтемпературной модели плазмы в коротковолновом приближении изучена зависимость инкрементов

та Релей-Тэйлоровской неустойчивости от скорости обмена энергией между компонентами (электронами и ионами). Уравнения состояния компонент считаются произвольными. Рассматривается случай, когда возмущенные температуры компонент совпадают. Установлено, что порог развития неустойчивости совпадает со случаем равновесного адиабатического движения вещества. Исследована зависимость инкрементов от характерного времени релаксации возмущенных температур. Показано, что учет неравновесности приводит к уменьшению инкремента неустойчивости по сравнению со случаем равновесного адиабатического движения. Таким образом, процесс установления теплового равновесия производит эффект вязкости.

THE RAYLEIGH-TAYLOR INSTABILITY IN TWO TEMPERATURE PLASMA MODEL

V.A. Adarchenko

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

E-mail: v.a.adarchenko@vniitf.ru

The Rayleigh-Taylor instability linear growth rate dependence on component energy interaction rate was studied for two temperature plasma model. Arbitrary equation of state and equal non perturbed components temperatures was allowed. It was shown that instability threshold for this case is the same as for adiabatic flow. In case of thermal non equilibrium instability growth rate is less as compared with adiabatic flow. Hereby thermal relaxation has viscosity effect.

3-11

ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ В МАГНИТНЫХ ЛОВУШКАХ

К.В. Брушлинский¹, А.С. Гольдич²

¹Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,
Москва, Россия

²Научно-исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия

E-mail: brush@keldysh.ru, dephmaster@gmail.com

Представлен обзор исследований математических моделей и расчетов равновесных плазменных конфигураций в магнитном поле, которые связаны с разработкой магнитных ловушек для удержания плазмы и представляют интерес в проблемах управляемого термоядерного синтеза. Перспективный класс ловушек-«галатей» предложен А.И. Морозовым [1, 2]: проводники с током, создающие магнитное поле в них, погружены в плазменный объем, что обогащает геометрию поля и дает основание повысить эффективность удержания.

Математические модели процессов в плотной горячей плазме базируются на уравнениях магнитной газодинамики. Конфигурации плазмы, электрического тока и магнитного поля в равновесии характеризуются давлением p , плотностью тока j и напряженностью поля H , распределение которых в пространстве описывается

МГД-уравнением равновесия и уравнениями Максвелла. Краевая задача с этими уравнениями – основа модели искомой конфигурации. Если ловушки обладают симметрией (плоской, осевой, винтовой), то математический аппарат плазмостатики сводится к двумерным краевым задачам с одним скалярным уравнением Грэда–Шафранова – полулинейным эллиптическим уравнением второго порядка для функции магнитного потока [3, 4]. Здесь возникают нетривиальные вопросы существования, единственности и бифуркации решений, которые являются общими для широкого класса моделей взаимодействия процессов реакции и диффузии и обязаны спектральным свойствам дифференциального оператора линеаризованной задачи [5, 6].

Численное решение задач позволяет найти равновесное распределение плазмы, поля и тока в объеме ловушки и оптимизировать его в нужную сторону при варьировании параметров. Приводятся три примера тороидальных ловушек-галатей: «Пояса» [7], «Трилистника» и «Стелларатор-галатеи» [8], модели которых дополнительно упрощены распрямлением тора в цилиндр. После краткого обзора постановок задач и результатов исследований в рассматриваемой области обсуждаются: спектральный анализ бифуркаций, связанных с неединственностью решения задачи о «Поясе»; расчет конфигурации «Трилистник» с тремя параллельными проводниками в цилиндре; анализ двух типов конфигураций в «Стелларатор-галатее», в которых плазма сосредоточена на оси, как в традиционном стеллараторе, или на сепаратрисе магнитного поля, что соответствует природе ловушек-галатей. Особое внимание обращено на распределение электрического тока, который как правило, обращается в нуль в местах максимального давления плазмы и сосредоточен вблизи границ плазменных конфигураций, т. е. имеет тенденцию к «скиннингованию».

Работы поддержаны РФФИ (проекты №12-01-0071 и №11-01012043-офи м)

Литература

1. Морозов А.И. О галатеех – плазменных ловушках с омываемыми плазмой проводниками // Физ. плазмы, 1992. Т. 18. Вып. 3. С. 305–316.
2. Морозов А.И., Савельев В.В. О галатеех-ловушках с погруженными в плазму проводниками // УФН, 1998. Т. 168. № 11. С. 1153–1194.
3. Шафранов В.Д. О равновесных магнитогидродинамических конфигурациях // ЖЭТФ, 1957. Т. 33. Вып. 3(9). С. 710–722.
4. Grad H., Rubin H. / Hydromagnetic equilibria and force-free fields // Proc. 2-nd United Nations Int. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva. Vol. 31. P. 190. Columbia Univ. Press, N.Y. 1959.
5. Брушлинский К.В. Математические и вычислительные задачи магнитной газодинамики. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2009. 200 с.
6. Брушлинский К.В., Савельев В.В. Магнитные ловушки для удержания плазмы // Матем. моделирование, 1999. Т. 11. № 5. С. 3–36.
7. Брушлинский К.В., Игнатов П.А. Плазмостатическая модель магнитной ловушки «Галатее-пояс» // ЖВМиМФ, 2010. Т. 50. № 12. С. 2184–2194.
8. Брушлинский К.В., Зуева Н.М., Михайлова М.С. и др. / Численное моделирование прямых винтовых шнуров с проводниками, погруженными в плазму // Физ. плазмы, 1994. Т. 20. № 3. С. 284–292.

NUMERICAL SIMULATION OF PLASMA CONFINEMENT IN MAGNETIC TRAPS

K.V. Brushlinsky¹, A.S. Goldich²

¹Keldysh Institute for Applied Mathematics RAS,
Moscow, Russia

²National Research Nuclear University «MEPhI»,
Moscow, Russia

E-mail: brush@keldysh.ru, dephmaster@gmail.com

Mathematical models and computations of equilibrium plasma configurations in a magnetic field are reviewed. Investigations concern the elaborations of magnetic traps for plasma confinement and are interesting in the controlled nuclear fusion problems. A.I. Morozov [1, 2] suggested a promising class of traps, so-called «galateyas»: current carrying wires are immersed in the plasma, the magnetic field geometry becomes more varied and may advance the confinement efficiency.

Mathematical models of processes in the dense and hot plasma are based on the magnetogasdynamic equations. Plasma, electric current and magnetic field configurations are specified in equilibrium by the pressure p , current density j and field intensity H . Their space spreading is described by the MHD equilibrium equation and the Maxwell ones. Boundary problems with these equations form the basis of desired configuration models. If the traps have a symmetry (plane, axial, helical), the plasmastatic mathematical means may be reduced to two-dimensional boundary problems with the single scalar Grad-Shafranov equation, a semilinear elliptic second order one for the magnetic flux function [3, 4]. Some nontrivial questions on the solution existence, uniqueness and bifurcation arise here, that are common for a large class of the reaction and diffusion process models. They are connected with spectral properties of the linearized problem differential operator [5, 6].

In numerical solving the problems we can obtain the equilibrium plasma, field and current spreading through the trap volume and improve it, varying the parameters. Three examples of toroidal galateya-traps are presented: the «Belt» [7], the «Threeleaf» and the «Galateya-stellarator» [8]. Their models are simplified by straightening of torus into cylinder. After a short review of the problem statement and recent investigation results we will present: the spectral analysis of bifurcation, connected with the solution nonuniqueness in the «Belt» problem; some «Threeleaf» configurations with three parallel conductors; an analysis of the two type configurations in the «Galateya-stellarator», where the plasma is situated at the axis, as in traditional stellarators, or at the magnetic separatrix, according to the galateya nature. Special attention is given to the electric current spreading. It vanishes as a rule, where the plasma pressure is maximum, and is concentrated near the plasma configuration boundaries.

Our works are supported by RFBR (projects no. 12-01-00071 and no. 11-01-12043).

Referencies

1. Morozov A.I. On galateyas – plasma traps with plasma-swepted conductors // *Sov. J. Plasma Phys.* 1992. V. 18. P. 159.

2. Morozov A.I., Savelyev V.V. On galateas – magnetic traps with plasma imbedded conductors // *Physics-Uspekh.* 1998. V. 41 (11) P. 1049–1089.

3. Shafranov V.D. On the equilibrium MHD configurations // *Sov. Phys. JETP.* 1958. V. 6. P. 545.

4. Grad H., Rubin H. Hydromagnetic equilibria and force-free fields // Columbia Univ. Press, N.Y. 1959. Proc. 2-nd United Nations Int. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, V. 31, P. 190.

5. Brushlinsky K.V. Mathematical and computational magneto-gasdynamic problems. – M. BINOM. Laboratoria znaniy. 2009. (in russian).

6. Brushlinsky K.V., Savelyev V.V. Magnetic traps for plasma confinement // *Matematicheskoe modelirovanie.* 1999. V. 11 (5). P. 3–36 (in russian).

7. Brushlinsky K.V., Ignatov P.A. A plasmastatic model of the Galathea-Belt magnetic trap // *Computational Mathematics and Mathematical Physics.* 2010. V. 50. No. 12. P. 2071–2081.

8. Brushlinsky K.V., Zueva N.M., Mikhailova M.S. and al. // Numerical simulation of straight helical sheaths with conductors immersed in plasma // *Plasma Physics Reports.* 1994. V. 20. No. 3. P. 257–264.

3-12

НЕЛИНЕЙНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАЗМЫ В ТЕЧЕНИЯХ С УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

М.Я. Иванов¹, Ю.Л. Серов²

¹Центральный институт авиационного моторостроения
им. П.И. Баранова, Москва, Россия

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Москва, Россия

E-mail: ivanov@ciam.ru, yuserov@mail.ioffe.ru

Показано, что распространение ударных волн в плотной плазме в резонансных диапазонах скоростей определяется обнаруженными нелинейными динамическими свойствами плазмы. Анализируются данные баллистического эксперимента по аномальному обтеканию тел в газоразрядной плазме [1–3], а также известные экспериментальные данные, полученные при исследовании ионизационной неустойчивости сильных ударных волн и детонации взрывчатых веществ. Все перечисленные эффекты имеют единую природу и связаны с образованием в области ударной волны ионно-звукового солитонного сгустка, формирующего ионно-звуковую ударную волну [4, 5]. Таким образом при взаимодействии высокоскоростной ударной волны с плазмой реализуется специфический резонансный механизм взаимодействия заряженной и нейтральной компонент, который приводит к образованию ионно-звуковой ударной волны. Приводятся экспериментальные результаты, показывающие формирование солитонных сгустков в плотной плазме. Показано, что фазовая скорость солитонного сгустка определяет скоростные границы аномального обтекания, ионизационной неустойчивости, газовой детонации и детонации конденсированных сред. Рассмотрено высокоскоростное резонансное ионно-звуковое взаимодействие ударных волн с реагирующей газоплазменной средой. Продемонстрирована связь скорости детонации с атомно-молекулярной структурой

рой продуктов взрывного разложения и заселённостью энергетических термов атомов и молекул. С точки зрения плазменной модели распространения сильных ударных волн детонация является проявлением нелинейных динамических свойств плазмы и частным случаем общей задачи резонансного взаимодействия ударной волны с плазмой.

Во второй части доклада на основе подхода [6, 7] рассмотрены теоретические аспекты формирования солитонных сгустков в плотной плазме. Получены аналитические и численные решения для сверхзвуковых солитонов. Приведена система термодинамически согласованных законов сохранения [8], позволяющая описать механизм лучистой тепловой предварительной ионизации нейтральной среды. Приводятся ряд дополнительных примеров, иллюстрирующих нелинейные эффекты в плотной плазме.

Литература

1. Авраменко Р.Ф., Климов А.И., Серов Ю.Л. и др. Эффект аномального обтекания тел плазмой // Открытие № 007. Приоритет 17.09.80. Зарегистрировано 25.12.86 в Гос. реестре открытий СССР.
2. Serov Yu.L. Experimental Investigation of a Supersonic Sphere Motion in Plasma on Ballistic Apparatus // Proc. 2nd Weakly Ionized Gases Workshop, Norfolk, USA, 24-25 April, 1998, AIAA, 1998, pp. 32–45.
3. Pavlov V.A., Serov Yu.L. Supersonic Motion of a Body in Weakly Ionized Plasma: Phenomena of Trans-Ion-Acoustic Plasma Dynamics // 3rd Weakly Ionized Gases Workshop, Norfolk, USA, 1999. / AIAA-99-4852.
4. Pavlov V.A.. Ion-Acoustic «Houston's Horse» Effect // Plasma Physics Reports, 2000, V. 26, No. 6, pp. 507–511.
5. Serov Yu.L. Interaction of shock waves with plasma: detonation of explosives on the basis of nitro-compounds (nitroglycerine, nitroglycol, trotyl) // Proc. 8th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics. Moscow, Russia, March 31, April 2, 2009, pp. 343–347.
6. Иванов М.Я. Об одном классе солитонных решений гидродинамических уравнений движения ионов в однородной плазме при отсутствии внешних полей. //АН СССР, Физика плазмы, 1982, т. 8, вып. 3, с. 607–612.
7. Ivanov M.Ja., Terentieva L.V. Exact solutions of two-fluid approach equations in aerospace plasmadynamics // AIAA Paper No. 2003–843, 8 p.
8. Иванов М.Я. Термодинамически согласованные законы сохранения в модели излучающего теплопроводного газа. // Журн. вычисл. матем. и матем. физики, том 51, № 11, 2011, с. 142–151.

NONLINEAR DYNAMIC PROPERTIES OF PLASMA IN FLOWS WITH SHOCK WAVES

M.Ja. Ivanov¹, Yu.L. Serov²

¹Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russia

²Ioffe Institute RAS, Moscow, Russia

E-mail: ivanov@ciam.ru, yuserov@mail.ioffe.ru

It is shown that the propagation of shock waves in dense plasma in resonance range of speeds is determined by detected nonlinear dynamic properties of plasma. Data of ballistic experiment on the anomalous flow over bodies in discharge plasma [1–3], as well as the known experimental data obtained in the study of the ionization instability of strong shock waves and detonation of explosives are ana-

lyzed. All these effects have a common nature and are associated with the soliton bunch which forming the ion-acoustic shock wave [4, 5]. Thus at the interaction of high-speed shock wave with plasma the specific resonant mechanism of interaction of charged and neutral components is realized. This leads to the formation of ion-acoustic shock wave. Experimental results showing the formation of a soliton bunch in dense plasma are presented. It is shown that the phase velocity of the soliton bunch determines the speed limits of abnormal flow, ionizational instability, gas detonation and detonation of condensed medium. High-speed resonant ion-acoustic interaction of shock waves with reacting gas – plasma medium is considered. Association of detonation velocity with atomic and molecular structure of explosive decomposition products and the population of the energy terms of atoms and molecules is demonstrated. From the point of view plasma model of strong shock waves propagation the detonation is the display of nonlinear dynamic properties of plasma. Detonation is the special case of the general problem of resonant interaction of a shock wave with plasma.

In the second part of the report on the basis of the approach, stated in ref. [6, 7] theoretical aspects of soliton bunches formation in dense plasma are considered. Analytical and numerical solutions for supersonic solitons are received. The system of thermodynamically coordinated laws of conservation [8], allowing to describe the mechanism of radiant thermal preliminary ionization of the neutral medium is shown. A number of the additional examples illustrating nonlinear effects in dense plasma is resulted.

References

1. Авраменко Р.Ф., Климов А.И., Серов Ю.Л. и др. Эффект аномального обтекания тел плазмой // Открытие № 007. Приоритет 17.09.80. Зарегистрировано 25.12.86 в Гос. реестре открытий СССР.
2. Serov Yu.L. Experimental Investigation of a Supersonic Sphere Motion in Plasma on Ballistic Apparatus // Proc. 2nd Weakly Ionized Gases Workshop, Norfolk, USA, 24-25 April, 1998, AIAA, 1998, pp. 32–45.
3. Pavlov V.A., Serov Yu.L. Supersonic Motion of a Body in Weakly Ionized Plasma: Phenomena of Trans-Ion-Acoustic Plasma Dynamics // 3rd Weakly Ionized Gases Workshop, Norfolk, USA, 1999. AIAA-99-4852.
4. Pavlov V.A.. Ion-Acoustic «Houston's Horse» Effect // Plasma Physics Reports, 2000, V.26, No.6, pp. 507–511.
5. Serov Yu.L. Interaction of shock waves with plasma: detonation of explosives on the basis of nitro-compounds (nitroglycerine, nitroglycol, trotyl) // Proc. 8th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics. Moscow, Russia, March 31-April 2, 2009, pp. 343–347.
6. Иванов М.Я. Об одном классе солитонных решений гидродинамических уравнений движения ионов в однородной плазме при отсутствии внешних полей.// АН СССР, Физика плазмы, 1982, т. 8, вып. 3, с. 607–612.
7. Ivanov M.Ja., Terentieva L.V. Exact solutions of two-fluid approach equations in aerospace plasmadynamics // AIAA Paper No. 2003–843, 8 p.
8. Иванов М.Я. Термодинамически согласованные законы сохранения в модели излучающего теплопроводного газа. // Журн. вычисл. матем. и матем. физики, том 51, № 11, 2011, с. 142–151.

3-13

**О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПЛОТНОГО ПОТОКА
БЕССТОЛКОВОЙ ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЫ
С ИСТОЧНИКОМ НАМАГНИЧЕННОСТИ
И ТРЕХМЕРНОЕ КИНЕТИЧЕСКОЕ
ПРИБЛИЖЕНИЕ**

В.М. Губченко

Институт прикладной физики РАН,
Нижний Новгород, Россия
E-mail: ua3thw@appl.sci-nnov.ru

Сверхзвуковой разлет/сжатие и поступательное движение плазмы в условиях ФВПЭ, космической плазмы и плазменной аэродинамики сопряжен с изучением работы и формирования в потоке пролетных частиц источника намагниченности с магнитодипольной и тороидальной компонентами, включая захваченные частицы. При этом, наряду с продольными полями, формирующими акустическую структуру полей вокруг источника, формируется слабо намагниченная «диффузная» структура (ДС), определяемая поперечными электромагнитными полями и связанная с процессами магнитного пересоединения. Это магнитосфероподобная трехмерная токнесущая структура с внутренней динамикой, изменяющая свою топологию в зависимости от изменения характеристики потока. ДС может существовать асимметрично с «хвостом-следом» или квазисимметрично, как компактная «диполизированная» э. м. структура. Как правило, анализ данной задачи проводится в терминах неидеальной МГД с введением феноменологических параметров.

Однако, в условиях высоких температур и высоких плазменных бета, когда скорость потока остается меньше «тепловой» электронной (это возможно также и в релятивистской плазме), и когда пролетные электроны остаются слабозамагниченными, возникает «горячий режим», и появление магнитных свойств у потока требует кинетического рассмотрения. ДС электромагнитных полей выражается через пару индуцированных потоком крупномасштабных параметров пространственной дисперсии, определяемых из кинетического рассмотрения, учитывающего форму функции распределения частиц (ФРЧ) потока. К этим параметрам относятся диамагнитный масштаб магнитной экранировки, а также аномальный скин-масштаб, которые связаны с возбуждением в данной точке с координатами диамагнитных и резистивных (обусловленных ускорением «резонансных» частиц) поперечных вихревых токов. Акустические свойства (сжимаемость) потока и топология продольного поля определяются значением числа Маха M . Электромагнитные свойства потока определяются линейным параметром добротности G . Добротность G управляет топологией э. м. полей: в зависимости от величины G поток по свойствам проявляет себя как омический проводник или как диамагнетик.

Добротность потока выражается через отношение плотности диамагнитных токов к резистивным, что соответствует отношению квадратов масштабов пространственной дисперсии а также через отношение параметров анизотропии по «энергии» и по «импуль-

су» (определяющими масштабы) ФРЧ относительно источника.

Исследуемая крупномасштабная линейная кинетическая ДС может быть ограничена магнитными полями, способными «замагнитить» горячие пролетные частицы. Для диамагнитной и резистивной структуры введены нелинейные безразмерные э. м. параметры потока, зависящие от магнитных полей источников намагниченности, определяющие границы существования линейной ДС и ее существование. Это «диамагнитное» кинетическое число, соответствующее обобщенному числу Альвена M_A , введенному в МГД, и «фрикционное» число Γ_B .

Структура электромагнитных полей и токовых систем определяется на основе разложения э. м. поля по цилиндрическим или сферическим гармоникам полученной характеристической функции задачи. Для потока с максвелловской ФРЧ рассмотрена энергетическая характеристика взаимодействия, соответствующая интегральному «омическому» сопротивлению потока (Ref. V.M. Gubchenko, AIAA 2011-3742).

**INTERACTION OF A DENSE FLOW
OF COLLISIONLESS HOT PLASMA
WITH A SOURCE OF MAGNETIZATION
AND THE 3D KINETIC APPROACH**

V.M. Gubchenko

Institute of Applied Physics, RAS, Nizhny Novgorod, Russia
E-mail: ua3thw@appl.sci-nnov.ru

Supersonic expansion/pressing and directly flowing of plasma under conditions of the HED physics, space physics, and aerodynamics is associated with the mechanisms by which a magnetization with magnetodipole and toroidal components, including trapped particles, is induced in a flow of flyby particles. Here, together with the longitudinal fields forming acoustic structures around the source of magnetization, we have a weakly-magnetized «diffusion» structure (DS) formed by transverse electromagnetic (e.m.) fields and related with magnetic reconnection process. The DS is a magnetosphere-like 3D current-carrying structure with internal dynamics, which changes its topology depending on the flow parameters. The DS structure can exist as asymmetric to the source and form the «magnetotail», or quasi-symmetric to it in the form of a dipolized e. m. structure. Usually, this problem is analyzed in terms of the nonideal MHD approach with the introduction of phenomenological parameters. However, under conditions of high temperatures and high plasma beta, when the flow velocity is less than the «thermal» velocity of electrons (which is also possible in a relativistic plasma) and when the flyby electrons are nonmagnetized, the «hot» kinetic regime can be considered. In this regime, the spatial structure of the e.m. field can be expressed via a couple of flow-induced large-scale parameters, which can be defined only by the shape of the flow particle distribution function (PDF) using the kinetic approach. They are diamagnetic magnetic screening scale and the anomalous skin scale which are related with the excitation at the point of the diamagnetic and resistive (related with «resonant» particles acceleration) transverse fields and eddy currents. Acoustic properties of

the flow (compressibility) and topology of the longitudinal field are defined by the Mach number M . E.m. properties of the flow are defined by the «quality» G , a linear parameter: the flow behaves as ohmic conductor or diamagnetic.

Flow quality is defined by the ratio of density of the diamagnetic current to resistive current which coincide with the ratio of the squared scales of the spatial dispersion and coincides with ratio of «momentum» to «energy» parameters of anisotropy (which define the couple of scales) of the PDF relative the source.

The large-scale kinetic high beta DS can be bordered by regions with large magnetic fields which magnetize hot flyby particles and decrease plasma beta. For diamagnetic and resistive DS, we introduce nonlinear dimensionless e. m. parameters of the flow what defines boundaries and existence of the linear DS. It is «diamagnetic number» corresponding to the Alvenic number M_A which was introduced in MHD, and a «friction number» Γ_B . The e.m. fields and current systems of the DS is determined through expansion over cylindrical and spherical dipole and toroid harmonics of the special characteristic function. The energy characteristics of interaction corresponding to the integrated ohmic resistivity are presented for flow with Maxwellian PDF (Ref. V.M. Gubchenko, AIAA 2011-3742)

3-14

КОЛЛАПС И ФРАГМЕНТАЦИЯ ПРОТОЗВЕЗДНЫХ ОБЛАКОВ

А.Е. Дудоров, С.Н. Замоздра

Челябинский государственный университет,
Челябинск, Россия

E-mail: dudorov@csu.ru

Коллапс и фрагментация являются основными элементами современной теории образования звезд и массивных планет. В обзоре обсуждаются результаты многомерных расчетов коллапса и фрагментации замагниченных вращающихся турбулентных протозвездных облаков. Перечисляются сложности в моделировании химических, тепловых, ионизационных и радиационных процессов в пылевой плазме этих объектов.

COLLAPSE AND FRAGMENTATION OF PROTOSTELLAR CLOUDS

A.E. Dudorov, S.N. Zamozdra

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: dudorov@csu.ru

Collapse and fragmentation are the basic elements of modern formation theory of stars and massive planets. The results of multi-dimensional simulations of the collapse and fragmentation of magnetized rotating turbulent protostellar clouds are discussed in the review. The difficulties in the modeling of chemical, thermal, ionization and radiative processes in the dusty plasma of these objects are itemized.

3-15

ТРАНСПОРТ И РАЗРУШЕНИЕ ПЫЛИ В ГОРЯЧЕМ ГАЗЕ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

О.Л. Поликарпова

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

В последние годы появляется все больше наблюдательных свидетельств существования пыли в скоплениях галактик. Массовая концентрация пыли, оцененная по наблюдениям экстинкции в оптике и эмиссии в инфракрасной области, оказывается существенно меньше, чем в нашей и соседних галактиках. Это связывается естественным образом с разрушением пылевых частиц либо при транспорте пыли из галактик, где они производятся звездами, в межгалактическую среду, либо вследствие их испарения при попадании в горячей (с температурой в интервале от 10^6 до 10^8 К) газ скопления. Оценки массовой концентрации основываются обычно на предположении о монодисперсной пыли (т. е. предполагается, что все пылинки имеют одинаковый размер). Вместе с тем, хорошо известно, что космическая пыль полидисперсна со степенным распределением пылинок по радиусам: в нашей Галактике это распределение описывается законом $dn/da \propto a^{-3.5}$. Хорошо известно также, что как при тепловом, так и нетепловом характере разрушения пылинок быстрее всего разрушаются пылинки малых размеров, которыми определяется вклад в экстинкцию. В настоящей работе обсуждаются основные механизмы переноса пылинок из галактик в межгалактическую среду и решается кинетическое уравнение для спектра пылинок по размерам при тепловом разрушении в горячем (в указанном выше интервале температур) окружении. Показано, что спектры эволюционируют таким образом, что нижняя граница распределения смещается в сторону больших размеров. При этом отношение массы пыли к ее суммарной поверхности для спектров, близких к галактическому, растет, так что определение массы пыли в скоплениях галактик, основанное на предположении о монодисперсности пыли, приводит к ошибке (заниженной оценке массы) в 2–3 раза в зависимости от точного значения температуры и давления горячего газа скопления.

3-16

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПЛАЗМЕННЫХ ПЕЧАХ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

А.Л. Моссе, В.В. Савчин

Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова,
НАН Беларуси, Минск, Беларусь

E-mail: mosse@itmo.by

Введение

При эксплуатации предприятий атомной энергетики и промышленности, ликвидации последствий радиационных аварий образуются большие объемы твердых

и жидких радиоактивных отходов низкого и среднего уровней активности. Основные промышленные методы переработки отходов (сжигание, прессование, выпаривание) не гарантируют надежной локализации токсичных веществ. Для получения высокостабильных форм при переработке отходов перспективным является применение термической плазмы. Под воздействием высокотемпературных плазменных потоков (3500–6000°C) обеспечивается большая глубина переработки исходных РАО и эффективное уменьшение их объема. Данная технология реализуется в плазменных печах, где в качестве источников тепловой энергии используются электродуговые плазмотроны.

Плазменная печь

В плазменной печи возможна переработка различных несортированных твердых отходов, при которой горючая часть отходов сжигается, а их твердые остатки плавятся совместно со стеклообразующей шихтой. Продукт переработки в виде расплава стекломассы удаляется из печи в отдельные контейнеры и после охлаждения-отверждения является наиболее инертной формой для захоронения, исключая проникновение радионуклидов и токсинов в окружающую среду.

Шахтный процесс переработки позволяет реализовать режим противотока в процессе нагревания и термической обработки отходов, охлаждение и фильтрацию отходящих газов непосредственно в самом слое загрузки, для чего в состав шихты можно поочередно добавлять и засыпать органический фильтрующий материал. Этот материал в значительной степени поглощает аэрозоли, после чего по ходу процесса подвергается термической переработке.

Одной из наиболее важных проблем, которые приходится решать при эксплуатации плазменных печей, является вывод печи на рабочие параметры за оптимальное время. Реальные условия теплообмена в печах не укладываются в классические схемы конвективного теплообмена, поэтому для расчетов целесообразно пользоваться опытными данными, полученными непосредственно для условий теплообмена в высокотемпературных плазменных устройствах. На основе полученных данных разработаны методики теплового расчета плазменных печей в режимах вывода на рабочие параметры (нагрева) и переработки отходов.

Выводы

Разработана плазменная печь для переработки твердых радиоактивных отходов и методики теплового расчета плазменных печей. Производительность печи от 50 до 100 кг/ч, энергозатраты процесса составляют 0,7–1,0 кВт·ч/кг в зависимости от состава отходов. Следует отметить, что объем отходящих из печи газов в сравнении с обычным сжиганием сокращается в 3–4 раза, что способствует их эффективной фильтрации.

HEAT PROCESSES IN PLASMA FURNACES FOR RADIOACTIVE WASTE PROCESSING

A.L. Mosse, V.V. Sauchyn

A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

E-mail: mosse@itmo.by, v.sauchyn@gmail.com

Introduction

Great amount of solid and liquid intermediate and low level radioactive waste is generated as a result of nuclear power industry operation, liquidation of nuclear disasters. The common industrial methods (combustion, compacting, evaporation) do not guarantee good localization of toxic components. We propose to use thermal plasma technology for such waste processing to obtain compound with high chemical stability. High temperatures of plasma flow (3500–6000°C) guarantee high rate of material treatment and effective volume reduction. The technology is realized in plasma furnaces that use arc plasma torches as source of heat energy.

Plasma furnace

Processing of solid unsorted of waste is realized in plasma furnace. The organic part of waste is combusted and inorganic part is melted and vitrified with glass-forming materials. The product of waste processing in liquid form is unloaded from the furnace. After cooling it is chemically stable compound with low rate of leaching. The compound encapsulates all radio nuclides.

Shaft process of waste processing allows to realize regime of counterflow. The exhausts go through layer of loaded waste and get cool and clean. For this reason some glass-forming and dispersed organic materials are added with waste. The material collects aerosols and dispersed toxic components.

One of the main problems to be solved is heating the furnace for operating temperature in optimal time. The real condition of heat transfer in plasma furnaces does not correspond to convective heat transfer. For this reason we have conducted series of experiments with plasma furnace. The obtained results are the base for methods of heat calculation of plasma furnaces in regimes of heating and waste processing.

Summary

Plasma furnace for solid radioactive waste processing was designed. The productivity of the furnace is 50–100 kg/h. Power inputs are 0.7–1.0 kW h/kg and depend of waste composition. Also it should be mentioned that volume of exhaust gas in plasma furnace is 3–4 times less than in fuel furnaces.

3-17

**НЕПРЕРЫВНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ
ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ
В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ,
ИЗМЕРЕНИЯХ И ТЕХНОЛОГИИ**

В.П. Зимаков, В.А. Кузнецов, Н.Г. Соловьев,
А.Н. Шемякин, М.Ю. Якимов

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

E-mail: yakimov@lantanlaser.ru

Непрерывный оптический разряд (НОР) – практически единственный на сегодняшний день лабораторный метод непрерывной безэлектродной генерации плазмы с температурой до 20–25 кК при атмосферном и повышенном давлении. Плазма НОР поддерживается за счет поглощения излучения непрерывного лазера достаточной мощности. НОР открывает новые возможности для лабораторного моделирования высокоэнтальпийных газовых потоков, пучков нейтральных атомов с высокой кинетической энергией, интенсивного коротковолнового ультрафиолетового излучения. НОР может использоваться как источник возбужденных атомов для химических технологий, для нагрева рабочего газа до высоких температур в плазматроне, лазерном ракетном двигателе и т. п. Чистая плазма НОР идеальна для спектрального анализа. НОР представляет собой удобный объект для проверки компьютерных моделей высокотемпературной газодинамики.

С тех пор, как НОР был впервые получен в ИПМех РАН с помощью CO₂-лазера ($\lambda = 10,6$ мкм), он широко исследовался при различной мощности лазерного излучения, в различных газах, при различных давлениях. Были экспериментально определены основные характеристики и свойства НОР, развиты методы диагностики, созданы теоретические модели для расчета.

С недавним быстрым развитием техники лазеров, в том числе полупроводниковых, а также твердотельных с диодной накачкой, появилась возможность поддержания НОР также в ближнем ИК-диапазоне длин волн $\lambda = 0,9\div 1,1$ мкм. В то время как на $\lambda = 10,6$ мкм поглощение лазерного излучения происходит за счет свободно-свободных процессов (обратное тормозное излучение), эффективное сечение которых пропорционально квадрату длины волны, поглощение в ближней ИК-области спектра носит сложный характер и обусловлено процессами с участием энергетических уровней атомов. Последним определяется сама возможность поддержания НОР излучением в области $\lambda = 1$ мкм при доступном уровне мощности лазерного излучения. Благодаря этому возникает возможность путем подбора длины волны генерации лазера изменять коэффициент поглощения и рефракции лазерного излучения в плазме НОР в зависимости от условий с целью, например, расширения области устойчивого поддержания НОР при увеличении давления. Поэтому диапазон $\lambda = 0,9\div 1,1$ мкм перспективен для поддержания НОР при высоком давлении газа и высокой плотности заряженных частиц, т. е. для получения и исследования стационарной плазмы в условиях ее неидеальности.

В докладе представлены также полученные впервые оригинальные результаты исследования НОР, поддерживаемого волоконным иттербиевым лазером на длине волны 1,07 мкм.

**CONTINUOUS LASER PLASMA GENERATION
FOR SCIENTIFIC, METROLOGICAL
AND INDUSTRIAL APPLICATIONS**

V.P. Zimakov, V.A. Kuznetsov, N.G. Solovyov,
A.N. Shemyakin, M.Yu. Yakimov

A. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: yakimov@lantanlaser.ru

Continuous optical discharge (COD) – now is in practice the only laboratory method of electrodeless generation of a plasma with temperature up to 20–25 kK under atmospheric or elevated pressure. COD plasma is sustained due to absorption of CW radiation of high power laser.

Among COD applications are new possibilities for the laboratory simulation of high enthalpy gas flows, high kinetic energy neutral atomic beams, high intensity deep ultraviolet radiation. COD may be applied as a source of highly excited atoms for chemical synthesis, for high temperature heating of the active agent in the plasmatron, rocket engine and so on. Clean and highly emissive COD plasma is ideal for spectral analysis. COD appears to be the most convenient object for development and testing numerical codes in high temperature gas dynamics.

Since that time when COD was first obtained in IPMech RAS with relatively low power CO₂ laser ($\lambda = 10.6$ μm) technical possibilities of sustaining COD under more and more extended conditions – different laser power and gas pressure, various gases – were gradually realized as high power CW lasers became more developed and improved. Main properties and characteristics of COD were obtained in experiments, COD plasma diagnostics and theoretical models of COD were developed.

Recent sharp development of laser technology, especially diode lasers and diode pumped solid-state (DPSS) lasers opened the opportunity to sustain COD also at different laser wavelength in the near-IR region $\lambda = 0.9\div 1.1$ μm . Whereas laser beam absorption at $\lambda = 10.6$ μm in COD plasma proceeds mainly through free-free transitions (inverse bremsstrahlung) which cross section is about proportional to the wavelength squared, laser beam absorption mechanisms in the near-IR region are more complex and also depend on the transitions from atomic energy levels. The last observation determines the possibility of sustaining COD at relatively low laser power with laser emitting near 1 μm itself. Due to that fact there is the possibility to control laser radiation absorption and refraction in plasma through selection of laser wavelength. The absorption and refraction controls are essential to provide the conditions of COD plasma stability at higher gas pressure. Thus laser wavelength spectral band $\lambda = 0.9\div 1.1$ μm is most promising for sustaining COD at elevated gas pressure and charged particles density, i.e. in conditions when stationary plasma may exhibit some effects of non-ideality.

New original breaking results of studying COD sustained by ytterbium fiber laser at $\lambda = 1.07$ μm are also presented.

3-18

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ МЕТАЛЛОВ ПРИ СУБПИКОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСАХ

С.В. Стариков

Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

E-mail: starikov@ihed.ras.ru

В настоящей работе проведено атомистическое моделирование абляции золота и алюминия при облучении металла фемто- и пикосекундными лазерными импульсами. Разработана атомистическая модель с явным учетом электронной подсистемы и зависимостью межйонного потенциала от электронной температуры. Использование такого потенциала позволяет учесть изменение физических свойств ионной подсистемы при нагреве электронной подсистемы. В частности, учитывается возникновение электронного давления при нагреве электронов. В используемой модели ионная подсистема описывается классической молекулярной динамикой, в то время как электронная подсистема рассматривается в приближении сплошной среды. Реализованный подход позволяет проводить классические расчеты, корректно учитывающие электронные свойства вещества и их изменение при эволюции системы.

Для золота обнаружено существенное различие между характеристиками абляции при разных длительностях лазерных импульсов. Для абляции при субпикосекундном импульсе удается выделить два различных механизма разрушения металла, связанных с эволюцией давления в системе. При энерговыкладах вблизи порогового значения, механизм абляции связан с релаксацией электронного давления. Поэтому абляция происходит сравнительно быстро (10 пс) в поверхностном слое глубиной около 10 нм. При более высоких энерговыкладах, как и при пикосекундных импульсах, механизм абляции связан с формированием и распространением волн сжатия и разгрузки. При этом механизме пространственные и временные масштабы абляции больше на порядок, чем при механизме, связанном с релаксацией электронного давления. Для алюминия выделить два различных механизма затруднительно, однако роль электронного давления также велика. Пороговые значения энерговыкладов при абляции в обоих металлах сравнимы и равны приблизительно 50 мДж/м².

SIMULATION OF SUBPICOSECOND PULSE LASER ABLATION IN METALS

S.V. Starikov

Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: starikov@ihed.ras.ru

In this work, the atomistic simulation of laser ablation in gold and aluminum at irradiation by femto- and picosecond laser pulses was performed. To describe the ablation process near the threshold absorbed fluence, the two-temperature atomistic model with an electron-temperature-dependent

(ETD) interionic potential was proposed. The use of this potential makes it possible to take into account the effect of the electron pressure on the behavior of ions and to interpret the experimental data measured for ultra-short soft X-ray and visible lasers modifications of metal surfaces. The two-temperature model describes lattice subsystem by means of classical molecular dynamics while the electron subsystem is considered in the continuum approach. Implemented approach allows to perform calculations which correctly take into account electronic properties of matter and their change during evolution of the system.

For gold, the different mechanisms of ablation are found from the results of the simulation. At femtosecond laser pulse the two various ablation regimes can be distinguished. At low fluence the ablation is associated with faster electron-driven tens nm deep ablation. This ablation mechanism was realized by evolution of the electronic pressure. At higher fluencies, the electron-driven ablation is present as well. However, in this case it cannot be distinguished from much deeper ablation due to the rarefaction wave formation which starts to realize. For aluminum and gold at picosecond laser pulse, the segregation of these mechanisms is difficult task. However, the role of the electron pressure is very high in metals at ablation in all situations. The threshold absorbed fluencies of ablation in both metals approximately equal 500 J/m².

3-19

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ПРЕДЫМПУЛЬСА С ПОМОЩЬЮ ТОНКОЙ ФОЛЬГИ, УСТАНОВЛЕННОЙ ПЕРЕД МИШЕНЬЮ

М.Е. Поварницын¹, Н.Е. Андреев^{1, 2},П.Р. Левашов^{1, 2}, К.В. Хищенко^{1, 2}, О.Н. Розмей³¹Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия²Московский физико-технический институт,
Долгопрудный, Россия³Центр по тяжелоионным исследованиям имени Гельмгольца,
Дармштадт, Германия

E-mail: pasha@ihed.ras.ru

В экспериментах с высокоинтенсивными высокоэнергетичными лазерными импульсами контраст является чрезвычайно важным параметром. Для высоких интенсивностей основного импульса $>10^{19}$ Вт/см² высокой контрастности может оказаться недостаточно для того, чтобы избежать образования плазмы на поверхности мишени, что приводит к нежелательному изменению свойств мишени из-за относительно длинного наносекундного предимпульса. В частности, динамика тонких фольг при воздействии предимпульса чрезвычайно важна для задач лазерного ускорения ионов с использованием специальных типов мишеней. Помещение перед мишенью тонкой фольги может защитить мишень от воздействия предимпульса. Для исследования этой ситуации в данной работе используется широкаядиапазонная двухтемпературная гидродинамическая модель, корректно описывающая динамику процесса

от нормальной плотности при комнатной температуре до высокотемпературной плазмы. Моделирование демонстрирует, что варьирование толщины фольги может уменьшить интенсивность предимпульса на несколько порядков и в то же время обеспечить прозрачность образующейся в результате нагрева плазмы к моменту прихода высокоинтенсивного ультракороткого лазерного импульса. Однако переизлучение от фольги может быть существенным и приводить к нежелательному раннему нагреву мишени, установленной за фольгой.

SIMULATION OF LASER PREPULSE REDUCTION BY A THIN SHIELDING FOIL PLACED IN FRONT OF THE TARGET

M.E. Povarnitsyn¹, N.E. Andreev^{1, 2}, P.R. Levashov^{1, 2},
K.V. Khischenko^{1, 2}, O.N. Rosmej³

¹Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology,
Dolgoprudny, Russia

³GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung,
Darmstadt, Germany

E-mail: pasha@ihed.ras.ru

Laser contrast is a crucial parameter in experiments with high-intensity high-energy pulses. For high intensities of the main pulse $>10^{19}$ W/cm², even high-contrast beams can produce plasma on the target surface and result in undesirable early smearing of the target due to long nanosecond prepulse action. In particular, dynamics of thin foils under the prepulse action is especially important for the laser ion acceleration technique and the promising target design. At the same time, a thin foil can be placed ahead of the target to shield it from the long laser prepulse. To analyze the multi-stage foil dynamics we use a wide-range two-temperature hydrodynamic model, which correctly describes the foil expansion starting from the normal solid density at room temperature. Simulations show that varying the foil thickness one can diminish the prepulse transmission through the foil material in several orders of magnitude and at the same time provide the total transparency of the foil plasma by the moment of the main high-intensity ultra-short laser pulse arrival. However the prepulse energy re-emission by the shielding foil can be sizable and result in undesirable early heating of the target placed behind the foil.

пространение в исследованиях различных физических аспектов взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом. Важными для этого особенностями метода является экономичность представления функций распределения набором крупных частиц, что позволяет моделировать динамику процесса в трехмерной по пространству постановке, а также высокая алгоритмическая устойчивость метода в сильно нелинейных нестационарных режимах, при наличии зон больших градиентов плотностей зарядов и токов, электромагнитных полей. Однако, в таких режимах бывает сложно всюду обеспечить выполнения стандартных для метода ограничений на численные параметры, такие как большое число крупных частиц в сфере экранирования. В этих случаях для подтверждения сходимости численного решения к физически адекватному требуется проведение контрольных численных экспериментов с повышением точности за счет измельчения шагов сетки и увеличения числа крупных частиц в расчете.

Разрабатываемый в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН универсальный высокоэффективный программный код CFhall позволяет преодолевать возникающие при этом вычислительные трудности. Реализованные численные схемы предусматривают второй порядок аппроксимации как электромагнитных полей (метод FDTD), так и плотностей зарядов и токов (метод PIC с треугольным формфактором). При разработке используется новый класс локально-рекурсивных нелокально-асинхронных алгоритмов [2], позволяющий производить расчеты с производительностью, близкой к пиковой на современных параллельных вычислительных системах с развитой иерархией подсистемы памяти без ограничения размера обрабатываемых данных.

В представленном докладе применение кода продемонстрировано результатами полномасштабного 3D3V численного моделирования взаимодействия пикосекундного лазерного импульса интенсивностью 10^{19} – 10^{20} Вт/см² с подкритическим плазменным слоем (плотностью 0,02–0,1) и толщиной до 500 мкм.

Литература

1. Сигов Ю.С. Вычислительный эксперимент: мост между прошлым и будущим физики плазмы. Избранные труды / Сост. Г.И. Змиевская, В.Д. Левченко. – М. Физматлит, 2001. – 288 с.
2. Левченко В.Д. Ассинхронные параллельные алгоритмы как способ достижения эффективности вычислений. Информационные технологии и вычислительные системы. 2005, № 1 с. 68.

3-20

3D3V МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПИКОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ С ПОДКРИТИЧЕСКИМ ПЛАЗМЕННЫМ СЛОЕМ

В.Д. Левченко, А.Ю. Перепёлкина

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

Дискретное моделирование плазмы на основе метода крупных частиц-в-ячейках (PIC), теория и практика применения которого развивались начиная с 1970-х годов [1], к настоящему времени получило широкое рас-

3D3V SIMULATION OF THE INTERACTION OF PICOSECOND LASER IMPULSES WITH SUBCRITICAL PLASMA LAYER

V.D. Levchenko and A.Yu. Perepyolkina

Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russia

The theory and realizations of the Particle-in-Cell (PIC) method has been evolving since 1970 [1]. Nowadays the discrete plasma simulation with the Particle-in-Cell (PIC method) has been widely spread in the investigation of various physical phenomena of laser impulse interaction with matter. In the terms of this kind investigation the most important features of the PIC method are economical

representation of plasma distribution function by a set of macroparticles, which allows the simulation of process dynamics in spatially 3D model, and algorithmic stability of the method for simulation of highly non-linear non-stationary regimes with the presence of areas with large gradients of electromagnetic fields, current and plasma densities.

In such regimes, however, it may be uneasy to satisfy the standard for this method limitations of numerical parameters, such as large number of macroparticles in the Debye sphere.

In these cases to confirm the convergence of the numerical solution to the physically adequate one it is essential to verify the solution by numerical experiments with higher accuracy by decreasing the mesh step size and increasing macroparticle particle number in cells.

The high efficiency multi-purpose CFhall code that is being developed in the Keldysh Institute of Applied Mathematics allows to overcome the arising computational difficulties in such experiments. The implemented numerical schemes imply second order of approximation for the electromagnetic fields (FDTD method) as well as for plasma and current densities (PIC method with triangular form-factor). Thanks to the new type of Locally Recursive non-Locally Asynchronous (LRnLA) algorithms [2] that are utilized in the development it is possible to perform the calculations with efficiency close to maximal on the modern parallel computers with the advanced memory subsystem hierarchy without limitations on the data being processed.

In the presented work the application of the code is demonstrated by the results of full scale 3D3V numerical simulation of the interaction of picosecond laser impulses of intensity equal to 10^{19} – 10^{20} W/cm² with subcritical plasma layer (density about 0.02–0.1) and 500 μ m thickness.

References

1. Yu.S. Sigov. Computer simulation: the link between past and future of plasma physics / composed by V.D. Levchenko and G.I. Zmievskaia. – Moscow. IACP «Nauka», 2001. – p. 288.
2. V.D. Levchenko. J. of Inf. Tech. and Comp. Systems (in russian), N. 1: p. 68, 2005.

3-21

30-ТВт ПИКОСЕКУНДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ УСТАНОВКА СОКОЛ-П

Д.С. Гаврилов, Д.А. Дмитриев, А.Г. Какшин,
И.А. Капустин, Е.А. Лобода

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия
E-mail: dep5@vniitf.ru

В докладе представлена лазерная установка СОКОЛ-П на фосфатном неодимовом стекле мощностью 30 ТВт после завершения модернизации в 2010–2011 годах.

Смонтирован один из основных элементов лазерной системы – вакуумированный компрессор. В объединенном корпусе вакуумированный компрессор – мишенная камера достигает остаточное давление $\sim 10^{-5}$ мбар. Отработаны методы юстировки дифракционных ре-

шеток оптического компрессора и контроля волнового фронта лазерного пучка, исследован контраст лазерного импульса.

Получены следующие параметры излучения: энергия на выходе компрессора 20 Дж, длительность рекомпрессированного импульса 0,7 пс, минимальный диаметр фокального пятна на мишени ~ 3 мкм. В экспериментах на установке СОКОЛ-П интенсивность излучения на мишени составила до $5 \cdot 10^{19}$ Вт/см².

30-TW PICOSECOND LASER FACILITY SOKOL-P

D.S. Gavrilov, D.A. Dmitrov, A.G. Kakshin,
I.A. Kapustin, E.A. Loboda

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

We report on the phosphate Nd:glass 30 TW SOKOL-P laser facility after modernization in 2010–2011.

One of the main elements of the laser system, vacuumed compressor, was built up. Residual pressure of 10^{-5} mbar was obtained in combined system «vacuumed compressor-target chamber». Methods of wave front control and diffraction grating adjustment have been developed, and the laser pulse contrast was investigated as well.

The following parameters of laser radiation have been achieved: the compressor output energy – 20 J, recompressed pulse duration 0,7 ps, focal spot diameter (FWHM) ~ 3 μ , experimental on-target intensity – $5 \cdot 10^{19}$ W/cm².

3-22

ИССЛЕДОВАНИЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СПЕКТРОВ ОБРАТНО РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА 30-ТВт ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ СОКОЛ-П

Д.С. Гаврилов, А.Г. Какшин, Е.А. Лобода

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия
E-mail: dep5@vniitf.ru

В данной работе исследованы спектры обратно рассеянного лазерного излучения (в области ω_0 , $\lambda_0 = 1055$ нм), полученные в сериях экспериментов на установках СОКОЛ-П и VULKAN Petawatt при облучении плоских мишеней из различных материалов и Z с толщинами 0,1–1000 мкм, установленных под углами от 0 до 33° по отношению к падающему пучку. Интенсивность лазерного излучения на мишени: $I = 5 \cdot 10^{17 \pm 3} \cdot 10^{19}$ Вт/см² (СОКОЛ-П), поляризация – S, P, циркулярная.

В результате анализа данных сделано предположение, что общий вид спектров и модуляции вызваны, главным образом, спектральной интерференцией, возникающей вследствие действия двойного эффекта Доплера при отражении излучения от быстро движущейся границы критической плотности в плазме. На основе данного эффекта представлена простая модель, с по-

мощью которой можно описать подавляющее большинство экспериментальных спектров и подобрать соответствующие функции изменения скорости движения границы критической плотности за время действия ультракороткого лазерного импульса. В докладе представлен ряд экспериментальных спектров и соответствующие им расчеты.

В результате сделаны следующие выводы:

- проводить оценку максимальной скорости движения границы критической плотности по красной границе спектра обратно рассеянного излучения некорректно; пиковое значение скорости может быть как меньше, так и существенно больше;
- уширение спектра в голубую область совсем не обязательно связано с наличием движения границы навстречу лазерному импульсу; слабоинтенсивное (~1%) голубое плечо спектра может простираться вплоть до $\lambda_{\text{MIN}} \sim 750$ нм и характеризует как пиковое значение скорости, так и величину ускорения;
- при облучении тонких фольговых мишеней высококонтрастным циркулярно поляризованным излучением функция изменения скорости, отвечающая наилучшему совпадению с экспериментальными данными, имеет существенно иную форму (по сравнению с линейно поляризованным излучением).

Данная модель носит описательный характер и не позволяет по экспериментальным спектрам восстановить реальную функцию скорости. Однако, при аппроксимации формы лазерного импульса и скорости с помощью функции Гаусса, и варьируя различные параметры (длительность фронтов, задержки, начальной скорости, коэффициента отражения), можно получить удовлетворительное соответствие. При этом поведение функции скорости при различных условиях может иметь физическое объяснение.

INVESTIGATION AND INTERPRETATION OF BACKSCATTERED RADIATION SPECTRA IN THE EXPERIMENTS ON 30-TW SOKOL-P LASER FACILITY

D.S. Gavrilov, A.G. Kakshin, E.A. Loboda

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

E-mail: dep5@vniitf.ru

This paper investigates the backscattered laser radiation spectra (in the region of ω_0 , $\lambda_0 = 1055$ nm) registered in the series of experiments on the SOKOL-P and VULKAN Petawatt facilities under irradiation of the 0.1–1000- μm flat targets made of various materials having different Z and arranged at the angle of 0...33° to the incident beam. The intensity of the on-target laser radiation for SOKOL-P facility was $I = 5 \cdot 10^{17} \dots 3 \cdot 10^{19}$ W/cm²; polarization was S , P , and circular.

Data analysis resulted into the assumption that general view of spectra and modulations themselves are mainly due to spectral interference induced by the double Doppler effect when radiation is reflected from the fast-moving critical density boundary in plasma. Based on this effect, the simple model was proposed, which can be used to describe the overwhelming majority of experimental spectra and

to select appropriate functions for changes in velocity of critical density boundary within the ultra-short laser pulse time. This paper gives series of experimental spectra and appropriate calculations.

As a result, it was concluded that:

- it is incorrect to estimate maximum velocity of critical density boundary using the long-wavelength cut-off in the backscattered radiation spectrum; the value of peak velocity can be both lower and essentially higher;
- spectrum broadening into the short-wavelength region is not necessarily due to the boundary movement towards a laser pulse; the low-intensity (~1%) short-wavelength arm of spectrum can reach $\lambda_{\text{MIN}} \sim 750$ nm and characterizes both peak velocity and acceleration;
- when thin foil targets are irradiated by high-contrast circularly polarized radiation, the velocity change function that fits best to experimental data has significantly different shape (compared to the linearly polarized radiation).

This model has descriptive character and fails to reconstruct the actual velocity function using experimental spectra. However, satisfactory fit is possible through approximation of both laser pulse shape and velocity using the Gaussian function, as well as through varying different parameters, namely edge length, delay time, initial velocity, and reflectivity factor. At that, behavior of the velocity function under different conditions can have physical explanation.

3-23

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСКОРЕНИЯ ПРОТОНОВ ИЗ ТОНКИХ ФОЛЬГ, ОБЛУЧАЕМЫХ ПИКОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ С КРУГОВОЙ И ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

К.В. Сафронов, Д.А. Вихляев, Д.С. Гаврилов,
С.А. Горохов, А.Г. Какшин, А.В. Липин, Е.А. Лобода,
В.А. Лыков, Е.С. Мокичева, С.Н. Пахомов,
А.В. Потапов, П.А. Толстоухов, Д.В. Торшин

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

В докладе представлены результаты экспериментов по облучению алюминиевых фольг толщиной ~1 мкм циркулярно и линейно поляризованными лазерными импульсами 30 ТВт установки СОКОЛ-П при интенсивности излучения на мишени ~10¹⁹ Вт/см². В опытах измерялся спектр отраженного от мишени лазерного излучения и спектрально-пространственные параметры протонных пучков посредством протонного фотодетектора [1].

Обнаружена зависимость величины смещения красной границы спектра отраженного излучения от типа поляризации излучения. Уширение спектра обусловлено эффектом Доплера при отражении лазерного импульса от движущейся под действием силы радиационного давления поверхности критической плотности. При круговой поляризации скорость движения поверхности критической плотности в 1,5–2 раза выше, чем

в случае линейной поляризации и достигает ~4% скорости света [2].

Измерения спектрально-пространственного распределения протонов показали, что при круговой поляризации лазерного излучения углы раствора пучков частиц увеличиваются, пучки становятся существенно менее однородными. Коэффициент конверсии лазерного излучения в быстрые протоны и их максимальная энергия практически не зависят от типа поляризации. Это свидетельствует о том, что, несмотря на увеличение работы сил радиационного давления при круговой поляризации, большинство частиц, как и в экспериментах с линейной поляризацией, ускоряются посредством механизма TNSA.

Литература

1. Сафронов К.В., Гаврилов Д.С., Мокичева Е.С., Потапов А.В., Чефонов О.В. Времяпролетный сцинтилляционный спектрометр заряженных частиц с субнаносекундным временным разрешением, ПТЭ 6, 84–87 (2008).
2. Лобода Е.А., Гаврилов Д.С., Какшин А.Г. ЗНЧ-2012.

EXPERIMENTAL STUDIES OF PROTON ACCELERATION FROM THIN FOILS IRRADIATED BY PICOSECOND LASER PULSES WITH CIRCULAR AND LINEAR POLARIZATION

K.V. Safronov, D.A. Vikhlyaev, D.S. Gavrilov,
S.A. Gorokhov, A.G. Kakshin, A.V. Lipin, E.A. Loboda,
V.A. Lykov, E.S. Mokicheva, S.N. Pakhomov,
A.V. Potapov, P.A. Tolstoukhov, D.V. Torshin

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

The paper presents experimental results on irradiation of the ~1 μm thick aluminum foils by the circularly and linearly polarized laser pulses from the 30-terawatt SOKOL-P facility having the $\sim 10^{19}$ W/cm² irradiation intensity on the target. In experiments, the spectrum of laser radiation reflected from the target as well as spectral-spatial parameters of proton beams were measured by a proton photochronograph. [1].

The shift of long-wavelength cut-offs in the reflected radiation spectrum was determined to depend on the type of radiation polarization. Spectrum broadening is caused by the Doppler effect when a laser pulse is reflected from the critical density surface moving due to radiation pressure. In the case of circular polarization, the velocity of the critical density surface is 1.5–2 times higher than in the case of linear polarization and reaches ~4% of light velocity [2].

Measurements of spectral and spatial distribution of protons demonstrated that the aperture angles of particle beams increase when laser irradiation is circularly polarized and the beams become substantially less homogeneous. Coefficient of laser radiation-to-fast protons conversion, as well as maximum energy of protons is practically independent of the polarization type. This shows that despite the increased work of radiation pressure at circular polarization, most of particles are accelerated by the TNSA mechanism similarly to the experiments with linear polarization.

References

1. Safronov K.V., Gavrilov D.S., Mokicheva E.S., Potapov A.V., Chefonov O.V., Time-of-flight scintillation spectrometer of charged particles with subnanosecond time resolution, PTE 6, 84–87 (2008).
2. Loboda E.A., Gavrilov D.S., Kakshin A.G. Zababakhin Scientific Talks 2012.

3-24

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ГЕНЕРАЦИИ МОЩНОГО СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВАКУУМНЫМИ ФОТОЭЛЕМЕНТАМИ

Е.В. Заволоков, Д.О. Замураев, А.А. Зубков,
А.А. Кондратьев, В.Ю. Кузьминых, Н.В. Купырин,
А.В. Потапов, Ю.О. Романов, И.А. Сорокин,
А.С. Тищенко, Н.Н. Хавронин, А.Л. Шамраев

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: dep5@vniitf.ru

Введение

Узконаправленное сверхширокополосное электромагнитное излучение (СШП ЭМИ) высокой мощности в сантиметровом диапазоне длин волн может быть получено при наклонном облучении проводящей поверхности потоком излучения, способным вызвать эмиссию электронов. Фотоэлектроны, ускоренные полем приложенного напряжения между катодом и анодом, проходят через сетчатый анод и формируют излучающий дипольный слой [1]. Распространение фронта тока эмитированных электронов вдоль катода со сверхсветовой фазовой скоростью обеспечивает когерентность излучения под углом, зеркальным к углу падения иницирующего излучения.

Экспериментальные результаты

Генерация СШП ЭМИ, как и в экспериментах [2], производилась вакуумными фотоэлементами с сурьмяно-цезиевым катодом диаметром 50 мм и анод-катодным зазором 3 мм. Эмиссия электронов инициировалась лазерным излучением с длиной волны 527 нм длительностью одна пикосекунда через анодную сетку под углом 45°.

Были проведены эксперименты с целью определения максимально возможной частоты следования импульсов ЭМИ при напряжении питания до 60 кВ. Последовательность из четырех лазерных импульсов с регулируемым интервалом между ними от 3 до 7 нс была получена при использовании светоделиителя и системы зеркал. Экспериментально осуществлена генерация последовательности импульсов ЭМИ с периодом следования 3,65; 4,75 и 6,7 нс. Измерения тока в цепи зарядки фотоэлемента показали, что интервал между импульсами может быть уменьшен до ~2 нс, что соответствует частоте следования ~500 МГц.

При увеличении площади излучаемой поверхности повышается мощность и уменьшается расходимость ЭМИ. Увеличение площади излучателя может быть осуществлено за счет увеличения числа используемых фотоэлементов. Проведены эксперименты со сборкой из трех фотоэлементов с целью демонстрации возможности когерентного сложения излучения. Показано, что амплитуда поля ЭМИ увеличивается пропорционально числу фотоэлементов. При напряжении импульсного питания 90 кВ получена амплитуда магнитной составляющей поля ЭМИ ~ 1 кА/м на расстоянии 1,4 м от излучателя, что соответствует показателю качества излучателя $E \times R \approx 530$ кВ. Пиковая мощность излучения при этом составила ~ 100 МВт.

Литература

1. Лазарев Ю.Н., Петров П.В. // ЖЭТФ, 1999. Т. 115. № 5. С. 1689–1707.
2. Кондратьев А.А., Лазарев Ю.Н., Потапов А.В., Тищенко А.С., Заволоков Е.В., Сорокин И.А. // Доклады Академии Наук, 2011. Т. 438. № 5. С. 615–618.

RESULTS OF EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS INTO GENERATION OF THE HIGH-POWER ULTRA-WIDEBAND ELECTROMAGNETIC RADIATION BY VACUUM FOTOCESLS

E.V. Zavolokov, D.O. Zamuraev, A.A. Zubkov,
A.A. Kondratiev, V.Y. Kuzminykh, N.V. Kupyrin,
A.V. Potapov, Y.O. Romanov, I.A. Sorokin,
A.S. Tischenko, N.N. Khavronin, A.L. Shamraev

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

Introduction

The high-power low-divergence ultra-bandwidth electromagnetic radiation within the centimeter wavelength range can arise when a conducting surface is subjected to tilted illumination by the radiation flux capable to induce the electron emission. Photoelectrons accelerated by the field of applied voltage between the cathode and the anode pass through the meshed anode and form the emitting dipole layer [1]. Propagation of the emitted electrons current along the cathode at the superlight phase velocity ensures radiation coherence at an angle mirror reflected relative to the incidence angle of the initiating radiation.

Experimental results

The high-power ultra-bandwidth electromagnetic radiation was generated just as in experiments [2] by vacuum photocells with the antimonite-caesium cathode having the 50-mm diameter and the 3-mm anode-cathode gap. Electron emission was initiated by laser radiation with the 527-nm wavelength and the 1-ps duration through the anode grid at the angle of 45° .

The experiments were conducted to determine the maximal possible repetition frequency of the electromagnetic radiation pulses at the up to 60 кV supply voltage. The sequence of four laser pulses with the controlled interval from 3 to 7-ns between them was obtained using the beam splitter and the mirror system. The sequence of electromagnetic radiation pulses with the pulse repetition period of 3.65, 4.75, and 6.7 ns was experimentally generated. The current mea-

surements in the photocell charging circuit showed that the interval between pulses can be decreased down to ~ 2 ns and this fits the repetition rate of ~ 500 MHz.

Power of electromagnetic radiation is noted to grow and its divergence is noted to reduce with the growth of the radiating surface area. The radiator area can be increased due to the increased number of photocells. Experiments with the assembly of three elements are performed to demonstrate the coherent addition of radiation to be feasible. It was shown that the amplitude of the electromagnetic radiation field increases proportional to photocells number. At the 90 кV pulse power voltage, the amplitude of the magnetic component in the electromagnetic radiation field is measured to be ~ 1 кА/м at the distance of 1.4 m from the radiator and this corresponds to the radiator's quality characteristic of $E \times R \approx 530$ кV. The peak radiation power was ~ 100 MW.

References

1. Lazarev Y.N., Petrov P.V. // Journal of experimental and technical physics, 1999. v. 115. № 5. p. 1689–1707.
2. Kondratiev A.A., Lazarev Y.N., Potapov A.V., Tischenko A.S., Zavolokov E.V., Sorokin I.A. // Proceedings of Academy of Sciences, 2011. v. 438. № 5. p. 615–618.

3-25

ЛИУ-2 – РЕАЛИЗАЦИЯ НОВОГО ПОДХОДА В СОЗДАНИИ ЛИНЕЙНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

А.В. Акимов¹, П.А. Бак¹, М.А. Батазова¹,
А.М. Батраков¹, О.В. Беликов¹, Ю.М. Боймельштейн¹,
Д.Ю. Болховитянов¹, А.А. Елисеев¹, Ф.А. Еманов¹,
Г.А. Фатькин¹, А.А. Корепанов¹, А.Н. Косарев¹,
Я.В. Куленко¹, Г.И. Кузнецов¹, П.В. Логачев¹,
И.В. Николаев¹, А.В. Оттмар¹, А.А. Пачков¹,
А.Н. Панов¹, О.А. Павлов¹, Д.Н. Пурескин¹,
Е.С. Рувинский¹, Д.А. Старостенко¹, С.О. Суворов¹,
Ю.Ф. Токарев¹, А.П. Торшин¹, С.В. Тур¹,
О.А. Никитин², М.Ю. Столбиков², А.Р. Ахметов²,
П.С. Базаров², Д.А. Железкин², С.Д. Хренков²,
А.А. Каргин², К.С. Шубин², Д.В. Сысков²

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, Россия

²Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забахина,
Снежинск, Россия

Представлен подход в создании линейных индукционных ускорителей с длинным импульсом тока (до 500 нс) и предельным качеством электронного пучка в диапазоне токов до 2 кА. Все основные физические и технические решения в данной разработке подчинены одной цели – получению минимального фазового объема пучка на выходе ускорителя. Представлены результаты испытаний ЛИУ-2 в различных режимах работы.

LIA-2 AS A RESULT OF NEW APPROACH IN LINEAR INDUCTION ACCELERATORS DESIGN

P.V. Logachev et al.

Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS,
Novosibirsk, Russia

New approach in linear induction accelerators design focused on ultra-high quality of long pulse (up to 500 ns) few kA electron beam production is presented. All physical and technical solutions used for LIA-2 machine have one goal – minimum phase space occupied by the beam at the accelerator exit. Main results of LIA-2 commissioning are presented.

3-26

ЭМИР-2 – ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Б.Н. Лаврентьев, Р.Н. Мунасыпов,
В.В. Перешитов, Р.В. Протас, Р.Р. Хафизов

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: dep5@vniitf.ru

В работе представлена установка ЭМИР-2 [1], являющаяся источником электронных пучков и тормозного излучения (ТИ) и предназначенная для проведения радиационно-физических исследований. Установка ЭМИР-2 конструктивно выполнена из двух импульсных ускорителей электронов, собранных на базе индуктивно-емкостного накопителя энергии (ИЕНЭ) с коммутацией электрически взрывающимися проводниками (ЭВП) [2]. Основными элементами каждого ускорителя являются: многомодульный генератор импульсных напряжений, собранный по схеме Аркадьева-Маркса; система формирования импульса, состоящая из индуктивного накопителя энергии, ЭВП и неуправляемого обостряющего разрядника; ускорительная трубка (УТ), состоящая из изолятора, вакуумной передающей линии с магнитной самоизоляцией и вакуумного диода.

Электронные пучки, генерируемые на ускорителе ЭМИР-2, обладают следующими параметрами: длительность импульса 100...2000 нс; напряжение на УТ до 5,5 МВ; ток выведенного пучка до 30 кА; плотность энергии по сечению пучка до 300 Дж/см²; средняя энергия электронов – 2,5 МэВ. На ускорителе ЭМИР-2 реализуются три основных режима генерации импульсов ТИ: моноимпульс – представляет собой суперпозицию двух наносекундных (<100 нс) импульсов, генерируемых двумя синхронно работающими ускорителями [2, 3]; импульс сложной формы – представляет собой суперпозицию наносекундного и микросекундного (≥ 1 мкс) импульсов, генерируемых двумя синхронно работающими ускорителями [2]; два последовательных импульса – представляют собой суперпозицию наносекундных импульсов ТИ, генерируемых двумя ускорителями, срабатывающими с заданной временной задержкой (2...1000 мкс) [4]. Импульсы ТИ обладают следующими характеристиками (в зависимости от ре-

жима): напряжение на каждой УТ – 1,5...5,5 МВ, ток через каждую УТ – 30...70 кА; длительность импульса на полувысоте – 2000...40 нс; мощность дозы на аноде каждой УТ – 10^{10} ... $5 \cdot 10^{12}$ Р/с.

Литература

1. Протас Р.В., Лаврентьев Б.Н., Мунасыпов Р.Н. и др. Реализация на ускорителе ЭМИР-2 новых режимов генерации импульсов тормозного излучения // ВАНТ серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2011. Вып. 1. С. 46–51.
2. Диянков В.С., Ковалев В.П., Кормилицын А.И., Лаврентьев Б.Н. Мощные импульсные генераторы тормозного излучения и электронных пучков на основе индуктивных накопителей энергии // Известия высших учебных заведений, «Физика», 1995. № 12. С. 84–92.
3. Протас Р.В., Лаврентьев Б.Н., Кононенко В.Ю. и др. Генерация импульса тормозного излучения двумя ускорительными трубками установки ЭМИР-2 // ВАНТ, серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2010. Вып. 2. С. 100–101.
4. Протас Р.В., Хафизов Р.Р., Павловских Д.Е. и др. Генерация двух последовательных импульсов тормозного излучения с регулируемым интервалом времени между ними на двух-модульном ускорителе ЭМИР-2 // ВАНТ, серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2011. Вып. 1. С. 52–55.

EMIR-2 - PULSED SOURCE OF IONIZING RADIATION

B.N. Lavrentiev, R.N. Munasypov, V.V. Pereshitov,
R.V. Protas, R.R. Khafizov

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

E-mail: dep5@vniitf.ru

The paper presents EMIR-2 accelerator [1] which is the source of electron beams and bremsstrahlung radiation and is intended for radio physical studies. The design of EMIR-2 facility includes two pulsed electron accelerators assembled on the basis of the inductive-capacitive energy storage switched using electrically explosive wires [2]. The basic elements of each accelerator are: multi-module high-voltage pulse generator assembled according to the Arkadyev-Marx scheme; pulse generation system consisting of the inductive energy storage, electrically explosive wires, and the uncontrolled sharpening gap; accelerating tube consisting of the insulator, the vacuum transmission line with magnetic self-isolation, and the vacuum-tube diode.

The electron beams generated on EMIR-2 accelerator have the following parameters: pulse duration is of 100...2000 ns; voltage across the accelerating tube is up to 5.5 MV; current of the extracted beam is up to 30 kA; energy density over the beam cross-section is up to 300 J/cm²; average electron energy is 2.5 MeV. EMIR-2 accelerator has three main modes of bremsstrahlung pulse generation: single giant pulse is superposition of two nanosecond (<100 ns) pulses generated by two synchronous operating accelerators [2, 3]; intricate-shape pulse is superposition of the nanosecond and microsecond (≥ 1 μ s) pulses generated by two synchronous operating accelerators [2]; two series pulses are superposition of nanosecond bremsstrahlung pulses generated by two accelerators operating

with timed delay of (2...1000 μ s) [4]. Bremsstrahlung pulses have the following characteristics (depending on the mode): voltage across each accelerating tube – 1.5...5.5 MV, current through each accelerating tube – 30...70 kA; pulse duration at half-height – 2000...40 ns; dose rate on the anode of each accelerating tube – 10^{10} ... $5 \cdot 10^{12}$ R/s.

References

1. Protas R.V., Lavrentiev B.N., Munasypov R.N. et al. Implementation of new modes for generation of the bremsstrahlung pulses on the EMIR-2 accelerator // VANT, series: Physics of radiation effect on radio-electronic equipment, 2011. No. 1. pp.46–51.
2. Diyankov V.S., Kovalev V.P., Kormilitsyn A.I., Lavrentiev B.N. Powerful pulse generators of bremsstrahlung radiation and electron beams on the basis of the inductive energy storage // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeny «Phisica», 1995. #12. pp. 84–92.
3. Protas R.V., Lavrentyev B.N., Kononenko V.Yu. et al. Generation of the bremsstrahlung radiation pulse by two accelerating tubes of EMIR-2 accelerator // VANT, series: Physics of radiation effect on radio-electronic equipment, 2010. No. 2. pp.100–101.
4. Protas R.V., Khafizov R.R., Pavlovskikh D.E. et al. Generation of two serial bremsstrahlung pulses with the controlled time interval between them on the two-module EMIR-2 accelerator // VANT, series: Physics of radiation effect on radio-electronic equipment, 2011. No. 1. pp. 52–55.

3-27

ОТКРЫТАЯ ЛОВУШКА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ В ИЯФ

А.Д. Беклемишев^{1,2}, А.В. Бурдаков¹, А.А. Иванов^{1,2},
И.А. Иванов^{1,2}, В.В. Поступаев^{1,2}, С.Л. Синицкий^{1,2}

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет,
Новосибирск, Россия
E-mail: bekl@bk.ru

В физике удержания плазмы в осесимметричных открытых ловушках ИЯФ СО РАН в последние годы достигнут значительный прогресс. На установке с гофрированным магнитным полем и турбулентным нагревом плазмы релятивистским электронным пучком (ГОЛ-3) обнаружен эффект аномального рассеяния ионов, вытекающих из ловушки. Эффект многопробочного удержания (торможение пролетных ионов при взаимодействии с ионами, запертыми в гофрах поля), как оказалось, может быть достигнут при относительно небольшой плотности плазмы. Это делает его пригодным для улучшения продольного удержания в плазме с $\beta < 1$. Другое важное направление исследований – изучение удержания двухкомпонентной плазмы с плещущимися ионами на установке ГДЛ – также достигло существенного прогресса. Получено удержание плазмы с $\beta \sim 0,6$ и электронной температурой порядка 200 эВ. В настоящее время обе установки ИЯФ достигли своих исходных целей, и необходимо сделать следующий шаг. Решено создать ловушку в виде большого пробкотрона (типа ГДЛ) с многопробочными участками по краям для подавления продольных потерь. Нагрев плазмы будет осуществляться как атомарной инжекцией, так и двусторонней инжекцией электронных пучков из рас-

ширителей вдоль магнитного поля. Конструкция будет максимально использовать детали и инфраструктуру от недостроенного проекта «Водородный прототип».

Основные цели создания новой ловушки – достижение целей проекта «Водородный прототип» – потока и плотности потока нейтронов (2 МВт/м² в пересчете на DT); повышение эффективности генерации нейтронов $Q_{DT} \sim 10\%$, создание базы данных для проектирования ТЯ реактора с динамическим продольным удержанием в многопробочных концевых секциях. Параметры: длина центрального пробкотрона – 10 м, радиус плазмы – 10 см, плотность $\sim 3 \cdot 10^{20}$ м⁻³, средняя энергия ионов – 20 кэВ, электронная температура >400 эВ, время разряда ~ 1 с, мощность нагрева – по 10 МВт в атомарных и электронных пучках. Первая стадия проекта – сверхпроводящий многопробочный соленоид длиной 6 м с полем порядка 7 Т. Он должен быть построен в 2012–2013 гг. и будет сначала использоваться для изучения длительного воздействия плазмы на материалы при большой плотности мощности.

OPEN TRAP OF NEW GENERATION IN BINP

A.D. Beklemisev^{1,2}, A.V. Burdakov¹, A.A. Ivanov^{1,2},
I.A. Ivanov^{1,2}, V.V. Postupaev^{1,2}, S.L. Sinitzky^{1,2}

¹Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS,
Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia
E-mail: bekl@bk.ru

Significant progress has been achieved in understanding the physics of plasma confinement in axially symmetric open traps in the Budker Institute SB RAS. In particular, the effect of anomalous scattering of ions of the plasma outflow has been found in the GOL-3 trap, which features the corrugated magnetic field and plasma heating by a relativistic electron beam. As a result, the effect of multi-mirror confinement (due to friction of passing ions with ions trapped in cells of the corrugated field) was shown to be effective even at moderate plasma densities. This makes the multi-mirror confinement suitable for improvement of axial confinement in plasmas with $\beta < 1$. Another important direction of research, namely, the study of two-component plasmas with sloshing ions in the gas-dynamic trap (GDT) has also shown significant progress. Stable plasma confinement with $\beta \sim 0.6$ and electron temperature of 200 eV has been demonstrated. At the moment both plasma traps of the Budker Institute have reached their project goals and limitations, so that significant further progress can be achieved only in a new device. We decided to build a trap as a large axially symmetric mirror (of the GDT type) with multiple-mirror end plugs (of the GOL type) in order to have both the enhanced energy content and improved axial confinement. Plasma heating will be through neutral beam injection as well as through two-sided injection of electron beams from expanders along the magnetic field. The project will make use of the infrastructure and parts from the unfinished project the «Hydrogen Prototype».

The main goals of the new trap are as follows: 1) to reach plasma parameters previously set for the «Hydrogen Prototype» project, namely, the flux density of neutrons in recalculation to DT should be equivalent to

2 MW/m²; 2) to improve the effectiveness of neutron generation, $Q_{DT} \sim 10\%$; 3) to prepare database for construction of the fusion reactor with multiple-mirror confinement. Parameters of the proposed trap are as follows: the length of the central mirror is 10 m, the plasma radius is 10 cm, the plasma density is around $\sim 3 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$, the mean ion energy is 20 keV, the electron temperature exceeds 400 eV, the discharge time is ~ 1 s, the heating power is 20 MW in atomic and electron beams in equal parts. The first stage of the project is the superconducting solenoid 6m long with the corrugated field of 7 T. It should be built in 2012–2013 and will be used at first for study of prolonged influence of plasma on materials at high power densities and high magnetic fields.

ние оптимальной конфигурации элементов гибридной системы, обеспечивающей максимальную энергетическую эффективность источника нейтронов и эффективность использования нейтронов источника в blankets.

В частности, представлены результаты исследования зависимости мощности нейтронной эмиссии от длины эмиссионной зоны для конфигурации нейтронного источника, параметры которого можно считать близкими к предельным. Также представлены зависимости интегральных коэффициентов подкритичного blankets гибридной системы от ряда параметров пространственной конфигурации blankets.

3-28

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЕ
С ИСТОЧНИКОМ НЕЙТРОНОВ
НА БАЗЕ ПЛАЗМЕННОЙ ЛОВУШКИ
ОТКРЫТОГО ТИПА**

А.В. Аникеев¹, П.А. Багрянский¹, С.А. Бреднихин²,
С.И. Лежнин², Н.А. Прибатулин², В.В. Приходько¹,
С.А. Фролов², Ю.А. Цидулко¹, Д.В. Юров^{1, 2}.

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, Россия

²Институт проблем безопасного развития атомной
энергетики РАН, Москва, Россия

E-mail: sbrednikhin@gmail.com

Гибридные ядерно-термоядерные системы с источниками нейтронов на основе плазменных ловушек открытого типа являются перспективной технологией привлекающей внимание многих исследователей. Подобные системы могут решать различные задачи в рамках топливного цикла, такие как дожигание отработанного ядерного топлива. Совместная работа ИЯФ СО РАН и ИБРАЭ РАН посвящена исследованию возможности создания гибридной системы с источником нейтронов на базе газодинамической ловушки открытого типа.

Первым этапом исследования является численное моделирование процессов происходящих в источнике нейтронов, а так же моделирование нейтронно-физических свойств установки с целью определения требований, предъявляемых к системе и ее возможных конфигураций.

Расчет параметров источника нейтронов производится с помощью программного обеспечения, разработанного в ИЯФ СО РАН. Нейтронно-физические процессы в blankets подкритичной системы моделировались с помощью кода NMC (ИБРАЭ РАН). В ходе разработки программного обеспечения применен ряд моделей позволяющих сократить время необходимое для расчета, что является важным, с учетом поискового характера задачи.

Предлагаемый доклад представляет результаты ряда численных экспериментов, направленных на определе-

3-29

**УДЕРЖАНИЕ
ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ
В МАГНИТОПЛАЗМЕННОЙ ЛОВУШКЕ**

А.Н. Залялов, Н.В. Иванов, В.А. Стародубцев,
Р.Р. Сунгатуллин, А.Е. Широков

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

E-mail: a.e.shirokov@vniief.ru

При исследовании радиационных поясов Земли, высотных ядерных взрывов и инъекции электронных сгустков в ионосферу и магнитосферу возникает задача об удержании релятивистских электронов, создаваемых распределенным источником внутри расширяющегося облака плазмы, и соответствующей эволюции магнитного поля.

Проведенное численное исследование данной задачи показало, что образующаяся в результате вытеснения магнитного поля облаком плазмы магнитная ловушка препятствует выходу значительной части (примерно половины) высокоэнергичных электронов в область невозмущенного магнитного поля, что приводит к их накоплению внутри этого облака. В результате в нем формируется область с высокими плотностями и токами этих электронов. Учет порождаемого их токами собственного магнитного поля повышает эффективность удержания высокоэнергичных электронов примерно в два раза. Рассеяние захваченных в магнитной ловушке высокоэнергичных электронов в плазме приводит к их постепенному уходу в область невозмущенного магнитного поля.

На стенде «МКВ-4» лазерной установки «Искра-5» проведена серия экспериментов с целью лабораторного моделирования данного эффекта удержания высокоэнергичных электронов в магнитной ловушке. Схема проведения экспериментов состояла в следующем. В центре вакуумной камеры размещалась полая тонкостенная сферическая мишень, в которую через отверстие вводилось излучение лазера. В результате разлета образующегося при этом сферического облака плазмы в окружающий разреженный воздух в присутствии магнитного поля формировалась магнитная ловушка, внутри которой располагалась плоская мишень из алюминия. Второй импульс излучения лазера, задержанный относительно первого на несколько мкс, обеспечивал

генерацию высокоэнергичных электронов из данной мишени. Величина потоков этих электронов в магнитной ловушке и их энергетическое распределение измерялось с помощью специальных спектрографов.

Результаты численного моделирования данных экспериментов (в частности, динамики электронов с учетом их оседания на внутренней аппаратуре вакуумной камеры) хорошо согласуются с результатами измерений, которые качественно подтверждают эффект удержания высокоэнергичных электронов в данной магнитоплазменной ловушке.

HIGH-ENERGY ELECTRON CONFINEMENT IN A MAGNETOPLASMA TRAP

A.N. Zalyalov, N.V. Ivanov, V.A. Starodubtsev,
R.R. Sugatullin, A.E. Shirokov

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

E-mail: a.e.shirokov@vniief.ru

If we study the Earth radiation belt, high-altitude nuclear explosions, or injection of electron beam bunches to ionosphere and magnetosphere, we face the problem of confinement of relativistic electrons generated by a distributed source inside an expanding plasma cloud and further evolution of magnetic field.

The numerical simulation of the problem has demonstrated that a magnetic trap resultant from displacement of magnetic field by a plasma cloud prevents releasing of most high-energy electrons (about a half part of electrons) to the area of undisturbed magnetic field and, therefore, electrons are accumulated inside the plasma cloud. As a result, we observe the area of high electron densities and currents generated in it. The efficiency of high-energy electron confinement is almost two times higher, if we take into account the self-magnetic field generated by electron currents. Scattering of the high-energy electrons confined in the magnetic trap causes their gradual departure to the area of undisturbed magnetic field.

A series of experiments on the simulation of high-energy electron confinement in a magnetic trap under laboratory conditions has been performed on MKV-4 testbed of Iskra-5 laser. The design of experiments is described below. A hollow thin-wall spherical target was placed at the central part of a vacuum chamber, laser radiation entered into this chamber through a hole in it. A magnetic trap with a plane aluminum target inside it was generated as a result of the spherical plasma cloud scatter to the surrounding rare atmosphere in the presence of magnetic field. The second laser radiation pulse, which was a few microseconds later, provided generation of high-energy electrons for the given target. Fluxes of these electrons in the magnetic trap and their energy distribution were measured using special spectrographs.

The numerical simulation results for the experiments above (in particular, dynamics of electrons with regard to sedimentation of electrons on the devices located inside the vacuum chamber) are in a good agreement with our measurement results which prove that confinement of high-energy electrons in the given magnetoplasma trap really takes place.

3-30

ДИНАМИКА ДЕЙТЕРИЕВОГО ГАЗОВОГО ЛАЙНЕРА И ВЫХОД НЕЙТРОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ГЕНЕРАТОРЕ ГИТ-12

А.В. Шишлов¹, Б.М. Ковальчук¹, В.А. Кокшенев¹,
Н.Е. Курмаев¹, А.Ю. Лабеецкий¹, Н.А. Ратахин¹,
Ф.И. Фурсов¹, D. Klir², J. Kravarik²,
P. Kubes², K. Rezac²

¹Институт сильноточной электроники СО РАН,
Томск, Россия

²Чешский технический университет в Праге,
Прага, Чешская Республика

E-mail: ash@ovpe2.hcei.tsc.ru

В докладе представлены результаты экспериментов по сжатию дейтериевых газовых лайнеров на генераторе ГИТ-12 (Томск, Россия). Основное внимание было уделено исследованию динамики имплозии и выходу нейтронного излучения дейтериевого Z-пинча. В качестве нагрузки использовался двухкаскадный лайнер с соотношением масс оболочек близкой к единице. Полная масса лайнера варьировалась в пределах от 50 до 85 мкг/см. Эксперименты проводились в двух режимах работы генератора – с плазменным прерывателем тока и без него. При работе с плазменным прерывателем пиковый ток имплозии составляет 2,7 МА, а время имплозии изменялось от 280 до 470 нс в зависимости от начальных параметров лайнера. В экспериментах без плазменного прерывателя пиковый ток не превышал 2 МА, а время имплозии увеличилось до 670–720 нс. Для диагностики Z-пинча использовались фотоэлектронный регистратор, камеры-обскуры, вакуумные рентгеновские диоды и фотопроводящие детекторы. Нейтронная диагностика включала в себя времяпролетную диагностику на основе четырех сцинтилляционных детекторов, активационный детектор и пузырьковые детекторы.

Эксперименты показали, что динамика имплозии дейтериевого лайнера характеризуется двумя особенностями: во-первых, сжатие начинается с радиуса, который существенно превышает радиус сопла; во-вторых, наблюдается деление токов между внутренней и внешней оболочкой и их одновременное ускорение к оси. Использование имеющейся системы предьонизации не позволило подавить деление токов между оболочками. Данный феномен оказывает негативное влияние при использовании газовых лайнеров для генерации К-излучения. Его влияние на эмиссию нейтронов будет изучаться более детально в будущих экспериментах.

Эмиссия нейтронов начинается одновременно с появлением мягкого рентгеновского излучения. Однако максимум нейтронного излучения достигается на 40 нс позднее и сопровождается появлением жесткого рентгеновского излучения. Максимальный нейтронный выход, зарегистрированный в экспериментах, составляет $2 \cdot 10^{11}$. Обобщение имеющихся экспериментальных данных по выходу нейтронов при имплозии дейтериевых лайнеров дает зависимость выхода нейтронного излучения от пикового тока имплозии в виде $Y_N \propto I^3$.

DEUTERIUM GAS-PUFF DYNAMICS AND NEUTRON PRODUCTION IN EXPERIMENTS ON THE GIT-12 GENERATOR

A.V. Shishlov¹, B.M. Kovalchuk¹, V.A. Kokshenev¹,
N.E. Kurmaev¹, A.Yu. Labetsky¹, N.A. Ratakhin¹,
F.I. Fursov¹, D. Klir², J. Kravarik², P. Kubes², K. Rezac²

¹Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

²Czech Technical University in Prague, Prague, Czech Republic

E-mail: ash@ovpe2.hcei.tsc.ru

The paper presents results of experiments with deuterium gas puffs carried out on the GIT-12 generator (Tomsk, Russia). The main attention was paid to investigation of implosion dynamics and neutron emission of deuterium Z-pinch. A double shell gas puff with the inner-to-outer shell mass ratio close to unity was used as a load. The total gas puff mass was varied in the range from 50 to 85 $\mu\text{g}/\text{cm}$. The experiments were carried out at two generator operation mode, with and without a plasma opening switch (POS). In the first mode, the peak implosion current reached 2.7 MA, and the implosion time was between 280 and 470 ns depending on the initial gas puff parameters. In the experiments without the POS, the peak implosion current approached only 2 MA, but the implosion time increased to 670–720 ns. The following set of diagnostics was used: a streak camera, pinhole cameras, X-ray vacuum diodes, and photoconducting detectors. The neutron diagnostics included time-of flight diagnostics based on four scintillation detectors, an activation detector, and bubble detectors.

The experiments showed that the implosion dynamics of deuterium gas puffs was characterized by two features: first, the implosion started from a radius that was significantly larger than the nozzle radius; second, current division between the inner and outer shells was observed, and acceleration of the shells to the axis occurred simultaneously. The use of available preionization system did not allow suppression of the current division. This phenomenon has a negative impact when the gas puffs are used for K-shell radiation production. Its influence on the neutron emission will be studied in more details in our future experiments.

The start of the neutron emission was observed in the experiments simultaneously with the soft X-ray radiation. However, the peak of neutron emission occurred 40 ns after the soft X-ray radiation peak, and it was accompanied by the burst of hard X-rays. The maximum neutron yield registered in the experiments was $2 \cdot 10^{11}$. Summarizing of the available experimental data on the neutron yield from deuterium gas puffs gives the dependence of the neutron yield on a peak implosion current as $Y_N \propto I^3$.

3-31

РАЗЛИЧНЫЕ СЦЕНАРИИ ФОРМИРОВАНИЯ КОРОНЫ И ПЛОТНОГО КЕРНА В РАЗРЯДНОМ КАНАЛЕ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ ПРОВОЛОЧЕК

С.И. Ткаченко^{1,2}, В.В. Жаховский^{2,3},
С.А. Пикуз⁴, Т.А. Шелковенко⁴

¹Московский физико-технический институт,
Долгопрудный, Россия

²Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

³Университет Южной Флориды, Тампа, США

⁴Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
Москва, Россия

При численных расчетах взрыва одиночных алюминиевых проволочек получено, что вещество, составляющее керны, длительное время находится в состоянии плотной неидеальной плазмы при температуре 1–3 эВ. Только после шунтирования основной части тока короной керн переходит в двухфазное состояние жидкость–пар в процессе расширения. Однако в том случае, если шунтирование основной части тока происходит на раннем этапе взрыва, например, когда большая часть вещества проволочки находится еще в жидком состоянии, возможен другой сценарий формирования структуры керна. В этом случае ввиду резкого падения сжимающего магнитного давления почти до нуля, вещество керна при разгрузке может по инерции проскочить в состояние растянутой жидкости с отрицательным давлением. В соответствии с молекулярно-динамическими расчетами при распаде такого метастабильного состояния образуется сложная структура керна: внешняя цилиндрическая жидкая оболочка, заполненная малоплотным веществом в пенообразном состоянии. В дальнейшем пена распадается на капли, прежде чем распадается внешняя оболочка. Результаты расчетов находятся в качественном согласии с экспериментальными данными, полученными при обработке рентгеновских изображений взрывающихся проволочек.

DIFFERENT SCENARIOS OF FORMATION OF THE CORONA AND DENSE CORE IN THE DISCHARGE CHANNEL DURING WIRE EXPLOSION

S.I. Tkachenko^{1,2}, V.V. Zhakhovsky^{2,3},
S.A. Pikuz⁴, T.A. Shelkovenko⁴

¹Moscow Institute of Physics and Technology,
Dolgoprudny, Russia

²Joint Institute for High Temperatures, RAS, Moscow, Russia

³Department of Physics, University of South Florida,
Tampa, USA

⁴Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia

In the numerical calculations it was obtained that, during the explosion of a single aluminum wire, the core material remains for a long time in the state of a dense nonideal plasma with a temperature of 1–3 eV. Only after shunting the main part of current to the corona, the core

goes into a two-phase liquid-vapor state in the expansion process. However, if shunting of the current occurs at an early stage of the explosion, for example, when the wire material is still in liquid state, it is possible another scenario of core structure formation. In this case, due to a sharp drop of the compressive magnetic pressure, the core material can come into a state of the stretched melt during unloading. In accordance with the molecular dynamic calculations this metastable state decays, that resulting in to formation of a complex core structure: the outer cylindrical liquid shell filled with low-density foam. The foam decays into liquid droplets before the outer shell breaks apart. Simulated density profiles demonstrate good qualitative agreement with experimental high-resolution X-ray images showing the complex hollow structures within the long-living dense core.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research project nos. 11-08-00624-a.

3-32

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ДВУХКАСКАДНЫМИ ГАЗОВЫМИ ЛАЙНЕРАМИ НА ГЕНЕРАТОРЕ МИГ

С.А. Сорокин

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

E-mail: s.sorokin@rambler.ru

На сильноточном генераторе МИГ (максимальный ток до 2 МА, время нарастания импульса тока около 80 нс) проведены эксперименты с двухкаскадными аргоновыми и неоновыми лайнерами. В экспериментах исследовалось влияние конфигурации обратного токопровода (прямой токопровод, изготовленный из стержней в виде «беличьего колеса», и спиральный токопровод, в котором каждый из стержней токопровода выполнен в виде спирали с определенным шагом) на устойчивость и степень сжатия лайнера (однородность и диаметр сформированного пинча), а, также, параметры генерируемых импульсов K -излучения аргона (излучение гелие- и водородоподобных ионов, энергия квантов 3–5 кэВ) и неона (0,9–1,5 кэВ). Показано, что применение спирального обратного токопровода совместно с каскадированием лайнера позволяет получить однородный (без характерных перетяжек и горячих точек) пинч диаметром 0,2–0,3 мм (степень радиального сжатия плазмы лайнера около 100). Выход K -излучения в выстрелах с двухкаскадными лайнерами составил 0,8–1,0 кДж для аргона и 4–5 кДж для неона.

DOUBLE SHELL GAS-PUFF LINER EXPERIMENTS ON MIG

S.A. Sorokin

Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: s.sorokin@rambler.ru

Experiments on the neon and argon double shell liner implosions have been performed on the MIG pulse generator (2 MA, 80 ns). In the experiments the influence of the current return configuration (straight current return made of rods in the form of squirrel cage, and helical current

return in which the every rod is a helix) on the liner stability and radial compression ratio (homogeneity and diameter of the pinched plasma) as well as the argon (3–5 keV) and neon (0.9–1.5 keV) K -shell radiation parameters was investigated. It is shown that using a helical current return jointly with a double shell liner structure homogeneous (without typical hot points) pinches of diameter 0.2–0.3 mm can be generated (radial compression ratio ~ 100). The K -shell yields of 0.8–1.0 kJ for argon and 4–5 kJ for neon were achieved.

3-33

ДВУХСТУПЕНЧАТЫЙ КОММУТАТОР ДЛЯ ИМПУЛЬСНОГО ГЕНЕРАТОРА НА ИНДУКТИВНОМ НАКОПИТЕЛЕ ПРИ РАБОТЕ НА ПРОИЗВОЛЬНУЮ НАГРУЗКУ

О.Г. Егоров

ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Троицк, Московская обл., Россия

E-mail: egorov@triniti.ru

В общем виде генераторы импульсов состоят из накопителя энергии коммутационного устройства и нагрузки. Накопители энергии, широко применяемые в мощной импульсной технике, делятся на два класса – на основе электрической энергии (ЭЭ) и магнитной энергии (МЭ). Генераторы импульсов с накопителями энергии на основе электрической энергии состоят из накопителя энергии – конденсаторной батареи, замыкающего устройства и нагрузки. Генератор импульсов с накопителями энергии на основе магнитной энергии состоят из накопителя энергии – индуктивности, размыкающего устройства и нагрузки. Несмотря на очевидное превосходство (плотность энергии, стоимость, ресурс и т. д.) генераторов на основе магнитной энергии, их незначительная распространенность по сравнению с генераторами на основе электрической энергии определяется, прежде всего, несоответствием параметров размыкающих устройств по сравнению с параметрам замыкающих устройств. Например, легко достижимые параметры замыкающих устройств, при гигаваттных мощностях и длительности импульса 10^{-3} – 10^{-2} с – это высокий ресурс более 10^4 актов замыкания, высокий уровень синхронизации при параллельной работе $\sim 10^{-7}$ – 10^{-6} с, возможность работы на любую комплексную нагрузку, возможность работы в режиме повторения импульсов и т. д. [1].

Основная цель ряда работ [2–5] заключалась в том, чтобы приблизить параметры размыкающих устройств, а именно двухступенчатого размыкателя тока, при вышеназванных параметрах замыкающих устройств и параметрах импульса. В работах [2–4] было предложено решение, в котором обеспечивалось достижение ресурса с $\sim 10^2$ до более 10^4 надежных актов. В работе [5] предложено, в развитии этого направления, техническое решение, которое позволяет размыкающему устройству, при рассматриваемых мощностях, работать в режиме повторения импульсов в пределах ~ 10 – 50 имп \cdot с $^{-1}$. В частности, предложенное техническое решение было показано на примере омической нагрузки.

В данной работе предложено вниманию техническое решение, которое является дальнейшим развитием двухступенчатого размыкателя тока и, которое позволяет генерировать импульсы в режиме повторения импульсов на любую нагрузку, даже при мульти-гигаваттных мощностях. Т. е. двухступенчатый размыкатель тока в сочетании с предложенными техническими решениями по своим характеристикам сравнивается с характеристиками замыкающих устройств. А соответствующая степень синхронизации может быть обеспечена свойствами замыкающих устройств в системе управления.

Литература

1. Физика и техника больших мощностей. / Сб. ст. под ред. Велихова Е.П., М.: Энергоатомиздат, 1987. 352 с.
2. Физика и техника высоких плотностей электромагнитной энергии. / Под ред. Селемира В.Д., Пляшкевича Л.Н., М., Атомиздат, 2003. 555 с.
3. Раховский В.И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. М.: Наука, ГРФМЛ, 1970. с. 393.
4. Egorov O.G. Patent No.2299487, 22.09.2005. Russian Federation.
5. Egorov O.G. Countercurrent breaking by vacuum interrupter combined in paralleled vacuum switch. // Proc. XXII Inter. Symp. Discharge and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), Matsue, Japan. 2006.
- 6 Egorov O.G. Countercurrent breaking by vacuum interrupter combined in parallel with vacuum switch // Proc. International Conference «Zababahn science talking», Russia. 2007.
7. Egorov O.G. Development of the conception of high power pulsed compact generator based on inductive storage and combined opening switch // 2th Proc. Euro-Asian International Pulsed Power Conference, Lithuania. 2008.
8. Egorov O.G. A Two-Stage Circuit Breaker with «Turnover» of «Capacitor Bank Potential» Proc. 18th IEEE International Pulsed Power Conference, Chicago, Illinoice, USA. 2011.

TWO-STAGE OPENING SWITCH FOR THE PULSE GENERATOR BASED ON INDUCTIVE STORAGE AT WORK ON AN ARBITRARY LOAD

O.G. Egorov

TRINITI, Troitsk, Moscow region, Russia

E-mail: egorov@triniti.ru

In general, pulse generators consist of a storage of energy, a switch and a load. The energy storages that have found wide application in high-power pulse facilities are divided into two types: the first based on electrical energy (EE) and the second on magnetic energy (ME). Pulse generators with storages of the first type (EE) include a capacitor bank, a closing device and a load. Pulse generators with storages of the second type (ME) include an inductance, an interrupter and a load. Despite the evident superiority (energy density, cost, resource, and etc.) of the generators operating on the basis of electrical energy, their insignificant applicability against generators on the basis of magnetic energy is explained, first of all, by discrepancy between the parameters of opening and closing devices. For example, at a gigawatt power and pulse duration of 10^{-3} – 10^{-2} the easily accessible parameters of the interrupters are as follows: their high resource of over 10^4 acts of closing, high degree of synchronization of $\sim 10^{-7}$ – 10^{-6} sec at parallel operation, ability of working on any complex load and, also, in the mode of pulse repetition and al. [1].

A number of works [2–5] were aimed mainly at bringing closer the parameters of the opening devices, namely the two-stage current interrupter, at the above-said parameters of the closing devices and pulses. In [2–4] a solution was proposed which provided attaining a resource from $\sim 10^2$ to over 10^4 reliable acts. In [5], in the discussion of the work, a technical solution was also proposed where the interrupter is allowed to operate in the mode of pulse repetition within ~ 5 – 10 pulses \cdot sec $^{-1}$ at powers under consideration. In particular, the proposed solution has been shown by the example of resistive load.

The current work puts forward the technical solution which is further developing the two-stage current interrupter; it enables the pulses to be generated in the mode of repetition on any load even at multi-gigawatt powers. This means that in its characteristics the two-stage current interrupter in combination with the proposed technical solutions can be compared with closing devices. The corresponding degree of synchronization can be achieved with the properties of closing devices in the system of control.

References

1. Physics and technology of high power // Ed. Velikhov E.V., M.: Energoatomizdat, 1987, 352p.
2. Physics and technology of electromagnetic energy of high density // Ed. B.D Selemir and L.N. Plyashkevich, M.: Energoatomizdat, 2003, 555p.
3. Rakhovsky V.I. Physical foundation of electric current switching in vacuum. M.: Nauka, GPMFL, 1970. p. 393.
4. Egorov O.G. Patent No. 2299487, 22.09.2005, Russian Federation.
5. Egorov O.G. Countercurrent breaking by vacuum interrupter combined in paralleled vacuum switch // Proc. XXII Inter. Symp. Discharge and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), Matsue, Japan. 2006.
- 6 Egorov O.G. Countercurrent breaking by vacuum interrupter combined in parallel with vacuum switch // Proc. International Conference «Zababahn science talking», Russia. 2007.
7. Egorov O.G. Development of the conception of high power pulsed compact generator based on inductive storage and combined opening switch // 2th Proc. Euro-Asian International Pulsed Power Conference, Lithuania. 2008.
8. Egorov O.G. A Two-Stage Circuit Breaker with «Turnover» of Capacitor Bank Potential // Proc. 18th IEEE International Pulsed Power Conference, Chicago, Illinoice, USA. 2011.

3-34

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ И КОНВЕРСИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ В ГЕНЕРАТОРАХ НА ПЛАЗМЕННОМ ФОКУСЕ

Б.Д. Лемешко, Д.И. Юрков,

А.К. Дулатов, А.Н. Селифанов

ФГУП ВНИИ автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

E-mail: bogolubov@vniia.ru

Рассмотрены энергетические соотношения в генераторах нейтронов, использующих явление плазменного фокуса (ПФ). Рассчитана эффективность использования запасенной в емкостном накопителе энергии для генерации нейтронов. Показано, что коэффициент передачи запасенной энергии в емкостном накопителе в камеру плазменного фокуса составляет 20–40%.

Расчет конверсионной эффективности η преобразования энергии E в нейтроны N : $\eta = N/E$ показывает, что η по величине приближается к конверсионной эффективности генераторов на вакуумных нейтронных трубках.

Проведен анализ использования энергии емкостных накопителей генераторов ПФ. Показано, что для генераторов ПФ с токами до 500 кА основной резерв повышения эффективности работы заключается в разработке малоиндуктивных малогабаритных схем питания камер ПФ. Отчасти эта проблем решена во ВНИИА – разработан модельный ряд малогабаритных генераторов ПФ. В области больших токов (>500 кА) проблема повышения эффективности работы генераторов заключается в совершенствовании конструкции камеры ПФ. Во ВНИИА разработана малоиндуктивная камера ПФ10 отпаянной конструкции на ток до 1500 кА. Получен выход нейтронов $0,9 \cdot 10^{10}$ нейтр./имп. (2,5 МэВ) и $0,74 \cdot 10^{12}$ нейтр./имп. (14,5 МэВ) при рекордно малой запасаемой энергии установки – 24–26 кДж.

ENERGY PARITIES AND CONVERSION EFFICIENCY IN PLASMA FOCUS DEVICES

B.D. Lemeshko, D.I. Yurkov,
A.K. Dulatov, A.N. Selifanov

Federal State Unitary Enterprise N.L. Dukhov's
All-Russian Research Institute of Automatics (VNIIA),
Moscow, Russia

E-mail: bogolubov@vniia.ru

Energy parities in generators of the neutrons using the phenomenon of plasma focus (PF) are considered. Efficiency of use of the energy reserved in the capacitor store for generation of neutrons is calculated. It is shown that the factor of transfer of the reserved energy in the capacitor store in the plasma focus chamber makes 20–40%.

Calculation of conversion efficiency η transformations of energy E to neutrons N : $\eta = N/E$ shows that η on value comes nearer to conversion efficiency of generators on vacuum neutron tubes.

The analysis of use of capacitor stores energy of generators PF is carried out. It is shown that for generators PF with currents to 500 kA the basic reserve of increase of overall performance consists in working out low-inductance small-sized power supply circuits of chambers PF. Partly this problem is solved in VNIIA – the lineup of small-sized generators PF is developed. In the field of the big currents (>500 kA) the problem of increase of overall performance of generators consists in perfection of a design of chamber PF. The low-inductance seal chamber PF10 design on a current to 1500 kA is developed in VNIIA. The neutrons yield $0.9 \cdot 10^{10}$ n/pulse (2.5 MeV) and $0.74 \cdot 10^{12}$ n/pulse (14.5 MeV) is received at recordbreaking small reserved energy of installation – 24–26 kJ.

3-35

ТРЕХМЕРНАЯ ПОЛНОСТЬЮ КИНЕТИЧЕСКАЯ ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЫ КАНАЛА ХОЛЛОВСКОГО ДВИГАТЕЛЯ

И.А. Горячев, В.Д. Левченко, А.Ю. Перепёлкина

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

E-mail: vadimlevchenko@mail.ru

Аномальная проводимость в замагниченной плазме наблюдается как и в природных системах (ионосфере), так и в плазменных установках (токамак), но ее физические причины до сих пор не до конца исследованы. Среди возможных причин переноса электронов отмечают столкновения частиц плазмы, плазменные неустойчивости и пристеночные процессы. При помощи численного моделирования плазмы можно проводить фундаментальные исследования процесса аномального переноса, а также решать прикладные задачи, такие как улучшение конструкции холловских двигателей (ХД).

Если взять за основу гипотезу, что возникновение плазменных неустойчивостей является основной причиной аномальной проводимости, необходимо выбрать такую численную модель, которая могла бы адекватно моделировать нелинейные плазменные процессы, а также быть расширяемой для исследования оставшихся гипотез.

В данной работе обоснован выбор полностью кинетической 3D3V модели для исследования аномального переноса в плазме холловского двигателя.

На основе выбранной модели реализован программный комплекс CFhall. Благодаря таким средствам повышения эффективности вычислений, как локально-рекурсивное хранение данных, LRnLA алгоритмы [1] и векторизация, в модели не приходится использовать приближения искусственной диэлектрической проницаемости и измененного отношения масс ионов и электронов. Для расчета самосогласованных электромагнитных полей используются уравнения Максвелла. В таких условиях возможно адекватное моделирование плазменных неустойчивостей как причины переноса электронов к аноду.

На начальном этапе исследуемой трехмерной областью выбран параллелепипед – сектор цилиндрического рабочего канала ХД. Верхняя и нижняя его грани представляют собой диэлектрик. На две боковые грани накладываются периодические условия; на правой границе может быть помещен источник электронов (катод), в левой грани – источник инжектируемого рабочего газа и анод. В области задаются внешние постоянные скрещенные электрическое и магнитное поля: монотонно нарастающий по оси x профиль u -компоненты магнитного поля, и разность потенциалов вдоль оси x . В начальный момент плазма занимает половину области около левой границы по x .

Для исследования выбрано 6 режимов, различающихся величиной магнитного и электрического полей. Три варианта для магнитного поля различны соотношением циклотронных радиусов электронов и ионов

и размера области. Два варианта электрического поля – соотношением кинетической энергии ионов и потенциала электрического поля.

В такой постановке исследованы холловский ток, появление плазменных неустойчивостей и транспорт электронов к противоположной границе.

При размерах пространственной сетки $128 \times 128 \times 120$, шагах по пространству $\sim 0,05$ размеров скин-слоя, шагу по времени $\sim 0,004$ от плазменной частоты расчет 5000 плазменных частот на одном процессоре занимает немногим более суток.

При переходе на параллельную реализацию возможно моделирование прикладных задач за допустимые сроки.

Литература

1. Левченко В.Д. Асинхронные параллельные алгоритмы как способ достижения эффективности вычислений. Информационные технологии и вычислительные системы, 1:68, 2005.

3D FULLY KINETIC NUMERICAL MODEL OF MAGNETIZED PLASMA OF HALL ENGINE CHANNEL

I.A. Goryachev, V.D. Levchenko, A.Yu. Perepyolkina

Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russia

E-mail: vadimlevchenko@mail.ru

Anomalous conductivity in the magnetized plasma is observed in naturalistic systems (ionosphere), as well as in plasma facilities (tokamak) but its physical reasons are not yet apparent. Possible reasons of electron transfer are plasma particles collision, plasma instabilities, and wall processes. Numerical simulation of plasma allows basic research of the anomalous transfer process and can be used to approach the applied problems such as the improvement of the Hall engine (HE) design.

On the hypothesis that plasma instabilities are the main reason for the anomalous conductivity, it is essential to take a numerical model that can adequately simulate nonlinear plasma processes and be expandable to research other hypotheses.

The paper gives a justification for the use of the fully kinetic 3D3V model to research anomalous transfer in Hall engine plasma.

The software system CFhall was implemented based on the chosen model. Owing to such computational efficiency enhancing means as locally recursive data storage, LRnLA algorithms [1] and vectorization, the approximations of artificial permittivity and varied mass ratio of ions and electrons need not be used in the model. The self-consistent electromagnetic fields are calculated using the Maxwell equations. These conditions enable adequate modeling of plasma instabilities as a reason for electron transfer to the anode.

At the initial stage, a 3D area was represented by a parallelepiped, i.e. the sector of the cylindrical active Hall engine channel. Its upper and lower faces are a dielectric. Periodic conditions are imposed on two lateral faces; the electron source (cathode) can be placed at the right boundary and the injected working gas source and the anode can be placed in the left face. In the region, the external con-

stant crossed electric and magnetic fields are specified, i.e. the profile of magnetic field y -component monotonically expanding along the x -axis and potential difference along the x -axis. Initially, plasma occupies the half-region near the left boundary along the x -axis.

Six test modes were chosen, which have different magnetic and electric fields. Three versions for the magnetic field differ in the way how cyclotron radiuses of electrons and ions relate to the region size. Two versions for the electric field differ in the way how kinetic ion energy relates to the electric field potential.

This setup is used to investigate the Hall current, plasma instabilities, and electron transport to the opposite boundary.

With the spatial grid size of $128 \times 128 \times 120$, space steps being ~ 0.05 of the skin layer size, time step being ~ 0.004 of plasma frequency, the calculation of 5000 plasma frequencies takes little more than a day for one processor.

Parallel computing enables modeling of applied problems within an acceptable period.

Reference

1. Levchenko V.D. Asynchronous parallel algorithms as a means of achieving computational efficiency. Information technologies and computation systems, 1:68, 2005.

3-36

ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ С ПРИМЕРАМИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ И АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Л.В. Терентьева, М.Я. Иванов

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

E-mail: larisa@ciam.ru; ivanov@ciam.ru

Проанализированы точные решения гидродинамических уравнений двужидкостной модели плотной плазмы при отсутствии внешних электромагнитных полей. Для получения полного класса точных решений исходных уравнений в одномерном стационарном случае использован математический подход, предложенный авторами в работах [1, 2]. Наряду с классическими сверхзвуковыми изолированными солитонами Р.З. Сагдеева изучены решения для частицеподобных дозвуковых солитонов и решения в форме кноидальных и обычных периодических волн. Полученные решения позволяют исследовать свойства ряда интересных физических и астрофизических явлений [3, 4]. В настоящем докладе приведены дополнительные примеры решений в форме изолированных солитонов, моделирующие некоторые физические и астрофизические процессы (в частности, демонстрируются решения для наблюдаемого послесвечения интенсивных гамма-всплесков и анализируется возможность распространения уединенных волн со сверхсветовой скоростью).

Литература

1. Иванов М.Я. Об одном классе солитонных решений гидродинамических уравнений движения ионов в однородной

плазме при отсутствии внешних полей. АН СССР, Физика плазмы, 1982, т. 8, вып. 3, с. 607–612.

2. Иванов М.Я., Терентьева Л.В. Стационарные солитоноподобные решения уравнений Эйлера при наличии собственных силовых полей. РАН, Прикладная математика и механика, 1999, т. 63, вып. 2, с. 258–266.

3. Ivanov M., Terentjeva L. Classic Approach to Gamma-Ray Bursts, Ultra-High Energy Cosmic Rays and Cosmic Jets Simulation. International Conference on Theoretical Physics (TH-2002). Paris, UNESCO, July 22–27, 2002. Book of abstracts, pp. 194–195.

4. Ivanov M.Ja., Terentjeva L.V. Exact solutions of two-fluid approach equations in aerospace plasmadynamics. AIAA Paper No. 2003–843, 8 p.

**THE EXACT SOLUTIONS
OF THE HYDRODYNAMIC EQUATIONS
OF CONSISTENT PLASMA WITH EXAMPLES
OF SIMULATION SOME PHYSICAL
AND ASTROPHYSICAL PROCESSES**

L.V. Terentyeva, M.Ja. Ivanov

Central Institute of aviation motors by P.I. Baranov,
Moscow, Russia

E-mail: larisa@ciam.ru, ivanov@ciam.ru

The exact solutions of the hydrodynamic equations of two-fluid approach of consistent plasma in absence of external electromagnetic fields were analyzed. To receive a complete class of the exact solutions of the initial equations in an one-dimensional stationary case the mathematical approach suggested in papers [1, 2] was used. Alongside with the classical supersonic isolated P.Z. Sagdeev's solitons the solutions for particle-like subsonic solitons and solutions in the form of the cnoidal and common periodic waves were studied. The received solutions allowed to investigate properties a number of the interesting physical and astrophysical phenomena [3, 4]. In the present report the additional examples of the solutions in the form of isolated solitons, simulating some physical and astrophysical processes are given. In particular, the solutions for observable afterglow of intensive gamma-ray bursts are demonstrated and the opportunity of solitary waves to travel faster than light is analyzed.

References

1. Ivanov M.Ja. On some classes of soliton solutions of hydrodynamic equations of ion movement in a uniform plasma in absence of external fields. The USSR Science Academy. Physics of plasma. 1982, v. 8, issue 3, p. 607–612.

2. Ivanov M.Ja., Terentyeva L.V. Stationary soliton-like solutions of Euler's equations within inherent force fields. Russian Science Academy. Applied mathematics and mechanics. 1999, v. 63, issue 2, p. 258–266 (in Russian).

3. Ivanov M., Terentjeva L. Classic Approach to Gamma-Ray Bursts, Ultra-High Energy Cosmic Rays and Cosmic Jets Simulation. International Conference on Theoretical Physics (TH-2002). Paris, UNESCO, July 22–27, 2002. Book of abstracts, pp. 194–195.

4. Ivanov M.Ja., Terentjeva L.V. Exact solutions of two-fluid approach equations in aerospace plasmadynamics. AIAA Paper No. 2003–843, 8 p.

3-37

**ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ
МИКРОПРОВОДНИКОВ И ГЕНЕРАЦИИ ПЛАЗМЫ
ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ВДОЛЬ
ИХ ПОВЕРХНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ
ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ
С СУБНАНОСЕКУНДНЫМ ФРОНТОМ**

С.В. Барахвостов¹, М.Б. Бочкарев¹, Н.Б. Волков¹,
К.А. Нагаев¹, В.П. Тараканов², О.Р. Тимошенко¹,
С.И. Ткаченко³, Е.А. Чингина¹

¹Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Институт теплофизики экстремального состояния вещества
ОИВТ РАН, Москва, Россия

³Московский физико-технический институт государственный
университет, Долгопрудный, Россия

E-mail: nbv@ami.uran.ru, karat@tarak.msk.su,
svtk.mipt@gmail.com

Цель данной работы – экспериментальное исследование особенностей разрушения проводников микронного диаметра и генерации плазмы при распространении вдоль их поверхности высоковольтного импульса напряжения (ВИН) с субнаносекундным фронтом. В наших экспериментах генератор высоковольтных импульсов напряжения «РАДАН-220» (с волновым сопротивлением $Z_w = 50 \Omega$) разряжался на неоднородную коаксиальную линию (вакуумную камеру) длиной 15 см и диаметром 10 см. В центральную жилу линии включались медные ($d = 20 \div 300 \mu\text{m}$), никелевые ($d = 25 \mu\text{m}$) и вольфрамовые ($d = 24,5 \div 100 \mu\text{m}$) проводочки длиной $l = 5 \div 15 \text{ mm}$. Амплитуда зарядного напряжения формирующей линии генератора составляло $U_0 = 220 \text{ kV}$, а запасенная энергия – $w = 1 \text{ J}$. Длительность фронта генерируемого импульса составляла $\tau_f = 200 \div 500 \text{ ps}$. Давление в камере изменялось в пределах $P = 10^{-4} \div 760 \text{ Torr}$. Напряжение на входе камеры измерялось с помощью емкостного делителя, помещенного в вакуумное масло. Электрический ток в конце линии измерялся с помощью шунта, имеющего сопротивление $R_{sh} = 0,4 \Omega$ и полосу пропускания 5 GHz. Сигналы с делителя и шунта регистрировались четырехканальным цифровым осциллографом Tektronix с полосой пропускания 1 GHz. Кроме этого, производилась съемка собственного свечения канала разряда с помощью цифровых фотокамер Canon 450D и Canon 5D Mark II; его непрерывная развертка с помощью стрик-камер АГАТ «СФ-3М» и Cordin-173 и коаксиального фотоэлектронного диода (ФЭК) СПУ-22М; регистрация интегрального спектра и его непрерывная развертка с помощью спектрографа MS 257 и стрик-камеры Cordin-173.

Субнаносекундный фронт импульса напряжения, большие значения радиальной напряженности электрического поля на поверхности микропроводников ($E_r \geq 24 \text{ MV/cm}$ на проводочке с $d = 20 \mu\text{m}$ в разомкнутой на конце линии), а также сильная неоднородность линии, обусловленная большой разницей в отношениях диаметров центральной жилы и проводника к диаметру камеры, – отличительные особенности наших экспериментов. Показано, что разрушение микропроводников при распространении ВИН с $\tau_f < 1 \text{ ns}$ определяется

электродинамическими процессами, происходящими в их поверхностном слое и окружающем пространстве. Установлено существование интервала давления ($0,7 < P < 3,4$ Torr для медных проволочек с $d = 20$ μm), в котором микропроводники не разрушаются или разрушаются термомеханическими напряжениями. При $P > 3,4$ Torr в результате импульсного коронного разряда вокруг проволочек образуется плазменный канал, энергетический обмен с которым приводит к их разрушению. При $P \leq 0,7$ Torr проволочки разрушаются в результате «электродинамического взрыва» поверхностного слоя металла. Образующийся плазменный канал состоит из плазменной короны, плотного ядра – неидеальной плазмы и переходного слоя между ними, в которых наблюдаются вихревые и винтовые структуры, ярко светящиеся пятна, плазменные струи. Исследованы спектральные характеристики излучения плазменного канала. Показано, что спектр излучения в момент образования плазменной короны непрерывен. Наиболее интенсивные линии спектра меди (510,554; 515,324; 521,82) nm появляются ~ 3 ns после образования плазменной короны. По отношению интенсивностей этих линий спектра получена оценка температуры электронов: $T_e \sim 0,7$ eV.

Показано, что никелевые и вольфрамовые проводники микронного диаметра разрушаются аналогично.

Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект No. 10-08-00691-a), Президиума УрО РАН в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Вещество при высоких плотностях энергии» (проект No. 12-П-2-1005) и поддержки исследований молодых ученых и аспирантов (проект No. 11-2-НП-590).

MICROWIRES DESTRUCTION AND PLASMA GENERATION FEATURES DURING SUBNANOSECOND FRONT HIGH-VOLTAGE PULSES PROPAGATING ALONG THEIR SURFACE

S.V. Barakhvostov¹, M.B. Bochkarev¹, N.B. Volkov¹,
K.A. Nagayev¹, V.P. Tarakanov², O.R. Timoshenkova¹,
S.I. Tkachenko³, E.A. Chingina¹

¹Institute of Electrophysics UB RAS,
Yekaterinburg, Russia

²Institute of High Energy Densities JIHT RAS,
Moscow, Russia

³Moscow Institute of Physics and Technology
(State University), Dolgoprudny, Russia

E-mail: nbv@ami.uran.ru, karat@tarak.msk.su,
svtk.mipt@gmail.com

The main objective of the suggested work is the experimental investigation of the features of micron diameter conductors destruction and plasma generation by high-voltage pulse (HVP) with subnanosecond front propagating along their surface. In our experiments the high-voltage impulse generator «RADAN-220» (with characteristic impedance of 50 Ω) was discharged to the inhomogeneous 15 cm long and 10 cm internal diameter coaxial line (vacuum chamber). To the central conductor there were placed 5–15 mm long microwires of Cu (20–300 μm in diameter),

Ni (25 μm in diameter) and W (24.5–100 μm in diameter). The generators formation line charging voltage amplitude was $U_0 = 220$ kV, and stored energy – $w = 1$ J. Pulse rise duration τ_f was of about 200–500 ps. Pressure in the camera varied as $P = 10^{-4} \div 760$ Torr. The input voltage in the vacuum chamber was measured via the capacitance voltage divider installed into the vacuum oil. The electric current was measured via placed at the end of the line shunt with the impedance $R_{sh} = 0.4$ Ω and 5 GHz bandwidth. Signals from both shunt and divider were registered by the four-channel digital Tektronix oscilloscope with 1 GHz bandwidth. We also performed the integral survey of the discharge channel self glowing via the DSLR cameras Canon EOS 450D and Canon EOS 5D Mark II; its continuous sweep survey via the streak cameras AGAT «SF-3M» and Cordin-173, and photoelectron coaxial diode (PEC) PEC-22SPYM; integral spectrum registration and its streak images via the spectrograph MS 257 and the streak camera Cordin-173.

Subnanosecond voltage pulse rise, electric field radial strength at the microconductors surface high values ($E_r \geq 24$ MV/cm for the microwire with $d = 20$ μm for the open-ended line) and strong non-uniformity of the line, resulting from the huge difference between the diameters of the central core and conductor in respect to the vacuum chamber diameter – are peculiar properties of our experiments. It is shown that microconductors destruction during the HVP propagation with $\tau_f < 1$ ns is caused by the electrodynamic processes, arising within their surface layer and its vicinity. The existence of the pressures range ($0.7 < P < 3.4$ Torr for Cu microwires with $d = 20$ μm) where microconductors either do not destruct or are destructed via thermo-mechanical strains is revealed. At $P > 3.4$ Torr the plasma channel, resulting from the pulse corona discharge, is generated around the microwire and interacts with it, thus leading to its destruction. At $P \leq 0.7$ Torr microwires destruct due to the metal skin layer «electrodynamic explosion». The discharge channel has a complex structure: plasma corona, dense core – non-ideal plasma and a transitional layer in between, where vortex and helical structures, clear luminous spots and plasma jets are observed. Plasma channel emission spectral characteristics are investigated. It is shown that the emission spectrum at the moment of plasma crown formation is continuous. The most intense Cu spectral lines (510.554, 515.324, 521.82) nm, arise just about ~ 3 ns after the plasma crown was formed. Using the spectral lines intensities ratio was acquired the electron temperature evaluation: $T_e \sim 0.7$ eV.

It is shown that Ni and W micron-size conductors do destruct identically.

The work is carried out under partial financial support of the RFBR (project No. 10-08-00691-a), the Presidium of UB RAS within the program for basic research of the Presidium of RAS «Matter at high energy densities» (project No. 12-П-2-1005) and junior scientists and postgraduate students research support (project No. 11-2-НП-590).

3-38

**ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
НА ВЕРТИКАЛЬНУЮ СТРУКТУРУ
АККРЕЦИОННЫХ ДИСКОВ
МОЛОДЫХ ЗВЕЗД**

А.Е. Дудоров, С.А. Хайбрахманов

Челябинский государственный университет,
Челябинск, Россия

E-mail: khaibrakhmanovsa@gmail.com

Рассматривается задача о влиянии азимутального магнитного поля B_φ на толщину аккреционного диска. Предполагается, что B_φ компонента генерируется дифференциальным вращением из начального полоидального остаточного магнитного поля. $B_\varphi(r, z)$ находится решением стационарного уравнения индукции с учетом диффузии магнитного поля для различных зависимостей скорости вращения V_φ от координат. Из уравнения магнитоэлектростатического равновесия определяется эффективная магнитная шкала высоты, величина которой в значительной степени определяется граничными условиями. В работе рассматриваются два вида граничных условий: Дирихле и Неймана. Показывается, что в первом случае вертикальный профиль B_φ получается немонотонным: вблизи срединной плоскости градиент магнитного давления сжимает диск, а вблизи поверхности – приводит к его утолщению. Во втором случае B_φ монотонно увеличивается от срединной плоскости к поверхности диска, поэтому эффективная шкала высоты диска уменьшается.

**INFLUENCE OF MAGNETIC FIELD
ON VERTICAL STRUCTURE
OF ACCRETION DISKS OF YOUNG STARS**

A.E. Dudorov, S.A. Khaibrakhmanov

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: khaibrakhmanovsa@gmail.com

Effect of azimuthal magnetic field B_φ on the thickness of the accretion disk is investigated. It is assumed that B_φ is generated from initial poloidal fossil magnetic field due to differential rotation. $B_\varphi(r, z)$ is obtained analytically from stationary induction equation for different spatial dependence of rotation velocity V_φ taking into account magnetic field diffusion. Effective scale height of the accretion disk with magnetic field is determined from the solution of magnetostatic equilibrium equation and depends mainly on boundary conditions. Two types of boundary conditions are considered: Dirichlet and Neumann. It is shown that in first case vertical distribution of B_φ is non-monotonous and magnetic pressure gradient squeezes disk near the midplane while near the surface of the disk effective scale height is increased. In second case B_φ is increased monotonically from the midplane to the surface of the disk and effective scale height of the disk is decreased.

3-39

**ИСПАРЕНИЕ МЕТАЛЛА ПРИ МОЩНОМ
ЭЛЕКТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ
И КОНДЕНСАЦИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
НАНОЧАСТИЦ**

П.Н. Майер¹, А.Е. Дудоров¹, К.В. Хищенко²,
П.Р. Левашов², А.Е. Майер¹

¹Челябинский государственный университет,
Челябинск, Россия

²Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

E-mail: mayer@csu.ru, konst@ihed.ras.ru

Численно исследуется кинетика испарения металла при интенсивном электронном облучении и последующей конденсации металлических наночастиц. Металл рассматривается как двухфазная среда, состоящая на первом этапе эволюции из пузырьков пара в жидком металле, а на втором этапе – из жидких капель в парах металла. Динамика вещества описывается в рамках приближения односкоростного течения двухфазной гетерогенной среды. Образование и рост пузырьков пара и последующая эволюция жидких капель описывается при помощи уравнений кинетики фазовых переходов. Для описания термодинамического состояния перегретой жидкости и пересыщенного пара используются метастабильные широкодиапазонные уравнения состояния. Численные исследования показывают, что процесс испарения металла существенно влияет на последующую конденсацию наночастиц: жидкие капли металла остаются в парах металла при его неполном испарении. Далее эти наноразмерные капли становятся центрами конденсации и определяют размер и форму получившихся наночастиц.

**EVAPORATION OF METALS
UNDER THE POWERFUL ELECTRON
IRRADIATION AND CONDENSATION
OF METAL NANOPARTICLES**

P.N. Mayer¹, A.E. Dudorov¹, K.V. Khischenko²,
P.R. Levashov², A.E. Mayer¹

¹Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

²Joint Institute of High Temperatures RAS,
Moscow, Russia

E-mail: mayer@csu.ru, konst@ihed.ras.ru

Kinetics of metal evaporation under the powerful electron irradiation and following condensation of metal nanoparticles has been numerically investigated. Metal is treated as a two-phase medium consisting of vapor bubbles in liquid metal at first stage of evolution and of liquid drops in vapor at the second stage. Substance dynamics is described in approximation of one-velocity flow of the two-phase heterogeneous medium. Generation and growth of vapor bubbles and consequent evolution of drops are described by kinetics equations for phase transitions. Wide-range metastable equations of state are used for description of superheated liquid supersaturated vapor. Numerical investigation shows that kinetics of evaporation strongly

affects on the following condensation of nanoparticles: liquid drops remain in vapor at incomplete evaporations. These drops become the condensation centers and determine the number and size of forming nanoparticles.

3-40

**ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ
КВАЗИРАВНОВЕСИЯ ПЛАЗМЫ
И МАГНИТНОГО ПОЛЯ
В ЛОВУШКЕ-ГАЛАТЕЕ – «ПОЯС»**

Н.А. Чмыхова

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

E-mail: island.n@gmail.com

Магнитная ловушка «Пояс» – один из простейших примеров тороидальных ловушек-галатей для удержания плазмы с двумя токонесящими проводниками, погруженными в плазму [1]. Идеальная математическая модель равновесной конфигурации плазмы и поля в прямом цилиндрическом аналоге «Пояса» рассмотрена в работе [2]. Естественное требование изоляции проводников от плазмы связано с существованием тока в плазме обратного по отношению к проводнику направлению и не может быть выполнено в строго равновесных конфигурациях. В работе [3] показано, что изолированная плазменная конфигурация кольцевого сечения вокруг проводника может существовать в квазиравновесном режиме. Ее образование связано с возрастанием тока в проводнике в начале процесса формирования [4].

В докладе рассмотрена двумерная нестационарная МГД-задача о формировании аналогичной ситуации в распрямленной в цилиндр ловушке «Пояс». На короткой нестационарной стадии процесса ток в двух прямолинейных проводниках возрастает, в результате чего в плазме вблизи проводников возникает осевой ток обратного направления. Взаимодействуя с магнитным полем, он отжимает плазму от проводников в сторону сепаратрисы магнитного поля, где и формируется конфигурация с желаемыми свойствами. Затем наступает квазистационарная стадия с постоянным током в проводнике, на которой образовавшаяся конфигурация медленно (при высокой проводимости плазмы) разрушается вследствие слабой диффузии магнитного поля. Прослеживается тенденция к стягиванию основной массы плазмы к оси и магнитной изоляции проводников от омывающей их плазмы.

Работа поддержана РФФИ (проект №12-01-0071)

Литература

1. Морозов А.И., Франк А.Г. Тороидальная мультипольная ловушка-галатея с азимутальным током // Физ. плазмы, 1994. Т. 20. № 11. С. 982–989.
2. Брушлинский К.В., Игнатов П.А. Плазмостатическая модель магнитной ловушки «Галатея-пояс» // ЖВМиМФ, 2010. Т. 50. № 12. С. 2184–2194.
3. Брушлинский К.В., Чмыхова Н.А. О равновесии плазмы в магнитном поле ловушек-галатей // Матем. моделирование, 2010. Т. 22. № 6. С. 3–14.

4. Дудникова Г.И. и др. / Численное моделирование прямых плазменных конфигураций – галатей типа «Пояс». // Физика плазмы. 1997. Т. 23. № 5. С. 387–396.

**NUMERICAL MODEL OF FORMATION
OF PLASMA AND MAGNETIC FIELD
QUASI-EQUILIBRIUM
IN THE GALATHEA-TRAP «BELT»**

N.A. Chmykhova

Keldysh Institute of Applied Mathematics,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: island.n@gmail.com

Galathea-belt magnetic trap is one of the simplest examples of toroidal magnetic Galathea-traps with two current carrying wires immersed into plasma [1]. An ideal mathematical model of equilibrium plasma and magnetic field configuration in cylindrical analogue of «Belt» is examined in work [2]. A natural requirement of conductors to be isolated from plasma is caused by the existence of electric current inside the plasma opposite to that of the electric current inside the conductor. This requirement can't be fulfilled in strict equilibrium configurations. The work [3] shows that isolated plasma configuration in circular cross-section around conductor can exist in quasiequilibrium mode. The appearance of this effect is connected with the electric current increasing inside the conductor at the beginning of the formation process [4].

The report presents a two-dimensional time-dependent MHD problem of a similar situation formation in the Belt-trap straightened to a cylinder. In the short nonstationary phase of the process the electric current in two conductors increases, causing the opposite direction electric current in plasma around the conductors. By interacting with magnetic field, it pushes plasma from the conductors to the magnetic field separatrix, where the configuration with required properties is formed. The process is followed by quasistationary phase with constant current in the conductors, when the formed configuration is slowly (in conditions of high conductive plasma) distroying because of the weak magnetic field diffusion. There is a tendency of the main mass of plasma to contract to the axis and of conductors magnetic isolation from the plasma.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 12-01-0071)

References

1. Morozov A.I., Frank A.G. The toroidal multipole Galathea-trap with the azimuthal current // Fiz. Plazmy, 1994. Vol. 20. № 11. pp. 982–989.
2. Brushlinskii K.V., Ignatov, P.A. A Plasmastatic Model of the Galathea-Belt Magnetic Trap // Comp. Math. and Math. Physics, 2010. Vol. 50. № 12. pp. 2071–2081.
3. Brushlinskii K.V., Chmykhova N.A. Plasma Equilibrium in the Magnetic Field of Galathea-Traps // Math. Models and Comp. Simulations, 2011. Vol. 22. № 1. pp. 9–17.
4. Dudnikova G.I. et al. / Numerical simulation of direct plasma configurations of Galathea-Belt. // Plasma Physics. 1997. Vol. 23. № 5. pp. 387–396.

3-41

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ
EUV-ИЗЛУЧЕНИЯ С УЧЕТОМ
ДЕТАЛЬНОЙ НЕСТАЦИОНАРНОЙ
ПОУРОВНЕВОЙ КИНЕТИКИ,
ВКЛЮЧЕННОЙ IN-LINE В Г/Д РАСЧЕТ**

Д.А. Ким, В.Г. Новиков,
Г.В. Долголева, А.Д. Соломянная

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

E-mail: dima83ipm@yandex.ru

Построена и реализована модель нестационарной неравновесной излучающей плазмы с учетом поуровневой кинетики и переноса излучения в спектральных линиях [1–2]. При моделировании разлета мишени использовались уравнения двухтемпературной газодинамики в лагранжевой форме для случая одномерной геометрии [3]. Поле излучения и поуровневая кинетика учитывались самосогласованным образом с детализацией в EUV-области. Вероятности радиационных и столкновительных процессов, входящие в систему уравнений поуровневой кинетики, рассчитаны на основе атомных данных, полученных с помощью программы FAC. Спектральные коэффициенты поглощения и излучения вычислялись по программе THERMOS.

Проведены расчеты эффективности конверсии источников EUV-излучения (Extreme Ultra-Violet) на основе плазмы лития и олова. Для этого рассмотрена задача разлета и излучения плазменной мишени в результате воздействия лазерным импульсом. В качестве мишеней рассматривались капельки лития и олова с радиусом 0,01 см. Вычисления проводились для CO₂-лазера (длина волны 10,6 мкм) в широком диапазоне параметров импульса с интенсивностью на пике мощности $I_0 = 10^9 \div 10^{12}$ Вт/см², с длительностью импульса $dt = 5 \div 50$ нс.

Данная задача имеет важное прикладное значение для EUV-литографии, применяемой при производстве микрочипов. Полученные результаты для эффективности конверсии CE при оптимальных параметрах для лития (CE ~ 1%) и для олова (CE ~ 5%) близки к экспериментальным данным [4].

Литература

1. Ким Д.А., Новиков В.Г., Соломянная А.Д., Моделирование перегретой литиевой плазмы применительно к задачам разработки источника ЭУФ-излучения, Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, No. 3, 2009, 26 с.
2. Novikov V.G., Koshelev K.N., Solomyannaya A.D., Radiative unresolved spectra atomic model, Physics of Extreme States of Matter, Chernogolovka, 2010, p. 21–24.
3. Долголева Г.В. Методика расчета движения двухтемпературного излучающего газа (СНД) // Вопросы атомной науки и техники, Сер. «Методики и программы численного решения задач математической физики», 1983, Вып 2(13), С. 29–33.
4. George S.A., Silfvast W.T., Takenoshita K. et al., Comparative extreme ultraviolet emission measurements for lithium and tin laser plasmas, Optics Letters., 32(8), 997–999 (2007).

**DETAILED NONSTATIONARY LEVEL KINETICS
IN-LINE INCLUDED
INTO GASDYNAMIC CALCULATIONS
AND EUV-SOURCES MODELING**

D.A. Kim, V.G. Novikov,
G.V. Dolgoleva, A.D. Solomyannaya

Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, Russia

E-mail: dima83ipm@yandex.ru

The model of nonstationary non-equilibrium radiative plasma with account of level kinetics and radiative transport in spectral lines was constructed and realized [1–2]. Two-temperature 1D Lagrangian form equations of gasdynamics were used for modeling of target explosion [3]. Level kinetics and radiation field were accounted self-consistently with detalization in EUV-range. Probabilities of radiative and collisional processes included in the level kinetics were calculated on the basis of atomic data produced by the code FAC. Absorption and emission coefficients were calculated by using the code THERMOS.

The efficiency of extreme ultra-violet (EUV) sources based on lithium and tin laser plasma was estimated. The droplets with radius of 0.01 cm were used as targets. Calculations for CO₂-laser (wavelength 10.6 μm) were carried out in a wide range of pulse parameters with peak intensity $I_0 = 10^9 \div 10^{12}$ W/cm² and pulse duration $dt = 5 \div 50$ ns.

The result has a significant value for EUV-lithography used in microchip production. It was obtained for efficiency (CE) of extreme ultra-violet source at optimal parameters for lithium (CE ~ 1%) and tin (CE ~ 5%) and it is close to experimental data [4].

References

1. Kim D.A., Novikov V.G., Solomyannaya A.D., Modeling of overheated lithium plasma for EUV-source developing, Preprint of the Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, 2009, No. 3, 26 p.
2. Novikov V.G., Koshelev K.N., Solomyannaya A.D., Radiative unresolved spectra atomic model, Physics of Extreme States of Matter, Chernogolovka, 2010, p. 21–24.
3. Dolgoleva G.V., Method of two-temperature radiative gasdynamic calculations (SND), Problems of Atomic Science and Technology, Methods and Codes for the Numerical Solution of Problems of Mathematical Physics, 1983, 2(13), p. 29–33.
4. S.A. George, W.T. Silfvast, K. Takenoshita et al., Comparative extreme ultraviolet emission measurements for lithium and tin laser plasmas, Optics Letters., 2007, 32(8), p. 997–999.

3-42

**РАСЧЕТ СЕЧЕНИЙ ФОТОИОНИЗАЦИИ
МНОГОЭЛЕКТРОННЫХ ИОНОВ
МЕТОДОМ ИСКАЖЕННЫХ ВОЛН**

А.С. Королев, П.А. Лобода

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: a.s.korolev@vniitf.ru

Проведено вычисление сечений фотоионизационного поглощения атомов и ионов в полностью реляти-

вистской постановке методом искаженных волн. Расчеты выполнялись с помощью программного пакета FAC (Flexible Atomic Code) [1]. Описано аномальное поведение парциальных сечений фотоионизации $3p$ - и $3d$ -оболочек меди и криптона, которое проявляется в наличии минимумов на порогах фотоионизации и (или) экстремумов за ними. Реализована методика расчета автоионизационных резонансов в спектре фотоионизационного поглощения и рассмотрено влияние учета взаимодействия конфигураций и переходов высших мультипольностей на резонансную структуру. Расчеты подтвердили вывод более ранней работы [2] о том, что резонансные процессы могут вносить определяющий вклад в полную скорость фотоионизации излучением широкополосного источника многоэлектронных ионов со средними и малыми Z . Это может оказаться существенным при построении моделей кинетики неравновесной ионизации в поле излучения внешнего рентгеновского источника. Выполнены детальные расчеты спектральной непрозрачности магния, меди и золота при нулевой и ненулевой температурах. Проведено сравнение с экспериментальными и расчетными данными других авторов.

Литература

1. Gu M.F., *Astrophysical Journal*, 582, 1241 (2003).
2. Nilsen J. et al., *Phys. Rev. A.*, 38, 4 (1988).

CALCULATION OF PHOTOIONIZATION CROSS-SECTIONS OF MULTI-ELECTRON IONS BY USING THE DISTORTED-WAVE APPROXIMATION

A.S. Korolev, P.A. Loboda

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

E-mail: a.s.korolev@vniitf.ru

We performed the calculations of photoionization cross-sections of atoms and ions in fully relativistic formulation in the distorted-wave approximation by using the FAC (Flexible Atomic Code) atomic package [1]. Anomalous behavior of partial photoionization cross-sections of copper and krypton $3p$ - and $3d$ -shells featuring minima at the photoionization thresholds and (or) extremums after it was described. A method to calculate autoionization resonances in the photoionization absorption spectra was implemented and the configuration-interaction and higher-multipole-transition effects on the resonant structure were analyzed. The results agreed well with a previously obtained conclusion [2] that the effect of resonant processes can completely dominate photoionization rates of ions with low and intermediate Z . This effect may be important for the models of non-LTE ionization kinetics in the radiation field of an external X-ray source. We also made detailed spectral-opacity calculations for magnesium, copper, and gold at zero and non-zero temperatures. The results were compared to other experimental and theoretical data.

References

1. Gu M.F., *Astrophysical Journal*, 582, 1241 (2003).
2. Nilsen J. et al., *Phys. Rev. A.*, 38, 4 (1988).

РЕГИСТРАЦИЯ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ФРОНТА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ С ТЕОРЕТИЧЕСКИМ ОБОСНОВАНИЕМ И ДЕМОСТРАЦИОННЫМИ ПРИМЕРАМИ

Ю.И. Малахов¹, М.Я. Иванов², Н.К. Ши¹, В.В. Щаулов²

¹Московский энергетический институт (технический университет), Москва, Россия

²Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва, Россия

E-mail: yumalakhov@yandex.ru; ivanov@ciam.ru

Выполнены экспериментальные исследования зависимости скорости и формы электромагнитного фронта модулируемого лазерного импульса от температуры. Модулируемый лазерный импульс создавался в лабора-торных условиях с помощью газоразрядного He-Ne лазера ЛГН-207А, работающего на длине волны $\lambda = 632,8$ нм с выходной мощностью 1,3 мВт, и электрооптического модулятора МЛ-102А. Модулируемый импульс распространялся в воздушной среде в полый металлической трубе, нагреваемой до температуры 550 К. Исходный импульс делительным оптическим кубиком разделялся на два равных по мощности световых пучка – эталонный и изучаемый, которые затем регистрировались лавинными фотодиодами ЛФД-2-А с подачей сигналов на двухканальный осциллограф GDS-840. Фиксировался временной сдвиг при прохождении исследуемого фронта импульса через нагретую полую трубу длиной 1,5 м, а также выполнялось сравнение формы фронта исследуемого импульса с формой фронта эталонного луча. Основным итогом работы является регистрация заметного превышения скорости $2,997 \cdot 10^8$ м/с скоростью фронта измеряемого импульса, проходящего через нагретую среду.

Для теоретического объяснения наблюдаемого явления использована математическая модель излучающего теплопроводного газа, подробно изложенная в работе [1]. В заключение доклада приводится ряд конкретных примеров, которые могут служить дополнительными экспериментальными подтверждениями наличия обнаруженного эффекта (в частности, работа [2]).

Литература

1. Иванов М.Я. Термодинамически согласованные законы сохранения в модели излучающего теплопроводного газа. *Журн. выч. матем. и матем. физики*, 2011, т. 51, № 1, с. 7, 142–151.
2. Заволоков Е.В., Замураев Д.О., Зубков А.А. и др. Экспериментальное исследование мощного широкополосного сверхсветового источника ЭМИ. X Забабахинские научные чтения, Снежинск, 2010, РФЯЦ – ВНИИТФ, Сборник тезисов, с. 132.

REGISTRATION OF TEMPERATURE DEPENDENCE FOR ELECTROMAGNETIC FRONT VELOCITY WITH TEORETICAL SUPPORT AND DEMONSTRATION EXAMPLES

Y.I. Malakhov¹, M.Ja. Ivanov², N.Q. Shi¹, V.V. Schaulov²

¹Moscow Power Energy Institute (Technical University),
Moscow, Russia

²Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russia
E-mail: yumalakhov@yandex.ru; ivanov@ciam.ru

We present the special experiment results on the temperature dependence for velocity propagation of electromagnetic front. Modulated laser impulse is created in laboratory conditions by gas charge He-Ne laser LGN-207A on wave length $\lambda = 632.8$ nm with the exit power 2 MW. Modulated impulse propagates in an air medium in hollow metal tube of circular cross section with temperature up to 550 K. Initial impulse was divided on two rays by optical prism and after these rays were registries the two laving photodiodes LFD-2-A with signal transfer on two channel oscilloscope GDS-710042. The time shift is fixed for ray fronts, which propagated in hot hollow metal tube with length 1.5 m. Also the form of laser fronts changing was fixed. The main results of this study are marked exceed of velocity value $2.997 \cdot 10^8$ m/s for electromagnetic front, which went from the hot tube. The velocity propagation of electromagnetic front was increasing with temperature growth.

The last part of the talk discusses theoretical explanation of registered effects with using the mathematical modeling [1]. Also we present some additional experimental confirmation of these phenomena (in particular, experimental data in [2].

References

- Ivanov M.Ja. Thermodynamically compatible conservation laws in the model of heat conduction radiating gas. *Comp. Math. And Math. Phys.*, Vol. 51, No. 1, 2011, pp. 133–142.
- Zavolokov E.V., Zamuraev D.O., Zubkov A.A. et al. Experimental study of powerful wide-band superlighter souce. 10th Zababakhin Scientific Talks. RFNC – VNIITF, March 15–19, 2010, pp. 132–133.

3-44

ВОЗДЕЙСТВИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ

Н.А. Скоркин¹, Н.Р. Садыков²

¹Снежинский физико-технический институт –
НИЯУ МИФИ, Снежинск, Россия

²Филиал Южно-Уральского государственного университета,
Снежинск, Россия

E-mail: n.a.scorkin@rambler.ru, n.r.sadykov@rambler.ru

Исследована зависимость плотности тока от ширины переднего фронта амплитуды переменного (высокочастотного) поля при различных значениях постоянного (или нестационарного) поля. Получена зависимость усиленного СВЧ-излучения в 2-миллиметровом диапазоне от продольной координаты. Исследована

задача по генерации субмиллиметрового излучения при воздействии на систему параллельно ориентированных углеродных нанотрубок (УНТ) двухчастотного углекислотного лазерного излучения (CO₂-лазер) при наличии постоянного (или нестационарного) поля. Показана возможность использования свободно ориентированных параллельных друг другу УНТ.

EFFECT OF STATIONARY ELECTRIC FIELD TO CARBON NANOTUBES

N.A. Scorkin¹, N.R. Sadykov²

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

²Branch of the South Ural State University,
Snezhinsk, Russia

E-mail: n.a.scorkin@rambler.ru, n.r.sadykov@rambler.ru

The dependence of current density on the width of the amplitude leading front of variable field at different values of stationary field is investigated. The dependence of amplified microwave emission in 2-mm range on longitudinal coordinate is obtained. The problem of submillimeter emission generation at effect on the system of parallel-oriented carbon nanotubes by CO₂ based at presence of static field is investigated. The possibility of using freely oriented parallel carbon nanotubes is shown

3-45

ПОТОК ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ, ТОК СМЕЩЕНИЯ И ЯВЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ В ФИЗИЧЕСКОМ ВАКУУМЕ С НЕНУЛЕВОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ

В.К. Мамаев, М.Я. Иванов

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

E-mail: vad.mamaev@yandex.ru; ivanov@ciam.ru

Регистрация равновесной температуры физического вакуума $T = 2,735$ К при наличии характерной скорости распространения возмущений в вакууме $c = 2,998 \cdot 10^8$ м/с позволяет с помощью физической теории размерности [1] оценить массу m частиц этого вакуума [2]. Для этого достаточно постоянную Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ кг (м/с)²/К умножить на известную температуру T и поделить на квадрат характерной скорости c и получить оценку $m \sim kT/c^2 = 4,25 \cdot 10^{-40}$ кг. Аккуратное вычисление [2] дает величину массы частицы $m = 5,6 \cdot 10^{-40}$ кг. Наличие тока смещения и явление поляризации в физическом вакууме позволяет постулировать структуру указанной частицы в форме диполя [3].

В соответствии со сказанным для физического вакуума, обладающего характерной температурой и характерной скоростью распространения возмущений (скоростью света), имеем четкое физическое представление для потока электромагнитной энергии (вектора Умова–Пойтинга), тока смещения Максвелла и явления поляризации (в частности, дано наглядное объяснение динамическому эффекту Казимира [4]). В докладе

изложены эти представления и приведена расширенная система уравнений электродинамики Максвелла для свободного пространства. Приводятся соответствующие выражения для тензора электромагнитного поля и расширенных преобразований Лоренца.

Литература

1. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1967, 428 с.
2. Ivanov M.Ja. Accurate Dark Matter Theory and Exact Solutions. Sources and Detection of Dark Matter and Dark Energy in the Universe. Fourth International Symposium, Marina del Rey, CA, USA. ed by D. B. Cline. Springer, 2001, pp. 281–289.
3. Ivanov M.Ja. Dark Matter Quo Vadis? 13th ICATPP Conference on Astroparticle, Particle, Space Physics, Detectors for Physics Applications. Vila Olmo, October 2011, p. 68.
4. Wilson C.M. and oth. Observation of the Dynamical Casimir Effect in a Superconducting Circuit. ArXiv:1105.4714v1.

ELECTROMAGNETIC ENERGY FLUX, DISPLACEMENT CURRENT AND POLARIZATION IN PHYSICAL VACUUM WITH NON ZERO TEMPERATURE

V.K. Mamaev, M.Ja. Ivanov

Central Institute of Aviation Motors (CIAM), Moscow, Russia

E-mail: vad.mamaev@yandex.ru; ivanov@ciam.ru

Modern physics experimental results give the accurate value of cosmic background radiation temperature $T = 2.735$ K. It is extremely important to underline, that the registration of this temperature allows estimating in the case of thermodynamic equilibrium the space particle mass m from the physical dimensional theory [1]. Using the Boltzman's constant $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ kg(m/s)²/K and space perturbation velocity $c = 2.998 \cdot 10^8$ m/s we can obtain $m \sim kT/c^2 = 4.25 \cdot 10^{-40}$ kg. More accurate estimation [2] gives $m = 5.6 \cdot 10^{-40}$ kg. The presence of a displacement current and polarization of physical vacuum allows postulating of this particle structure as typical dipole [3].

As stated, for perfect vacuum with the specific temperature and specific disturbance velocity (light velocity) we have clear physical presentation of the electromagnetic energy flux (the Umov–Pointing vector), of the Maxwell displacement current and polarization phenomenon (in particular, Kazimir's dynamic effect [4] has been explained). These ideas are given in the report and expanded equation system of Maxwell's electrodynamics for free space. The respective aspects for extended Lorentz's transformation are shown.

References

1. Sedov L.I. Methods of similarity and dimension in mechanics. M., «Nauka», 1967, 428 p.
2. Ivanov M.Ja. Accurate Dark Matter Theory and Exact Solutions. Sources and Detection of Dark Matter and Dark Energy in the Universe. Fourth International Symposium, Marina del Rey, CA, USA. ed by D. B. Cline. Springer, 2001, pp. 281–289.
3. Ivanov M.Ja. Dark Matter Quo Vadis? 13th ICATPP Conference on Astroparticle, Particle, Space Physics, Detectors for Physics Applications. Vila Olmo, October 2011, p. 68.
4. Wilson C.M. and oth. Observation of the Dynamical Casimir Effect in a Superconducting Circuit. ArXiv:1105.4714v1.

УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УСКОРЕННЫХ ИОНОВ ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРНЫХ МИШЕНЕЙ

Е.А. Говрас^{1,2}, В.Ю. Быченков¹

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

²ФГУП ВНИИ автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

E-mail: egovras@lebedev.ru

Активное развитие современной лазерной техники позволяет создавать сверхвысокие плотности энергии с помощью фемто- и пикосекундных лазерных импульсов ультрарелятивистской интенсивности 10^{20} – 10^{22} Вт/см². Взаимодействие столь сильных импульсов с мишенями различного агрегатного состояния и состава богато практически значимыми применениями. Одно из них – получение пучков ускоренных частиц: электронов и ионов. Перспективным вариантом мишеней для ускорения ионов выступают тонкие (субмикронные) фольги двухкомпонентного ионного состава, содержащие легкие, хорошо ускоряемые ионы, выступающие в роли примеси, и тяжелые ионы с большим зарядом, составляющие остов мишени [1] и создающие ускоряющее поле. Тяжелые ионы при этом, двигаясь позади, действуют как кулоновский поршень, «подталкивая» легкие ионы и улучшая их спектральные характеристики.

После прохождения фемтосекундного лазерного импульса при достаточно высокой его интенсивности происходит почти мгновенная ионизация атомов мишени и выброс практически всех электронов из мишени. При этом, последующий разлет в вакуум возникшей в фокальном пятне заряженной плазмы может быть достаточно хорошо описан моделью кулоновского взрыва. В данной работе в рамках этого механизма мы проанализировали одномерный разлет двухкомпонентной мишени для двух возможных начальных распределений примесных ионов по объему мишени: однородное распределение и слой примеси с постоянной плотностью, характеризуемый заданными малой толщиной и заглублением в мишень. Тяжелые ионы полагались распределенными однородно по толщине фольги. В такой постановке мы ставили своей целью нахождение таких значений управляющих параметров, которые обеспечивали бы наилучшие характеристики ускоряемых пучков, таких как спектральная ширина, максимальная энергия и число ускоренных частиц, содержащихся в заданной малой спектральной ширине.

Так, для слоя примеси внутри мишени было установлено, что существует оптимальная позиция такая, что при помещении слоя в это положение возможно до нескольких раз уменьшить спектральную ширину ускоряемых пучков по сравнению с произвольной позицией слоя внутри мишени. Также был указан диапазон управляющих параметров, в котором существует необходимость располагать слой примеси в глубине мишени, а не использовать хорошо известный вариант напыле-

ния примеси на задний край мишени. Для однородного распределения было найдено оптимальное значение полного заряда примеси, позволяющие увеличить долю легких ионов, содержащихся в 1% спектральном диапазоне, до 30–50%.

Литература

1. Popov K.I., Bychenkov V.Yu., Rozmus W., Ramunno L., *Physics of Plasmas*, 17, 083110 (2010).

OPTIMIZATION OF TWO-COMPONENT LASER TARGETS PARAMETERS LEADING TO THE IMPROVEMENT OF ACCELERATED IONS CHARACTERISTICS

E.A. Govras^{1,2}, V.Yu. Bychenkov¹

¹P.N. Lebedev Physics Institute, Moscow, Russia

²VNIIA, Moscow, Russia

E-mail: egovras@lebedev.ru

Ultra-high energy densities are available nowadays due to remarkable progress in laser technologies allowing one to produce high quality femtosecond laser pulses with ultra-relativistic intensities 10^{20} – 10^{22} W/cm². Interactions of such pulses with different targets open new ways to interesting practical applications, for example, production of bunches of high-energy electrons and ions. One of the promising type of the targets for laser-triggered ion acceleration is ultra-thin two-component foil consisting of light well-accelerated impurity ions and heavy ones which provide an accelerating electric field [1]. In such target heavy ions will act like a Coulomb piston, moving behind accelerated light impurity and improving its spectral characteristics.

Under action of laser pulse with relativistically high intensity the target will be ionized very quickly and electrons will be removed from the focal spot of the foil. The model of Coulomb explosion is well appropriate for description of subsequent plasma expansion and light ion acceleration. Using this model we analyze one-dimensional expansion of two-ion-species plasma foil for two possible initial distributions of impurity ions: homogeneous ion distribution and thin layer with constant density of given thickness and positioning inside the foil. Meanwhile, heavy ions are supposed to be distributed uniformly. In our study we seek for such values of target controlling parameters which provide best ion bunch characteristics, such as spectral width, maximum energy and number of particles within given spectral width. Thus, for embed layer exists optimal position inside the foil which helps us to decrease bunch spectral width as compared with arbitrary positioning. Also we pointed up the range of main controlling parameters where implantation of impurity inside the foil has great advantages in comparison with a well-known alternative of impurity layer set near rear surface of the target. As for the homogeneous distribution we obtained optimal value of full impurity charge using of which increases part of impurity ions inside the 1% spectral range to 30–50%.

This work was supported by RFBR.

Reference

1. Popov K.I., Bychenkov V.Yu., Rozmus W., Ramunno L., *Physics of Plasmas*, 17, 083110 (2010).

3-47

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРОВ ПРОТОНОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ТОНКИХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МИШЕНЕЙ НА УСТАНОВКЕ СОКОЛ-П

О.Г. Котова, И.В. Глазырин,
А.В. Карпеев, С.Н. Щербаклова

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: ogkotova@vniitf.ru

В экспериментах по ускорению протонов при взаимодействии пикосекундного лазерного импульса интенсивностью $\sim 10^{19}$ Вт/см² на установке СОКОЛ-П с тонкими твердотельными мишенями [1] были получены зависимости спектров частиц от поляризации импульса. Численное моделирование позволило определить зависимость вклада в спектр каждого из 2-х механизмов ускорения протонов: TNSA (Target Normal Sheath Acceleration) на тыльной стороне мишени и RPA (Radiation Pressure Acceleration) на фронтальной стороне. Получено, что протоны достигают наибольших энергий при эквивалентном вкладе в ускорение обоих механизмов. Получена зависимость спектров протонов от поляризации лазерного импульса, а также от материала и толщины мишени.

Литература

1. Сафронов К.В. и др. Экспериментальные исследования ускорения протонов из тонких фольг, облучаемых пикосекундными лазерными импульсами с круговой и линейной поляризацией // Тезисы XI Международной конференции «Забабахинские научные чтения», 2012.

NUMERICAL SIMULATION OF PROTON SPECTRA FROM THIN SOLID TARGET ON SOKOL-P LASER

O.G. Kotova, I.V. Glazyrin,
A.V. Karpeev, S.N. Shcherbakova

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

E-mail: ogkotova@vniitf.ru

Proton spectra depending on pulse polarization have been obtained in particles acceleration experiments performed at Sokol-P laser. In these experiments picoseconds laser pulse of 10^{19} W/cm² intensity interacts with thin solid targets [1]. Numerical simulation has been used to determine the main acceleration mechanisms: TNSA (Target Normal Sheath Acceleration) in rear side of target or RPA (Radiation Pressure Acceleration) on front side. It has been calculated that protons reach the highest energy under the equivalent action of both mechanisms. The dependence of spectrum profile from laser polarization and target material and thickness has been obtained also.

Reference

1. Safronov K.V. et al. Experimental investigations of proton acceleration from thin foils irradiated picoseconds laser pulses of circle and linear polarization // Book of Abstracts of XI ZST, 2012.

3-48

**ОПТИМИЗАЦИЯ ГАЗОВЫХ МИШЕНЕЙ
ДЛЯ УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ И ПРОТОНОВ
В ЭКСПЕРИМЕНТАХ
НА 20 ТВт ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ СОКОЛ-П**

Г.В. Байдин, В.А. Лыков, Д.В. Торшин

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: d.v.torshin@vniitf.ru

В последние годы во всем мире привлекают повышенное внимание эксперименты и теоретические исследования лазерного ускорения заряженных частиц. Актуальность таких исследований обусловлена возможными практическими приложениями в науке и технике [1–3].

В РФЯЦ – ВНИИТФ создана и успешно эксплуатируется 20 ТВт лазерная установка СОКОЛ-П, которая обеспечивает энергию лазерного излучения на мишени $E \sim 10\text{--}20$ Дж при длительности импульса $\tau \sim 0,7\div 1$ пс и размере пятна $d \sim 5\div 10$ мкм [4]. Ускорение протонов до высоких энергий при облучении тонких фольг короткими импульсами накладывает довольно жесткие требования на контраст лазерного излучения, поэтому представляет интерес проведение исследований ускорения ионов при облучении мишеней в виде газовых струй или малоплотных пен (аэрогелей), которые могут быть менее чувствительными к контрасту.

С использованием математических программ LegoLPI и Mandor [5] проведена оптимизация параметров газовых мишеней для достижения максимальных энергий и эффективности генерации заряженных частиц в экспериментах на 20 ТВт пикосекундной установке СОКОЛ-П. Показано, что в этих экспериментах максимальная энергия и КПД для электронов могут составить 100–200 МэВ и $\eta_e \sim 10\%$ соответственно при интенсивности лазерного излучения $I \sim 5 \cdot 10^{19}$ Вт/см². Двумерные расчеты указывают на возможность достижения в этих экспериментах энергии и КПД протонов $E_p \sim 30\div 50$ МэВ и $\eta_p \sim 5\%$ соответственно. Для реализации ожидаемых параметров пучков ускоренных частиц необходимо обеспечить формирование однородных водородных струй диаметром ~ 1 мм с концентрацией молекул на оси газа $\sim 2 \cdot 10^{19}$ см⁻³ при достаточно крутых (~ 200 мкм) градиентах плотности газа.

Литература

1. Mourou G.A., Tajima T., Bulanov S.V., Rev. Mod. Phys. 78, 309 (2006)
2. Pukhov A., Rep. Prog. Phys. 66, 47 (2003)
3. Ledingham K.W.D., Galster W., New Journal of Physics 12, 045005 (2010)
4. Safronov K.V., Vikhlyaev D.A., Vladimirov A.G., Gavrilov D.S., Gorokhov S.A., Kakshin A.G., Loboda E.A., Lykov V.A., Mochicheva E.S., Potapov A.V., Pronin V.A., Saprykin V.N., Tolstoukhov P.A., Chefonov O.V., Chizhkov M.N. JETP Lett. 88, 716 (2008).
5. D.V. Romanov et.al. PhysRevLett Vol 93, 21, 215004 (2004).

**OPTIMIZATION OF GAS TARGETS FOR
ACCELERATION OF ELECTRONS AND PROTONS
IN EXPERIMENTS
ON THE 20 TW SOKOL -P LASER FACILITY**

G.V. Baidin, V.A. Lykov, D.V. Torshin

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

E-mail: d.v.torshin@vniitf.ru

In recent years, the scientific community of the world shows great interest to experiments and theoretical investigations into laser acceleration of charged particles. Relevance of such studies is conditioned by potential practical applications in science and engineering [1–3].

RFNC – VNIITF has built and successfully uses the 20 TW SOKOL-P laser facility with the laser radiation energy $E \sim 10\div 20$ J on the target at pulse duration $\tau \sim 0.7\div 1$ ps and spot size $d \sim 5\div 10$ μm [4]. Proton acceleration up to high energies when thin foils are irradiated by short pulses imposes rather severe requirements to the contrast of laser radiation, therefore of interest are studies of ion acceleration when we irradiate targets in the form of gaseous jets or low-density foams (aerogels) as they can be less sensitive to the contrast.

Mathematical codes LegoLPI and Mandor [5] were used to optimize the gas target parameters in order to achieve maximum energies and efficiency of charged particles generation in experiments on the 20 TW picosecond SOKOL-P facility. In these experiments, the maximum energy and efficiency for electrons was shown to achieve 100–200 MeV and $\eta_e \sim 10\%$, respectively, at laser radiation intensity $I \sim 5 \cdot 10^{19}$ BWcm².

2D calculations indicate that in these experiments, energy and efficiency of protons $E_p \sim 30\text{--}50$ MeV and $\eta_p \sim 5\%$, respectively, are quite attainable. In order to realize the expected parameters of accelerated particle beams, we need uniform hydrogen jets having the ~ 1 -mm diameter with molecules concentrated on the gas axis $\sim 2 \cdot 10^{19}$ cm⁻³ at rather steep gradients of gas density.

References

1. Mourou G.A., Tajima T., Bulanov S.V., Rev. Mod. Phys. 78, 309 (2006)
2. Pukhov A., Rep. Prog. Phys. 66, 47 (2003)
3. Ledingham K.W.D., Galster W., New Journal of Physics 12, 045005 (2010)
4. Safronov K.V., Vikhlyaev D.A., Vladimirov A.G., Gavrilov D.S., Gorokhov S.A., Kakshin A.G., Loboda E.A., Lykov V.A., Mochicheva E.S., Potapov A.V., Pronin V.A., Saprykin V.N., Tolstoukhov P.A., Chefonov O.V., Chizhkov M.N. JETP Lett. 88, 716 (2008).
5. D.V. Romanov et.al. PhysRevLett Vol 93, 21, 215004 (2004).

3-49

**ИЗМЕРЕНИЕ ВЫХОДА
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МИШЕНЕЙ,
ОБЛУЧАЕМЫХ УЛЬТРАКОРОТКИМИ
ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ
С ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ДО 10^{19} Вт/см²**

Д.А. Вихляев, В.И. Афонин, Д.С. Гаврилов,
А.Г. Какшин, Е.А. Лобода, А.В. Потапов,
К.В. Сафронов, П.А. Толстоухов

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия
E-mail: dep5@vniitf.ru

При взаимодействии высокоинтенсивного лазерного излучения (ЛИ) ультракороткой длительности с твердотельной мишенью в тонком слое на поверхности мишени образуется горячая и плотная плазма, которая является ярким источником рентгеновского излучения (РИ). Абсолютные измерения спектров РИ в широком спектральном диапазоне дают важную информацию, как о параметрах плазмы, так и о нестационарных процессах, протекающих в ней. Кроме того, интенсивное ультракороткое ЛИ может использоваться для создания плазменных рентгеновских источников в прикладных целях [1, 2].

На 20 ТВт пикосекундной лазерной установке СОКОЛ-П [3] проведены измерения спектров непрерывного РИ в диапазоне энергий квантов 0,04–80 кэВ при интенсивностях ЛИ $I \sim 10^{17}$ – 10^{19} Вт/см² из Al, Cu и Ag мишеней, толщиной 780 нм, 1,2 мм и 200 мкм соответственно.

Для регистрации двумерных изображений излучающей области лазерных мишеней на установке СОКОЛ-П применялся рентгеновский микроскоп по схеме Киркпатрика-Баеза [4]. Микроскоп позволял получать одновременно снимки с разрешением $\delta \approx 2$ мкм в четырех узких областях энергий рентгеновских квантов диапазона 0,3–1,5 кэВ.

Измерение спектра РИ в диапазоне энергий 0,04–0,3 кэВ производилось с помощью спектрографа на основе пропускающей дифракционной решетки и рентгеновской ПЗС-камеры PI-SX:400. Спектрограф позволял получать непрерывную развертку рентгеновского спектра в указанном диапазоне.

В интервалах энергий 0,6–4,5 и 25–80 кэВ измерение непрерывного спектра проводилось рентгеновскими спектрометрами, описанными в [5] и [6] соответственно.

Спектр РИ в интервале энергий 0,04–0,3 кэВ плавно спадает с увеличением энергии РИ. Конверсионная эффективность η (отношение энергии РИ в диапазоне 0,04–0,3 кэВ к энергии лазерного излучения) при интенсивности ЛИ $\sim 10^{18}$ Вт/см² для Al мишеней $\eta \sim 1,3 \cdot 10^{-3}$ 1/ср, для Cu – $\eta \sim 2,0 \cdot 10^{-3}$ 1/ср и для Ag – $\eta \sim 3,4 \cdot 10^{-3}$ 1/ср.

По наклону спектра РИ в диапазоне энергий 0,6–4,5 кэВ была определена температура плазмы $T_e \sim 0,4$ – $0,6$ кэВ. Конверсионная эффективность в данном диапазоне при интенсивности ЛИ $\sim 10^{18}$ Вт/см²

для Al – $\eta \sim 2,6 \cdot 10^{-4}$ 1/ср, Cu – $\eta \sim 4,5 \cdot 10^{-4}$ 1/ср и Ag – $\eta \sim 5,76 \cdot 10^{-4}$ 1/ср.

Температура быстрых электронов, определенная по наклону спектра жесткого РИ в диапазоне 25–80 кэВ, изменяется от $T_{hot} = 34$ кэВ при $I = 9,8 \cdot 10^{17}$ Вт/см² до 68 кэВ при $I = 1,2 \cdot 10^{19}$ Вт/см². По зависимости T_{hot} от интенсивности ЛИ можно сделать вывод, что основным механизмом генерации горячих электронов при I равной 10^{17} – 10^{19} Вт/см² на установке СОКОЛ-П является резонансное поглощение.

Литература

1. Gibbon P., Forster E., Short-pulse laser plasma interactions // Plasma Phys. Control. Fusio, 1996, 38, 769–793.
2. Gibbon P., Short pulse laser interaction with matter // World Scientific Pub Co Inc. 2005.
3. Andriyash A.V., Vikhlyayev D.A., Gavrilo D.S. et al. The spectral-angular distribution measurements of fast protons from the rear side of a target in experiments on the SOKOL-P facility at laser intensity of 10^{19} W/cm². In abstracts of 50th APS-DPP 2008. Bulletin of the American Physical Society, 53, № 14, p.153.
4. Вихляев Д.А., Гаврилов Д.С., Какшин А.Г. и др. Рентгеновский четырехканальный микроскоп для исследования плазмы на лазерной установке СОКОЛ-П // Квантовая электроника, 2011, 41 (3), 234–238.
5. Вихляев Д.А., Гаврилов Д.С., Елисеев М.В. и др. Спектрометр мягкого рентгеновского излучения на основе сферических зеркал полного внешнего отражения для исследования плазмы на лазерной установке СОКОЛ-П // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2010, вып. 2, с. 69–75.
6. Гаврилов Д.С., Сапрыкин В.Н., Толстоухов П.А. и др. Исследование спектра тормозного и характеристического излучения лазерных мишеней, облучаемых ультракороткими лазерными импульсами при интенсивностях до $\sim 10^{19}$ Вт/см² // Физика плазмы, 2011, том 37, № 10, с. 928–933.

**MEASUREMENT OF X-RAY RADIATION
OF THE TARGETS IRRADIATED
BY ULTRA-SHORT LASER PULSES
WITH INTENSITY UP TO 10^{19} W/Cm²**

D.A. Vikhlyayev, V.I. Afonin, D.S. Gavrilo,
A.G. Kakshin, E.A. Loboda, A.V. Potapov,
K.V. Safonov, P.A. Tolstoukhov

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

When high-intensity laser (LR) of ultra-short duration interacts with a solid target, hot and dense plasma, which is a bright X-radiation source, is formed in a thin layer at the target surface. Absolute measurements of the X-radiation spectra in a wide spectrum range give important information both about plasma parameters, and about unsteady processes running in it. Besides, intensive ultra-short LR can be used to build plasma X-ray sources for applied purposes [1, 2].

The 20 TW picosecond facility SOKOL-P [3] was used for measuring X-radiation spectra in quantum energy range 0.04–80 keV with LR intensity $I \sim 10^{17}$ – 10^{19} W/cm² out from the Al, Cu, and Ag targets with the thickness of 780 nm, 1,2 mm, and 200 μ m, respectively.

In order to register 2D images of irradiating region of laser targets, facility SOKOL-P used X-ray microscope according to Kirkpatrick–Baez scheme [4]. The microscope

permitted simultaneous images with resolution $\delta \approx 2 \mu\text{m}$ in four narrow regions of X-ray quantum energy within 0.3–1.5 keV.

Measurement of the X-radiation spectrum over the 0.04–0.3 keV energy range was performed with the help of a spectrograph based on the transmitting diffraction grating and CCD-camera PI-SX:400. The spectrograph permitted the continuous sweep of X-spectrum in the mentioned range.

In the interval S of energies 0.6–4.5 keV and 25–80 keV, measurement of continuous spectrum was performed by X-ray spectrometers described in [5] and [6], respectively.

The X-radiation spectrum in energy interval 0.04–0.3 keV smoothly drops with X-radiation energy increase. Conversion efficiency η (ratio of X-radiation energy in the range 0.04–0.3 keV to LR energy) at LR intensity $\sim 10^{18} \text{ W/cm}^2$ for Al targets is $\eta \sim 1.3 \cdot 10^{-3} \text{ 1/sr}$, for Cu targets is $\eta \sim 2.0 \cdot 10^{-3} \text{ 1/sr}$ and for Ag targets is $\eta \sim 3.4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/sr}$.

According to X-radiation spectrum slope in energy range 0.6–4.5 keV, plasma temperature $T_e \sim 0.4\text{--}0.6 \text{ keV}$ was determined. Conversion efficiency in this range at LR intensity $\sim 10^{18} \text{ W/cm}^2$ for Al is $\eta \sim 2.6 \cdot 10^{-4} \text{ 1/sr}$, for Cu is $\eta \sim 4.5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/sr}$ and for Ag is $\eta \sim 5.76 \cdot 10^{-4} \text{ 1/sr}$.

Temperature of fast electrons determined by rigid X-radiation spectrum in the range 25–80 keV changes from $T_{hot} = 34 \text{ keV}$ at $I = 9.8 \cdot 10^{17} \text{ W/cm}^2$ up to 68 keV at $I = 1.2 \cdot 10^{19} \text{ W/cm}^2$. According to dependence T_{hot} on LR intensity, it is possible to make a conclusion that the main mechanism of hot electrons generation I equal to $10^{17}\text{--}10^{19} \text{ W/cm}^2$ on facility SOKOL-P is resonance absorption.

References

1. Gibbon P., Forster E. Short-pulse laser plasma interactions // Plasma Phys. Control. Fusio, 1996, 38, 769–793.
2. Gibbon P., Short pulse laser interaction with matter // World Scientific Pub Co Inc. 2005.
3. Andriyash A.V., Vikhlyayev D.A., Gavrilov D.S. et al. The spectral-angular distribution measurements of fast protons from the rear side of a target in experiments on the SOKOL-P facility at laser intensity of 10^{19} W/cm^2 . In abstracts of 50th APS-DPP 2008. Bulletin of the American Physical Society, 53, № 14, p.153.
4. Vikhlyayev D.A., Gavrilov D.S., Kakshin A.G. et al. X-ray four-channel microscope for studying plasma on laser facility SOKOL-P // Kvantovaya elektronika, 2011, 41 (3), 234–238.
5. Vikhlyayev D.A., Gavrilov D.S., Eliseev M.V. et al. Spectrometer of soft X-radiation based on spherical mirrors of complete external reflection for studying plasma on laser facility SOKOL-P // VANT. ser. Termoyadernaya sintez, 2010, issue 2, c. 69–75.
6. Gavrilov D.S., Saprykin V.N., Tolstoukhov P.A. et al. Investigation of spectrum of bremsstrahlung and characteristic radiation of laser targets irradiated by ultra-short pulses at intensities up to $\sim 10^{19} \text{ W/cm}^2$ // Fizika plazmy, 2011, v. 37, #10, p. 928–933.

3-50

ИЗМЕРЕНИЕ ВЫХОДА НЕЙТРОНОВ РЕАКЦИИ $\text{Li}^7(p, n)\text{Be}^7$ В ЛИФ МИШЕНИ, ОБЛУЧАЕМОЙ ПУЧКОМ ПРОТОНОВ, УСКОРЕННЫХ УЛЬТРАКОРОТКИМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ

П.А. Толстоухов, Д.А. Вихляев, Д.С. Гаврилов,
С.А. Горохов, А.Г. Какшин, А.В. Липин, Е.А. Лобода,
В.А. Лыков, Е.С. Мокичева, С.Н. Пахомов,
А.В. Потапов, К.В. Сафронов, Д.В. Торшин

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

В докладе представлены результаты экспериментов по генерации нейтронов в (p, n) реакциях под действием быстрых протонов, ускоряемых пикосекундным лазерным импульсом из тонких алюминиевых фольг. Эксперименты проведены на 30 ТВт установке СОКОЛ-П при интенсивности лазерного излучения на мишени $10^{18}\text{--}10^{19} \text{ Вт/см}^2$. Для генерации нейтронов на пути пучка протонов устанавливалась вторичная мишень – пластина из фторида лития. Выход нейтронов определялся двумя независимыми способами: по измерениям наведенной активности вторичной мишени и методом затянутой регистрации. Максимальный зарегистрированный выход нейтронов превысил 10^8 шт. Проведенные исследования позволили восстановить конверсию лазерного излучения в быстрые протоны $\sim 5\%$.

NEUTRON YIELD MEASUREMENTS AT $\text{Li}^7(p, n)\text{Be}^7$ REACTION IN LIF TARGET IRRADIATED BY PROTON BEAM ACCELERATED BY ULTRA-SHORT LASER PULSE

P.A. Tolstoukhov, D.A. Vikhlyayev, D.S. Gavrilov,
S.A. Gorokhov, A.G. Kakshin, A.V. Lipin, E.A. Loboda,
V.A. Lykov, E.S. Mokicheva, S.N. Pakhomov,
A.V. Potapov, K.V. Safronov, D.V. Torshin

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

The presentation covers the results of experiments on neutron generation in the (p, n) reactions under the influence of fast protons accelerated from thin aluminum foils by a picosecond laser pulse. The experiments were made on the 30 TW SOKOL-P facility at laser radiation intensity $10^{18}\text{--}10^{19} \text{ W/cm}^2$ at the target. A secondary target – a lithium fluoride plate – was placed in the path of the proton beam to generate neutrons. Neutron yield was derived by two independent methods: measuring the induced activity of the secondary target, and the dragged registration method. The maximum recorded neutron yield exceeded 10^8 . The performed research made it possible to restore the conversion of laser radiation into fast protons $\sim 5\%$.

3-51

**ЛАЗЕР НА ОСНОВЕ ПЛАСТИНЧАТОГО
АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА
С ЗИГЗАГООБРАЗНЫМ ХОДОМ ПУЧКА
С ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТЬЮ БОЛЕЕ 100 Вт**

А.Д. Ляшедько, В.Ф. Серегин, В.Б. Цветков

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

E-mail: lyashedko@mail.ru

Одной из основных задач при создании твердотельных лазерных систем высокой средней мощности является задача охлаждения активной среды. При использовании активных элементов (АЭ) традиционной цилиндрической формы существуют значительные трудности, связанные с генерацией излучения с расходимостью, близкой к дифракционному пределу. Для более эффективного охлаждения активной среды может использоваться дисковая или пластинчатая геометрия активного элемента. Зигзагообразный ход пучка в пластинчатом активном элементе позволяет уменьшить влияние термооптических эффектов на расходимость лазерного пучка. Использование зигзагообразного хода пучка позволяет компенсировать фазовые искажения, связанные с градиентом температуры между охлаждаемыми поверхностями кристалла (плоскости полного внутреннего отражения – ПВО).

В работе исследовался лазер на основе композитно-пластинчатого элемента Nd:YAG с торцевой диодной накачкой. Проведено изучение потерь в активном элементе, показано, что большое влияние на потери оказывает выбор покрытия на плоскостях ПВО кристалла. При использовании в качестве защитного покрытия полимера СИЭЛ потери на одно полное внутреннее отражение при зигзагообразном ходе пучка составили порядка 0,4–0,7%.

Проведено исследование влияния тепловой линзы на эффективность генерации в случае неоднородного распределения излучения накачки в сечении активного элемента. Действие линзы проявляется при переходе от импульсного режима накачки к непрерывному. При длительности импульса накачки меньшего по сравнению с временем тепловой релаксации $t = 0,2$ сек, линза не оказывает влияния на выходные характеристики. Но при длительности импульсов накачки сравнимых с t , возникающая объемная тепловая линза оказывает сильное влияние на эффективность генерации.

В случае использования более однородного профиля накачки в сечении активного элемента, получена непрерывная лазерная генерация. Достигнута выходная мощность генерации 10⁵ Вт с дифференциальной эффективностью 36% при 4¹⁰ Вт поглощенной мощности накачки.

**ZIGZAG SLAB LASER WITH OUTPUT POWER
MORE THAN 100 W**

A.D. Lyashedko, V.F. Seregin, V.B. Tsvetkov

Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia

E-mail: lyashedko@mail.ru

One of the main problem in creating solid-state laser systems with high average output power is the problem of active media cooling. When using traditional cylindrical active elements (AE), there are significant difficulties associated with the lasing with a divergence close to the diffraction limit. For more efficient cooling of the active media can be used disk [1] or slab [2] geometry of the active element. Zigzag beam path allow to reduce the influence if thermo optic effects on the laser beam divergence. Using zigzag beam path allow to compensate phase distortion associated with temperature gradient between the cooled surface of the crystal (the plane of the total internal reflections – TIR).

In our work end pumped laser based on composite slab Nd:YAG active element was under investigation. The study of the losses in active element shown that a large impact on the loss has a choice of TIR coating. When using as a protective coating polymer SIEL, loss on the one total internal reflection in zigzag path was about 0.4–0.7%. Investigation of the influence of the thermal lens on lasing efficiency in case of non-uniform distribution of pump radiation in slab cross-section was done. The action of the lens appears in the transition from pulse mode to continuous pumping. Then the pump pulse duration smaller then the thermal relaxation time $\tau_T \sim 0.2$ s, the lens has no effect on the output characteristics. But when the pump pulse duration comparable to τ_T , volumetric thermal lens has a strong influence on laser efficiency. In the case of a homogeneous pump profile in the slab cross-section, was obtained a continuous lasing. Laser output power was about 10⁵ W with a slope efficiency of 36% at 4¹⁰ W of absorbed pump power.

References

1. Giesen A., Speiser J., IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, v. 13, No.3, 435–448, 2007.
2. Eggleston J.M., Kane T.J., Kuhn K. // J. Unterhahner, R.L. Byer, IEEE J. Quantum Electron QE-20, p. 289, 1984.

3-52

**СИСТЕМА КОГЕРЕНТНОГО СЛОЖЕНИЯ
ИЗЛУЧЕНИЯ ИТТЕРБИЕВЫХ
ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ**

А.И. Трикшев, А.С. Курков, В.Б. Цветков,
Ю.Н. Пырков, Е.М. Шолохов

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

E-mail: trikshv_gpi@mail.ru

Нами продемонстрирована установка когерентного сложения лазерных пучков на основе модифицированного интерферометра Маха-Цендера, где по одному плечу распространяется опорное излучение, а по другому

усиленное излучение рабочих каналов. В качестве задающего генератора служит одночастотный полупроводниковый лазер с распределенной брэгговской решеткой, излучение которого усиливается с помощью иттербиевого волоконного усилителя. Затем излучение с помощью волоконных ответвителей разделяется на 8 каналов. Один канал выделяется как опорный. Остальные семь усиливаются волоконными иттербиевыми усилителями. Излучение рабочих каналов выходит из коллиматоров, упакованных в виде шестигранника. Излучение опорного канала после выхода из коллиматора расширяется телескопом до необходимого диаметра. Отраженное от делительной пластины излучение рабочих каналов и излучение опорного канала поступают на приемные коллиматоры. Далее излучение идет на волоконные фотодетекторы. Сигналы с фотодетекторов поступают в систему синхронного детектирования. Тактовый генератор подает синусоидальное напряжение на фазовый модулятор опорного канала и прямоугольные импульсы той же частоты на синхронный детектор. По форме интерференционного сигнала, поступающего с фотодетекторов, система отслеживает отклонение фазы рабочего канала от фазы опорного канала. Для выравнивания фаз система подает соответствующие напряжения на пьезокерамические управляющие элементы. Таким образом, предложенная схема контроля и управления фазой излучения рабочих каналов обеспечивает синфазность излучения лазерных каналов, необходимую для когерентного сложения.

COHERENT BEAM COMBINATION OF YTTERBIUM-DOPED FIBER LASERS

A.I. Trikshev, A.S. Kurkov, V.B. Tsvetkov,
Y.N. Pyrkov, E.M. Sholokhov

Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia
E-mail: trikshev_gpi@mail.ru

We have demonstrated coherent beam combination system based on modified Mach-Zehnder interferometer. At the same time reference beam propagate on one channel and amplified radiation beam on another. Single-frequency semiconductor laser with fiber Bragg gating was used as seed laser. The laser power is spitted into eight channels and coupled to eight phase modulators. One channel was used as reference channels. Another seven channel (work channels) coupled in ytterbium doped fiber amplifiers. The laser beams from the fiber amplifiers are space coupled via six collimators. The laser beam from the reference channel was expanded by telescope to the required diameter. Reference beam and reflected beams was combined by a mirror to receiving collimators. Further, the light enters the fiber photodetectors. Signals from photodetectors enter the simultaneous detector system. Clock generator formed sin-pulses for work channel phase modulators and square pulses for simultaneous detector. The system monitors the difference between phase of work channel and reference channel by form of the photodiode signal. For correct phase this system sends a particular level voltage to phase modulators. Thus, the proposed concept of monitor and

control phase of the working channels provides phase synchronism of the laser channels that necessary for coherent combination.

3-53

НЕПРЕРЫВНЫЕ И ИМПУЛЬСНЫЕ ГОЛЬМИЕВЫЕ ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ, РАБОТАЮЩИЕ В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ ОТ 2 ДО 2,1 мкм

Е.М. Шолохов¹, А.С. Курков¹, А.В. Маракулин²

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
Москва, Россия

²Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Создание источников лазерного излучения двухмикронного диапазона является одной из актуальных задач современной лазерной физики. Одним из возможных путей построения таких лазеров является использование в качестве активной среды волокна, легированного ионами гольмия Ho^{3+} . Ионы гольмия в кварцевом стекле имеют переход ${}^5\text{I}_7 \rightarrow {}^5\text{I}_8$, который может быть использован для получения лазерной генерации на длине волны 2 мкм. Лазеры на основе волокон, легированных ионами Ho^{3+} , излучают в диапазоне 2–2,15 мкм и представляют интерес для применения в лазерной локации, оптической связи по воздуху и медицине.

В данной работе рассматриваются разработки эффективных гольмиевых волоконных лазеров, работающих как в непрерывном режиме генерации, так и в режиме модуляции добротности. Нами впервые были реализованы полностью волоконные гольмиевые лазеры, работающие в непрерывном режиме, с накачкой от иттербиевого лазера с мощностью до 5 Вт и диапазоном генерации 2–2,15 мкм. При этом квантовая эффективность таких лазеров составила 34% [1]. Насколько мы знаем, полученные значения являются самыми высокими для кварцевого волокна, легированного ионами гольмия. Кроме того, нами была показана возможность реализации гольмиевого волоконного лазера, работающего в непрерывном режиме, с выходной мощностью 10 Вт и дифференциальной эффективностью 30% [2].

В рамках разработки импульсных гольмиевых волоконных лазеров нами была предложена и реализована схема гольмиевого волоконного лазера с модуляцией добротности на основе волоконного насыщающегося поглотителя, в качестве которого использовался отрезок высококонцентрированного гольмиевого волокна [3, 4, 5]. В резонатор лазера был помещен отрезок гольмиевого волокна с высокой концентрацией ионов гольмия (примерно $3,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$), длина которого составила 1,5 м. В этом случае постоянная обратная связь была сильно подавлена и генерация осуществлялась за счет входной брэгговской решетки и динамической обратной связи, обусловленной ВРМБ. В такой конфигурации лазера был реализован импульсный режим работы, при котором длительность импульса составила 20 нс при частоте повторения 38 кГц, при этом энергия в импульсе составила 43 мкДж, а пиковая мощность 2 кВт.

В настоящее время активно ведутся исследования в области импульсных волоконных лазеров двухмикронного диапазона. Данная тема представляет большой интерес и является актуальной в области волоконной оптики.

Литература

1. A.S. Kurkov, E.M. Sholokhov, O.I. Medvedkov, V.V. Dvoyrin, Yu.N. Pyrkov, V.B. Tsvetkov, A.V. Marakulin, and L.A. Minashina. Holmium fiber laser based on the heavily doped active fiber // *Laser Physics Letters*, 6 (9), pp. 661–664 (2009).
2. A. S. Kurkov, V. V. Dvoyrin, and A. V. Marakulin. All-fiber 10 W holmium lasers pumped at $\lambda = 1.15 \mu\text{m}$ // *Optics Letters*, 35 (4), pp. 490–492 (2010).
3. E.M. Sholokhov, A.V. Marakulin, A.S. Kurkov, and V.B. Tsvetkov. All-fiber Q-switched holmium laser // *Laser Physics Letters*, 8 (5), pp. 382–385 (2011).
4. А.С. Курков, Е.М. Шолохов, А.В. Маракулин, Л.А. Минашина. Влияние концентрации активных ионов на эффективность генерации гольмиевых волоконных лазеров // *Квантовая электроника*, 40 (5), стр. 386–388 (2010).
5. A.S. Kurkov, E.M. Sholokhov, A.V. Marakulin, and L.A. Minashina. Dynamic behavior of laser based on the heavily holmium doped fiber // *Laser Physics Letters*, 7 (8), pp. 587–590 (2010).

CONTINUOUS AND PULSED HOLMIUM FIBER LASERS MEDIUM POWER OPERATING IN THE TWO MICRON SPECTRAL RANGE (2–2.1 μm)

E.M. Sholokhov¹, A.S. Kurkov¹, A.V. Marakulin²

¹Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

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

Development of laser sources of two micron spectral range is one of important problems of modern laser physics. One of possible ways to design such lasers is the use of silica holmium doped fiber as the active medium. Holmium ions in silica glass have a transition $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ which can be used for obtain laser radiation at wavelength of 2 microns. Lasers on the basis of the Ho-doped fiber operating in a range of 2–2.15 micron and thus lasers are of interest for application in a laser location, optical communication through the air and medicine.

In this paper considered the development of effective holmium fiber lasers operating in continuous mode lasing and Q-switched mode. For the first time we have developed all-fiber Holmium lasers operating in continuous mode pumped by an ytterbium laser with a output power up to 5 watts and a range of generation 2–2.15 micron. The slope efficiency of these lasers was 34% [1]. As we know the obtained values are the highest for the silica holmium doped fiber. In addition we showed the implementation of holmium fiber laser operating in continuous mode, with an output power of 10 W and slope efficiency 30% [2].

As part of the development of pulsed holmium fiber laser we proposed a scheme for Q-switched holmium fiber laser where highly concentrated holmium fiber was used as saturable absorber [3, 4, 5]. In the laser cavity was placed holmium fibers with high concentrations of holmium ions (about $3.5 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$), whose length was 1.5 m. In this case continuous feedback is strongly suppressed and lasing is provided by the input Bragg grating and dynamic

feedback caused by stimulated Brillouin scattering. In this laser configuration has been realized pulsed mode of operation in which the pulse duration was 20 ns at a repetition frequency of 38 kHz, with pulse energy was 43 mJ and the peak power of 2 kW.

At present actively conducting research in the field of pulsed fiber lasers. It is of great interest and is relevant in the field of fiber optics.

References

1. A.S. Kurkov, E.M. Sholokhov, O.I. Medvedkov, V.V. Dvoyrin, Yu.N. Pyrkov, V.B. Tsvetkov, A.V. Marakulin, and L.A. Minashina. Holmium fiber laser based on the heavily doped active fiber // *Laser Physics Letters*, 6 (9), pp. 661–664 (2009).
2. A. S. Kurkov, V. V. Dvoyrin, and A. V. Marakulin. All-fiber 10 W holmium lasers pumped at $\lambda = 1.15 \mu\text{m}$ // *Optics Letters*, 35 (4), pp. 490–492 (2010).
3. E.M. Sholokhov, A.V. Marakulin, A.S. Kurkov, and V.B. Tsvetkov. All-fiber Q-switched holmium laser // *Laser Physics Letters*, 8 (5), pp. 382–385 (2011).
4. А.С. Курков, Е.М. Шолохов, А.В. Маракулин, Л.А. Минашина. Влияние концентрации активных ионов на эффективность генерации гольмиевых волоконных лазеров // *Квантовая электроника*, 40 (5), с. 386–388 (2010).
5. A.S. Kurkov, E.M. Sholokhov, A.V. Marakulin, and L.A. Minashina. Dynamic behavior of laser based on the heavily holmium doped fiber // *Laser Physics Letters*, 7 (8), pp. 587–590 (2010).

3-54

ФОРМИРОВАНИЕ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАЗМОНАПОЛНЕННОМ СТЕРЖНЕВОМ ПИНЧ-ДИОДЕ

С.А. Сорокин

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

E-mail: s.sorokin@rambler.ru

В докладе представлены экспериментальные исследования, направленные на формирование точечного радиографического рентгеновского источника на основе плазмонаполненного стержневого пинч-диода (ПНСП). ПНСП диод имеет значительно более низкий импеданс, чем вакуумный стержневой пинч-диод, что позволяет работать при более высоком токе пучка электронов и, следовательно, получать более высокую дозу излучения. Импеданс ПНСП диода определяется плотностью инжектированной в область диода плазмы, а в качестве драйвера такого диода могут быть использованы низкоимпедансные (от долей Ом до единиц Ом) генераторы на водяных формирующих линиях, разработанные ранее и применяемые в экспериментах по сжатию плазменных лайнеров (Z-пинчей).

Эксперименты выполнялись на генераторе МИГ (1 МВ, 1,5 МА, 80 нс) в Институте сильноточной электроники СО РАН. Так как водяные формирующие линии генератора имеют отрицательную полярность центрального электрода (в связи с так называемым эффектом полярности), и кончик анодного стержня направлен в сторону генератора, то вывод излучения производился в радиальном направлении. В эксперименте были определены формы анодного кончика, при которых

источник излучения имеет точечную форму при наблюдении в радиальном направлении, а, также, показано, что изгибание анодного стержня не изменяет существенно совокупность физических процессов, завершающихся формированием электронного диода около анодного кончика. Для укорочения длительности импульса излучения и увеличения амплитуды импульса напряжения на диоде плазма инжектировалась также в межэлектродный зазор перед областью ПНСП диода. Электронный пучок в диоде и источник рентгеновского излучения имели следующие параметры: энергия электронов 1–1,8 МэВ, ток диода 0,4–1 МА, доза излучения в 1 м от диода 2–4 рад (вольфрамовый анодный стержень, LiF термолюминисцентный детектор за экраном из алюминия толщиной 5 мм), длительность импульса излучения 10–30 нс, размер источника излучения 0,5–1,1 мм.

FORMATION OF A POINT-LIKE X-RAY SOURCE IN A PLASMA-FILLED ROD-PINCH DIODE

S.A. Sorokin

Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

E-mail: s.sorokin@rambler.ru

An experimental study of a point-like radiographic X-ray source based on plasma-filled rod-pinch (PFRP) diodes and low-impedance high-current generators is presented. A PFRP diode operates at considerably lower impedance than the vacuum rod-pinch (RP) diode, allowing higher currents and, hence, higher X-ray doses to be produced. Due to the low impedance of the PFRP diodes the high current generators developed earlier for Z-pinch experiments can be used as drivers for these diodes.

Experiments were performed on the MIG generator (1 MV, 1.5 MA, 80 ns) at the Institute of High Current Electronics, SB, RAS. As the water-insulated pulse-forming lines of the MIG generator are charged negatively and the anode rod tip is facing toward the generator transmission line, the X-ray radiation is extracted in the radial direction. The anode rod shapes have been found in the experiments for which a point-like X-ray source appropriate for off-axis radiography is produced. It has been shown that bending the anode rod has an insignificant effect on the physical processes responsible for the formation of an electron diode near the anode tip. In the experiment, plasma was also injected into the anode–cathode gap upstream of the plasma-filled rod-pinch diode to increase the duration of the initial short-circuit phase and to provide voltage gain and pulse sharpening. The electron beam formed in the PFRP diode and the X-ray source had the following parameters: The electron energy was 1–1.8 MeV, the diode current 0.4–1.0 MA, the X-ray dose at 1 m from the source was 2–4 rad (tungsten rod anode, LiF thermoluminescent dosimeter behind a 5-mm-thick aluminum screen), the X-ray pulse duration ranged from 10 to 30 ns and the spot size from 0.5 to 1.1 mm.

3-55

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ С ВЕЩЕСТВОМ

А.Я. Лейви, А.П. Яловец

Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

E-mail: yalovets@physicon.susu.ac.ru

Обработка материалов интенсивными (с плотностью потока мощности более 10 кВт/см²) потоками плазмы с целью изменения физических или химических свойств поверхности обрабатываемого объекта является одним из важных вопросов материаловедения. Плазменная обработка имеет разностороннее применение. Плазменная обработка приводит к увеличению прочности материала, уменьшает шероховатость поверхности материала, улучшает адгезию покрытия с подложкой, используется для легирования поверхности.

Результат обработки материала зависит от множества факторов таких, как термодинамические свойства материала, длительность воздействия, параметры плазмы (скорость, плотность, температура, состав), исходное состояние поверхности обрабатываемого материала, тип материала и др., причем модификация свойства при изменении одного параметра при неизменных остальных может носить нелинейный характер. С практической точки зрения важно определение оптимальных для модификации режимов обработки.

В работе рассматривается численное моделирование упругопластических течений среды в двумерной цилиндрической геометрии под воздействием компрессионных плазменных потоков (КПП), плотность вложенной энергии порядка 10⁶–10⁸ Вт/см², температура плазмы $T = 1$ –3 эВ.

Математическая модель взаимодействия плазменных потоков с веществом включает в себя (для мишени) совместное решение уравнений механики сплошных сред (МСС) с широкодиапазонными уравнениями состояния. Динамика плазменного потока описывается в рамках двухтемпературной одножидкостной модели. В плазме учтены процессы фоторекомбинации, фотоионизации, тормозного излучения.

Данный подход позволяет рассчитать динамику плазменного потока, его ионизационный состав, температуру ионной и электронной составляющей, а также динамику вещества обрабатываемого плазменными потоками.

На основе разработанной модели в работе исследуются механизмы передачи энергии от КПП твердому телу. Целью данных исследований являлось установление доли энергии плазменного потока, которая передается твердому телу, соотношения между радиационным и тепловым потоками энергии, а также нахождение распределения потока энергии по поверхности мишени.

THE SIMULATION OF THE COMPRESSION PLASMA FLOW INTERACTION WITH SUBSTANCE

A.Ya. Leyvi, A.P. Yalovets

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: yalovets@physicon.susu.ac.ru

The treatment by intensive plasma flows with power density 10 kW/cm^2 to improve physical or chemical surface material properties is one of the most important materials technology problems. The plasma treatment has many applications. It results in material hardening, reduces roughness, improves adhesion for systems with covering and is used for alloying.

The treatment effect depends on many factors such as thermodynamic material properties, pulse duration, plasma parameters (velocity, density and composition), initial surface state of target, kind of material substance and others. Moreover the changing of one material characteristic at constant others can be nonlinear. For practical purposes the determination of optimal modification regimes is very important.

We consider the numerical calculation of plasto-elastic material flow in axisymmetric cylindrical geometry at treatment by compression plasma flows (CPF). The plasma power density absorbed by the target is $10^6\text{--}10^8 \text{ W/cm}^2$, plasma temperature T is 1–3 eV.

The mathematical model of the interaction of plasma flows and substance includes the continuum mechanics equations with wide-range equation of state. The plasma dynamics is described by one fluid two-temperature model. Slowing-down radiation, photo-ionizing and photorecombining changes are taken into account.

This approach lets calculate dynamics plasma flow, its ionization composition, ion and electron temperature as well as material dynamics at the treatment.

Using developed model the mechanisms of the energy transfer from plasma to material have been investigated. The aim of the research is determination the energy portion which transfers from plasma to target, the correlation between radiation and heat energy fluxes and the surface distribution of energy flux.

Облучение электронами приводит к существенному изменению свойств диэлектрика, в том числе, к изменению электропроводности и накоплению заряда. Облучаемый материал обогащается свободными носителями заряда за счет термализации быстрых заряженных частиц и генерации пар электрон-дырка. Моделирование процесса радиационного заряжения диэлектриков важно как для понимания физических аспектов явления, так и для технологических приложений.

Важную роль в кинетике зарядов в облучаемом диэлектрике играют ловушки – локализованные состояния электронов и дырок в запрещенной зоне, связанные с различными дефектами структуры диэлектрика. Наиболее полно кинетика зарядов описывается уравнениями модели Роуза-Фаулера. В существующих работах [1, 2] данная модель реализована без учета дрейфа электронов в электрическом поле.

В настоящем докладе представлена реализация модели Роуза-Фаулера с учетом дрейфа электронов при неоднородном по объему мишени поле облучения. Проведены сравнения с экспериментальными данными и расчетами других авторов, свидетельствующие о работоспособности предложенного метода решения. Так же были проведены расчеты, позволившие получить интерпретацию и других экспериментальных результатов.

Литература

1. Радиационные эффекты в полимерах. Электрические свойства / А.В. Ванников, В.К. Матвеев, В.П. Сичкарь, А.П. Тютнев. М.: Наука, 1982. 272 с.
2. Диэлектрики и радиация: Диэлектрические свойства полимеров в полях ионизирующих излучений / А.П. Тютнев, В.С. Саенко, Е.Д. Пожидаев, Н.С. Костюков. М.: Наука, 2005. 453 с.

DYNAMICS OF CHARGE IN DIELECTRIC UNDER THE ELECTRON IRRADIATION

A.A. Ebel¹, A.E. Mayer², A.P. Yalovets^{1,3}

¹South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia

²Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

³Institute of Electrophysics, Russian Academy of Sciences, Ural Branch, Yekaterinburg, Russia

E-mail: ebel_aa@rambler.ru

Irradiation by electrons leads to substantial change of the dielectric properties, including the change of conductivity and the charging. Irradiation increases the concentration of free charge carriers due to the thermalization of fast particles and the generation of electron-hole pairs. Simulation of the dielectric charging by the electron radiation is important for understanding of physical aspects of this phenomenon and for the technological applications as well.

The traps (the electron and hole states localized in forbidden zone and connected with different defects of structure of the dielectric) play an important role in the charge carriers' kinetics. The Rouse-Fowler model describes the charge carriers' kinetics most completely. This model had been realized without taking into account of the charge carriers drift in electric field in the existing works [1, 2].

The realization of the Rouse-Fowler model is presented in paper with taking into account of charge carriers' drift in conditions of the not uniform irradiation field in the

3-56

ДИНАМИКА ЗАРЯДА В ДИЭЛЕКТРИКЕ ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

А.А. Эбель¹, А.Е. Майер², А.П. Яловец^{1,3}

¹Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия,

²Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

³Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: ebel_aa@rambler.ru

target bulk. The comparisons with the experimental data and with the other authors' calculations are presented and testify the availability of the proposed solution method. Performed simulations allow interpreting of the some other experimental results as well.

References

1. Vannikov A.V., et. al. Radiac. eff. v polimerakh. Electr. sv-va. – M.: Nauka, 1982, p. 272 (in Russian).
2. Tyutnev A.P., et. al. Dielectr. sv-va polimerov v poliakh ioniz. izlutch. – M.: Nauka, 2005, p. 453 (in Russian).

3-57

СТРУКТУРА И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЕННОГО КАНАЛА, ОБРАЗОВАННОГО ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ВДОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ МИКРОПРОВОДНИКОВ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИМПУЛЬСА НАПРЯЖЕНИЯ С СУБНАНОСЕКУНДНЫМ ФРОНТОМ

С.В. Баракхвостов¹, М.Б. Бочкарев¹, Н.Б. Волков¹,
К.А. Нагаев¹, В.П. Тараканов²,
С.И. Ткаченко³, Е.А. Чингина¹

¹Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Институт теплофизики экстремального состояния вещества
ОИВТ РАН, Москва, Россия

³Московский физико-технический институт (университет),
Долгопрудный, Россия

E-mail: nbv@ami.uran.ru, karat@tarak.msk.su,
svtk.mipt@gmail.com

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию структуры и оптических характеристик плазменного канала, образованного при распространении вдоль поверхности микропроводников высоковольтного импульса напряжения (ВИН) с субнаносекундным фронтом. В наших экспериментах генератор высоковольтных импульсов напряжения «РАДАН-220» разряжался на неоднородную коаксиальную линию длиной 15 см и диаметром 10 см. В центральную жилу линии включались медные ($d = 20\text{--}300\ \mu\text{m}$), никелевые ($d = 25\ \mu\text{m}$) и вольфрамовые ($d = 24,5\text{--}100\ \mu\text{m}$) проволоки длиной $l = 5\text{--}15\ \text{mm}$. Амплитуда зарядного напряжения составляла $U_0 = 220\ \text{kV}$, запасенная энергия – $w = 1\ \text{J}$; длительность фронта импульса $\tau_f = 200\text{--}500\ \text{ps}$. Давление в камере изменялось в пределах $P = 10^{-4}\text{--}760\ \text{Torr}$. Производилась съемка собственного свечения канала разряда с помощью цифровых фотокамер Canon 450D и Canon 5D Mark II; его непрерывная развертка с помощью стрик-камер АГАТ «СФ-3М» и Cordin-173 и коаксиального фотоэлектронного диода (ФЭК) СПУ-22М; регистрация интегрального спектра и его непрерывная развертка с помощью спектрографа MS 257 и стрик-камеры Cordin-173.

Установлено, что структура и оптические характеристики плазменного канала зависят от давления. Выявлено существование трех интервалов давлений, отличающихся механизмами генерации плазмы, каждый из которых характеризуется индивидуальной сложной

оптической структурой канала разряда. В одной из них микропроводники не разрушаются или разрушаются термомеханическими напряжениями (для вольфрамовых микропроводников она шире, чем для медных). Интегральные и теневые фотографии, а также временные развертки, свидетельствуют о том, что при давлении $P < 1\ \text{Torr}$ образующийся плазменный канал состоит из плазменной короны, плотного ядра – неидеальной плазмы и переходного слоя между ними, в которых наблюдаются вихревые и винтовые структуры, ярко светящиеся пятна, плазменные струи. Структура напыленных на диэлектрическую подложку пленок хорошо согласуется с интегральными изображениями структуры свечения канала разряда. Сопоставление осциллограмм тока и фототока с ФЭК, полученные при $P = 10^{-4}\ \text{Torr}$, показывает, что в излучении медной и никелевой проволочек присутствуют три, а в случае вольфрамовой – четыре ярко выраженные вспышки. При этом провалу на первой полуволне соответствует яркая вспышка свечения длительностью 5 нс, независимой от полярности напряжения и материала проволочки. Эта вспышка соответствует моменту образования плазменной короны. Интенсивность же вспышки зависит и от полярности, и от материала проволочек. Ее спектр, согласно временным разверткам, непрерывен. Линии в спектре появляются после нее.

Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект No. 10-08-00691-а), Президиума УрО РАН в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Вещество при высоких плотностях энергии» (проект No. 12-П-2-1005) и поддержки исследований молодых ученых и аспирантов (проект No. 11-2-НП-590).

STRUCTURE AND OPTICAL CHARACTERISTICS OF PLASMA CHANNEL, GENERATED BY HIGH-VOLTAGE PULSE WITH SUBNANOSECOND FRONT PROPAGATING ALONG MICROCONDUCTOR SURFACE

S.V. Barakhvostov¹, M.B. Bochkarev¹, N.B. Volkov¹,
K.A. Nagayev¹, V.P. Tarakanov²,
S.I. Tkachenko³, E.A. Chingina¹

¹Institute of Electrophysics UB RAS, Yekaterinburg, Russia

²Institute of High Energy Densities JIHT RAS, Moscow, Russia

³Moscow Institute of Physics and Technology (State University),
Dolgoprudny, Russia

E-mail: nbv@ami.uran.ru, karat@tarak.msk.su,
svtk.mipt@gmail.com

The work is dedicated to the experimental investigation of the structure and optical characteristics of plasma channel, generated by high-voltage pulse (HVP) with subnanosecond front propagating along microconductor surface. In our experiments the high-voltage impulse generator «RADAN-220» was discharged to the inhomogeneous 15 cm long and 10 cm internal diameter coaxial line. To the central conductor there were placed 5–15 mm long microwires of Cu ($d = 20\text{--}300\ \mu\text{m}$), Ni ($d = 25\ \mu\text{m}$) and W ($d = 24.5\text{--}100\ \mu\text{m}$). The charging voltage amplitude was $U_0 = 220\ \text{kV}$, stored energy – $w = 1\ \text{J}$; pulse rise du-

ration $\tau_f = 200\text{--}500$ ps. Pressure in the camera varied as $P = 10^{-4}\text{--}760$ Torr. We also performed the integral survey of the discharge channel self glowing via the DSLR cameras Canon EOS 450D and Canon EOS 5D Mark II; its continuous sweep survey via the streak cameras AGAT «SF-3M» and Cordin-173, and photoelectron coaxial diode (PEC) PEC-22SPYM; integral spectrum registration and its streak images via the spectrograph MS 257 and the streak camera Cordin-173.

It is revealed that structure and optical characteristics of plasma channel do depend on pressure. Existence of three pressure intervals, distinguished by plasma generation mechanisms, each having individual plasma channel complex optical structure, is established. Within one range microconductors either do not destruct or are destructed via thermo-mechanical strains (for W wires it is wider than for Cu ones). Integral, shadow and streak images demonstrate that at pressure $P < 1$ Torr the generated plasma channel consists of plasma crown, dense core – non-ideal plasma and a transitional layer in between, where vortex and helical structures, clear luminous spots and plasma jets are observed. The deposited to the insulating substrate films structure corresponds to the integral images of the plasma channel glowing structure. The current oscillograms and PEC-signals, acquired at $P = 10^{-4}$ Torr, comparison shows that in Cu and Ni wires glowing there are three, and in case of W – even four palpable flashes. Here the bright flash of the glowing, lasting for 5 ns and independent of the voltage polarity and microwire material, corresponds to the first half-wave dip. The flash corresponds to the moment of plasma crown formation. The flash intensity does depend on voltage polarity and microwire material. Its spectrum, according to the continuous sweep surveys, is continuous. Atomic lines appear in the spectrum later.

The work is carried out under partial financial support of the RFBR (project No. 10-08-00691-a), the Presidium of UB RAS within the program for basic research of the Presidium of RAS «Matter at high energy densities» (project No. 12-II-2-1005) and junior scientists and postgraduate students research support (project No. 11-2-НП-590).

3-58

**РЕГИСТРАЦИЯ
ОБЛАСТИ ГЕНЕРАЦИИ НЕЙТРОНОВ
В КАМЕРЕ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТРИЧНОГО
СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА**

Н.Г. Игнатьев, Б.Д. Лемешко,
А.К. Дулатов, П.С. Крапива

ФГУП ВНИИ автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Россия
E-mail: bogolubov@vniia.ru

Матричный сцинтилляционный детектор (МСД) разработан для проведения диагностики нейтронного излучения генерируемого на установке ЛТС «Искра-5» путем регистрации нейтронов источника использующего реакцию Д-Т (или Д-Д). Позиционно-чувствительный детектор состоит из сцинтилляционной волоконной матрицы, системы переноса изображения,

кадрового затвора, ПЗС – регистратора. Изображение области генерации нейтронов формируется на поверхности позиционно-чувствительного матричного детектора с помощью полутеневого обскуры в закодированном виде, требующем дальнейшей обработки.

МСД был использован в экспериментальных исследованиях по регистрации изображения области образования нейтронов в камере плазменного фокуса (ПФ). Получение «нейтронного» изображения области ПФ происходит в два этапа: на первом с использованием широкоапертурной обскуры получают обскурограмму зарегистрированных нейтронов из ПФ, на втором путем математической обработки обскурограммы получают изображение источника.

В докладе приведено описание технических характеристик используемого оборудования, схема проведения эксперимента и полученные результаты.

**REGISTRATION
OF AREA OF NEUTRONS GENERATION
IN THE PLASMA FOCUS CHAMBER
WITH USE MATRIX
OF SCINTILLATION DETECTOR**

N.G. Ignatyev, B.D. Lemeshko,
A.K. Dulatov, P.S. Krapiva

Federal State Unitary Enterprise N.L. Dukhov's
All-Russian Research Institute of Automatics (VNIIA),
Moscow, Russia

E-mail: bogolubov@vniia.ru

Matrix scintillation detector (MSD) is developed for carrying out of diagnostics of neutron radiation generated on installation LTF «Iskra-5» by registration of neutrons of a source using reaction D-T (or D-D). The positionally-sensitive detector consists from scintillation fiber matrix, system of carrying over of the image, a personnel shutter, CCD – the registrar. The image of area of generation of neutrons is formed on a surface of the positionally-sensitive matrix detector by means of penumbral obscures in coded form, demanding the further processing.

MSD has been used in experimental researches on registration of the image of the sphere of education of neutrons in the plasma focus (PF) chamber. Reception of the «neutron» image of area PF occurs in two stages: on the first with use wide aperture obscure receive obscurogramm the registered neutrons from PF, on the second by mathematical processing obscurogramm receive the source image.

In the report the description of technical characteristics of the used equipment, the scheme of carrying out of experiment and the received results is resulted.

3-59

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ТРИТИЕВЫХ МИШЕНЕЙ В СОСТАВЕ ВАКУУМНЫХ НЕЙТРОННЫХ ТРУБОК

А.А. Коробейников, Б.Д. Лемешко,
С.А. Сарапулов, Ю.К. Пресняков

ФГУП ВНИИ автоматики им.Н.Л. Духова, Москва, Россия

E-mail: bogolubov@vniia.ru

Разработан экспресс метод позволяющий проводить определение состояния мишени вакуумной нейтронной трубки (ВНТ) по наличию тока мишень-сетка, мишень-анод («бета» ток).

Метод позволяет:

- оценивать внутреннее состояние изоляции стеклянного баллона ВНТ и определять сопротивление утечки $R_{мс}$ между электродами мишень-сетка ВНТ;
- определять статическую разность потенциалов между электродами ВНТ при хранении с незамкнутыми электродами;
- определять вольтамперную характеристику промежутка мишень-сетка, которая по току насыщения $I_{нас}$ позволяет судить о работоспособности мишени; $I_{нас}$ коррелирует с нейтронным выходом ВНТ;
- качественно оценивать состояние вакуума (натекание атмосферы) внутри трубки по вольтамперной характеристике промежутка мишень-сетка.

Установлена связь снижения потока нейтронов с активностью мишени на разных стадиях ресурсных испытаний трубок ТНТ1415, ВНТ2-26 и ВНТ1-32.

Таким образом, разработан метод неразрушающего контроля состояния тритиевых мишеней ВНТ без включения высокого напряжения.

CONDITION DIAGNOSTICS TRITIUM TARGETS AS A PART OF VACUUM NEUTRON TUBES

A.A. Korobeynikov, B.D. Lemeshko,
S.A. Sarapulov, Yu.K. Presnyakov

Federal State Unitary Enterprise N.L. Dukhov's
All-Russian Research Institute of Automatics (VNIIA),
Moscow, Russia

E-mail: bogolubov@vniia.ru

The express method allows to develop definition of a condition of a target of a vacuum neutron tube (VNT) on presence of a current a target-grid, a target-anode («beta» current).

The method allows:

- To estimate inwardness of isolation of glass cylinder VNT and to define resistance of leak R_{ms} between electrodes target-grid VNT;
- To define a static potential difference between electrodes VNT at storage with not closed electrodes;
- To define VAC of an interval a target-grid which on a current of saturation I_{sat} allows to judge working capacity of a target; I_{sat} correlates with neutron exit VNT;

– Qualitatively to estimate a vacuum condition (rising of atmosphere) in a tube on VAC of an interval a target-grid.

Connection of decrease in a stream of neutrons with activity of a target at different stages of resource tests of tubes TNT1415, VNT2-26 and VNT1-32 is established.

Thus the method of nondestructive control of a condition tritium targets VNT without high voltage inclusion is developed.

3-60

СИСТЕМА ИМПУЛЬСНОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПИТАНИЯ ЛИУ-2

А.В. Акимов

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

Сформулированы основные требования к импульсной системе высоковольтного питания линейного индукционного ускорителя с высококачественным электронным пучком. Представлены технические решения, удовлетворяющие этим требованиям. Приведены результаты испытаний высоковольтной системы питания ЛИУ-2.

HIGH VOLTAGE PULSED POWER SYSTEM OF LIA-2 ACCELERATOR

A. V. Akimov

Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS,
Novosibirsk, Russia

The basic requirements to high voltage pulsed power system of linear induction accelerator with high-quality electron beam are defined. Basic technical solutions satisfied to these requirements are presented. Practical experience of LIA-2 high voltage pulsed power system operation is summarized.

3-61

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ИНЖЕКТОРЕ ЛИУ (ЛИУ-2)

О.А. Никитин¹, М.Ю. Столбиков¹, А.Р. Ахметов¹,
П.С. Базаров¹, Д.А. Железкин¹, С.Д. Хренков¹,
А.А. Каргин¹, К.С. Шубин¹, Д.В. Сысков¹,
А.В. Акимов², П.А. Бак², М.А. Батазова²,
А.М. Батраков², О.В. Беликов², Ю.М. Боймелшштейн²,
Д.Ю. Болховитянов², А.А. Елисеев², Ф.А. Еманов²,
Г.А. Фатькин², А.А. Корепанов², А.Н. Косарев²,
Я.В. Куленко², Г.И. Кузнецов², П.В. Логачев²,
И.В. Николаев², А.В. Оттмар², А.А. Пачков²,
А.Н. Панов², О.А. Павлов², Д.Н. Пурескин²,
Е.С. Рувинский², Д.А. Старостенко², С.О. Суворов²,
Ю.Ф. Токарев², А.П. Торшин², С.В. Тур²

¹Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mail: bazarovpavel@mail.ru

1. Основные характеристики электронного пучка инжектора:
 - характеристика, положение, фокусировка...
2. Состав системы диагностики пучка ЛИУ-2:
 - емкостные делители напряжения на индукторах инжектора.
 - емкостной делитель напряжения в вакуумном диоде
 - трансформатор тока за анодным отверстием
 - трансформатор тока на выходе из инжектора
 - полосковый датчик положения пучка
 - цилиндр Фарадея
3. Мишенный узел:
 - устройство
 - характеристика
4. Сравнение теоретически рассчитанных параметров электронного пучка с полученными результатами измерений.
5. Одноимпульсный и двухимпульсный режимы.
 - 5.1. Характеристика
 - 5.2. Сравнение
6. Перспективы развития:
 - проблемы, узкие места
 - доработка

MEASUREMENT OF ELECTRON BEAM PARAMETERS IN LIU INJECTOR (LIU-2)

O.A. Nikitin¹, M.Yu. Stolbikov¹, A.R. Akhmetov¹,
P.S. Bazarov¹, D.A. Zhelezkin¹, S.D. Khrenkov¹,
A.A. Kargin¹, K.S. Shubin¹, D.V. Syskov¹, A.V. Akimov²,
P.A. Bak², M.A. Batazova², A.M. Batrakov²,
O.V. Belikov², Yu.M. Boimelshtein²,
D.Yu. Bolkhovityanov², A.A. Eliseev², F.A. Emanov²,
G.A. Fat'kin², A.A. Korepanov², A.N. Kosarev²,
Ya.V. Kulenko², G.I. Kuznetsov², P.V. Logachev²,
I.V. Nikolaev², A.V. Ottmar², A.A. Pachkov², A.N. Panov²,
O.A. Pavlov², D.N. Pureskin², E.S. Ruvinsky²,
D.A. Starostenko², S.O. Suvorov², Yu.F. Tokarev²,
A.P. Torshin², S.V. Tur²

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

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

E-mail: bazarovpavel@mail.ru

1. Main characteristics of electron beam injector:
 - characteristics, position, focusing...
2. Composition of LIU-2 beam diagnostic system
 - capacitive voltage dividers on injector inductors;
 - capacitive voltage divider in vacuum diode;
 - current transformer behind anode hole;
 - current transformer at the output from injector;
 - stripeline beam position sensor;
 - faraday cylinder;

3. Target assembly:
 - arrangement;
 - characteristics.
4. Comparison of theoretical parameters of electron beam with obtained measurement results
5. Single-pulse and two-pulse modes.
 - 5.1. Characteristics
 - 5.2. Comparison
6. Development prospects:
 - problems, bottlenecks
 - further development

3-62

ПОДГОТОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ИНЖЕКТОРЕ ЛИУ (ЛИУ-2)

O.A. Nikitin¹, M.Yu. Stolbikov¹, A.P. Akhmetov¹,
P.S. Bazarov¹, D.A. Zhelezkin¹, S.D. Khrenkov¹,
A.A. Kargin¹, K.S. Shubin¹, D.V. Syskov¹,
A.V. Akimov², P.A. Bak², M.A. Batazova²,
A.M. Batrakov², O.V. Belikov², Yu.M. Boimelshtein²,
D.Yu. Bolkhovityanov², A.A. Eliseev², F.A. Emanov²,
G.A. Fat'kin², A.A. Korepanov², A.N. Kosarev²,
Ya.V. Kulenko², G.I. Kuznetsov², P.V. Logachev²,
I.V. Nikolaev², A.V. Ottmar², A.A. Pachkov²,
A.N. Panov², O.A. Pavlov², D.N. Pureskin²,
E.S. Ruvinsky², D.A. Starostenko², S.O. Suvorov²,
Yu.F. Tokarev², A.P. Torshin², S.V. Tur²

¹Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mail: bazarovpavel@mail.ru

1. Определение основных параметров установки ЛИУ-2.
В ходе исследований ЛИУ-2 определялись следующие показатели (характеристики) излучательной способности установки:
 - просвечиваемая толщина по свинцовому клину, мм свинца;
 - параметры нерезкости;
 - размер фокусного пятна на полувысоте распределения, мм;
 - длительность гамма-импульса на полувысоте распределения, нс;
 - определения шумовых характеристик излучения;
 - оценка группового энергетического спектра импульса тормозного излучения.
 - 1.1. Методы испытаний и измерения показателей, обработка результатов.
 - 1.1.1. Просвечивающая способность определяется на свинцовом клине, лицевая плоскость которого перпендикулярна направлению излучения инжектора.
 - 1.1.2. Параметры нерезкости определяются с помощью специально созданного клина по размытию изображения контрастной границы.
 - 1.1.3. Размеры фокусного пятна определяются по рентгенограмме камеры-обскуры. Камера

- устанавливается на оси пучка непосредственно за коллиматором.
- 1.1.4. Пространственное разрешение в стандартной геометрии постановки опыта определяется посредством миры на вольфрамовых пластинах.
- 1.1.5. Оценка группового энергетического спектра импульса тормозного излучения проводится по ослаблению тормозного излучения в материале фильтра дырчатого тест-объекта.
- 1.1.6. Определение шумовых характеристик проводится по рентгенограмме свинцового клина.
2. Подготовка и проведение взрывных опытов по регистрации фронта распространения детонационной волны в ВВ.
- 2.1. Постановка экспериментов с фторопластовым макетом, имитирующим детонационную волну в ВВ. Оценка резкости границы фронта детонационной волны.
- 2.2. Результаты проведенных взрывных опытов на ЛИУ-2. Сравнение с рентгенограммами, полученными на ускорителе ИГУР-3,5.

PREPARATION AND CONDUCTING RADIOGRAPHIC EXPERIMENTS ON INJECTOR LIU (LIU-2)

O.A. Nikitin¹, M.Yu. Stolbikov¹, A.R. Akhmetov¹,
P.S. Bazarov¹, D.A. Zhelezkin¹, S.D. Khrenkov¹,
A.A. Kargin¹, K.S. Shubin¹, D.V. Syskov¹, A.V. Akimov²,
P.A. Bak², M.A. Batazova², A.M. Batrakov²,
O.V. Belikov², Yu.M. Boimelshtein²,
D.Yu. Bolkhovityanov², A.A. Eliseev², F.A. Emanov²,
G.A. Fat'kin², A.A. Korepanov², A.N. Kosarev²,
Ya.V. Kulenko², G.I. Kuznetsov², P.V. Logachev²,
I.V. Nikolaev², A.V. Ottmar², A.A. Pachkov²,
A.N. Panova², O.A. Pavlov², D.N. Pureskin²,
E.S. Ruvinsky², D.A. Staroctenko², S.O. Suvorov²,
Yu.F. Tokarev², A.P. Torshin², S.V. Tur²

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

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

E-mail: bazarovpavel@mail.ru

1. Determination of main parameters of LIU-2 facility.

In the course of LIU-2 investigations, the following characteristics of facility's radiating capability were determined:

- The depth of X-raying in the lead wedge, mm;
- Blur parameters;
- Focal spot size at a half-height of distribution, mm;
- Duration of gamma-pulse at a half-height of distribution, ns;
- Noise characteristics of radiation;
- Group energy spectrum of bremsstrahlung pulse.

1.1 Test methods and measurement techniques, processing of the results.

1.1.1. X-raying capability is determined using the lead wedge with its face plane being normal to the direction of injector radiation.

1.1.2. Blur parameters are determined judging by the contrast boundary blur with the help of special wedge.

1.1.3. Focal spot sizes are determined from pin-hole

camera radiogram. Camera is installed on the beam axis directly behind the collimator.

1.1.4. In standard geometry of experimental set-up, the spatial resolution is determined by a test-object (mira) on the tungsten plates.

1.1.5. Group energy spectrum of bremsstrahlung pulse is estimated by bremsstrahlung attenuation in the material of perforated test-object filter.

1.1.6. Noise characteristics are determined by the lead wedge radiogram.

2. Preparation and performance of explosive experiments on registration of detonation wave propagation in HE.

2.1 Set-up of experiments with the fluoroplastic mock-up simulating detonation wave in HE.

Assessment of sharpness of the detonation wave front boundary.

2.2 The results of explosive experiments performed on LIU-2. Comparison of radiograms obtained in the IGUR-3.5 accelerator.

3-63

ОТРАБОТКА КАТОД-АНОДНОЙ ПАРЫ РЕНТГЕНОВСКОЙ УСТАНОВКИ РФЯЦ – ВНИИТФ ИГУР-3,5 ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РЕГИСТРАЦИИ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

П.С. Базаров, А.М. Василенко, М.Ю. Столбиков,
О.А. Никитин, В.Е. Черемазов

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: bazarovpavel@mail.ru

В докладе представлены результаты работы по модернизации катод-анодной пары установки ИГУР-3,5.

Отработка включала в себя:

1. Работы по модернизации катод-анодной пары рентгеновской установки, в результате которой поле излучения установки в пределах телесного угла, ограниченного системой регистрации, характеризуется высокой равномерностью ($\Delta D/D \approx 0,02$, где D – плотность почернения рентгеновской пленки).

2. Выяснение возможностей установки по определению толщин высокоплотных материалов, результаты которого показали, что поле излучения установки ИГУР-3,5 с модернизированной катод-анодной парой позволяет фиксировать разнотолщинность свинцового элемента 0,3 мм.

Высокая равномерность поля излучения установки, высокая чувствительность, а также короткая длительность импульса ИГУР-3,5 (30–50 нс) делает возможным проведение уверенной регистрации целого ряда газодинамических процессов. Некоторые результаты проведенных опытов представлены в данной работе:

1. Фиксирование изображения фронта сферических и цилиндрических ударных и детонационных волн в ВВ.

2. Исследование процесса образования трещин в опытах с цилиндрическими оболочками из высокоплотных

лотных материалов, нагружаемыми взрывом ВВ, а также со стационарными рентгенографическими тестами.

**FURTHER DEVELOPMENT
OF CATHODE-ANODE PAIR OF IGUR-3,5
X-RAY FACILITY (RFNC – VNIITF) TO OPTIMIZE
HIGH-SPEED PROCESS REGISTRATION**

P.S. Bazarov, A.M. Vasilenko, M.Yu. Stolbikov,
O.A. Nikitin, V.E. Cheremazov

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

E-mail: bazarovpavel@mail.ru

The paper presents the results of the cathode-anode pair modernization at the IGUR3,5 facility.

Further development included:

1. Activities aimed to modernize the cathode-anode pair at the X-ray facility; as a result, the facility radiation field within the solid angle limited by the registration system is characterized by high uniformity ($\Delta D/D \approx 0.02$, where D is the radiographic density).

2. Identification of facility capabilities to define high-density material thickness; the result demonstrated that the radiation field of the IGUR-3,5 facility with the advanced cathode-anode pair allows one to record 0.3 mm variations in the lead element thickness.

High uniformity of the facility radiation field, high sensitivity as well as the shortness of IGUR-3,5 pulse (30–50 ns) make it possible to record confidently a number of gas-dynamic processes. Some results of the performed experiments are given in this paper:

1. Registering the images of the front of spherical and cylindrical shock and detonation waves in HE.

2. Study of cracking in experiments with cylindrical shells made of high-density materials, which are loaded by HE explosion, and also with stationary X-ray examinations.

индуктивной развязки между тригatronами. При этом амплитуда тока в контуре практически та же, что и при одноканальной коммутации (87...88 кА). Проведенные эксперименты направлены на упрощение, удешевление и повышение стабильности работы системы запуска ускорителя РАПИД-2. Дальнейшие исследования необходимо направить на определение ресурса работы разрядников тригatronного типа и на оптимизацию их конструкции для полного зарядного напряжения батареи ускорителя РАПИД-2 ± 200 кВ.

**TRIGATRON TYPE DISCHARGER
FOR RAPID-2 ACCELERATOR**

A.M. Gafarov, N.M. Vagina, A.V. Vlasova

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

This study proposes an alternative approach to the system of launching and to formation of multi-channel commutation of dischargers on RAPID-2 accelerator built on the basis of the inductance-capacitance energy accumulator having plasma disconnectors with the 1MA loading current and the 1MV voltage to generate pulses of super rigid radiation. Authors present first results of experiments with the charge voltage up to ± 60 kV, which were performed on RAPID-M accelerator being a prototype of RADID-2 accelerator. Experiments resulted in stable three-channel commutation of the trigatron discharger with less than 10-ns time scattering between channels on condition of inductive decoupling between trigatrons. Current amplitude in the loop is practically the same as that with the one-channel commutation (87...88 кА). Performed experiments were aimed at simplification, cheapening, and improvement of RAPID-2 launching system operation stability. Further studies shall be aimed to determine operating life of trigatron dischargers and optimize their design for the ± 200 kV complete charge voltage of RAPID-2 accelerator battery.

3-64

**РАЗРЯДНИК ТРИГАТРОННОГО ТИПА
ДЛЯ УСКОРИТЕЛЯ РАПИД-2**

A.M. Гафаров, Н.М. Вагина, А.В. Власова

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

В данной работе предложен альтернативный подход к системе запуска и к формированию многоканальной коммутации разрядников на ускорителе РАПИД-2, созданного на основе индуктивно-емкостного накопителя энергии с плазменными размыкателями с током нагрузки 1 МА и напряжением 1МВ для получения импульсов СЖР-излучения. Приведены первые результаты экспериментов при зарядном напряжении до ± 60 кВ, выполненные на ускорителе РАПИД-М, являющемся прототипом ускорителя РАПИД-2. В результате экспериментов получена стабильная трехканальная коммутация разрядника тригatronного типа с временным разбросом между каналами менее 10 нс при условии

3-65

**ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ
ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР
С ЛАЗЕРНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ
ДЛЯ ПИТАНИЯ ВАКУУМНЫХ
ФОТОЭЛЕМЕНОВ СШП –
ГЕНЕРАТОРОВ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ**

А.А. Зубков, Р.Н. Мунасыпов, Н.Н. Хавронин

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: snow@vniitf.ru

Для генерации сверхширокополосного СВЧ-излучения с использованием электронных пучков, генерируемых в фотоэлементах (ФЭК), требуется генератор импульсного напряжения для питания ФЭК. Иницирование электронного пучка в ФЭК осуществляется после достижения на нем заданного напряжения, что с точки зрения электротехники означает зарядку до этого на-

пряжения его межэлектродной емкости внешним генератором импульсного напряжения.

В работе приводится описание высоковольтного генератора собранного по схеме Блюмляйна для зарядки емкости ФЭК (40 пФ) до напряжения 200 кВ в одноканальном варианте (в перспективе планируется 40 каналов зарядки). Основным преимуществом такой схемы генератора, по сравнению с другими (кабельный генератор по схеме Введенского, генератор на основе формирующей линии с масляной изоляцией), является вдвое меньшее напряжение зарядки формирующих линий при том же самом напряжении на заряжаемой емкости и связанный с этим несколько более высокий к.п.д. Рассматривается предложения по технической реализации такого генератора и результаты его макетирования.

Параметры генератора при работе на емкостную нагрузку 40 пФ:

- длительность импульса на нагрузке – 5...40 нс (регулируемая);
- частота следования импульсов – 1 кГц (регулируемая);
- напряжение на нагрузке (емкости) – 200 кВ (регулируемая);
- разброс срабатывания менее – 1 нс.

**HIGH-VOLTAGE PERIODIC GENERATOR
WITH LASER SYNCHRONIZATION TO POWER
VACUUM PHOTOCELLS OF ULTRA-WIDEBAND
MICROWAVE GENERATORS**

A.A. Zubkov, R.N. Munasypov, N.N. Khavronin

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

E-mail: snow@vniitf.ru

Generation of ultra-wideband microwave radiation using electron beams generated in photocells requires a high-voltage pulse generator to power these photocells. An

electron beam in a photocell is initiated after its voltage reaches a specified value; in terms of electrical engineering, this means that its interelectrode capacitance is charged to this voltage by an external high-voltage pulse generator.

The paper describes the Blumlein version of the high-voltage generator intended to charge the photocell capacitance (40 pF) to 200 kV in a single-channel variant (40 charging channels are planned in future). The main advantage of this version as compared to others (Vvedensky version of the cable generator, a generator based on a forming line with oil insulation) is a twofold decrease in the charging voltage of the forming lines at the same voltage at the charged capacitance and thus somewhat higher efficiency. Proposals on technical realization of such a generator are considered, as well as the results of prototyping.

Parameters of a generator for the 40 pF capacitance load:

- pulse duration under load – 5...40 ns (adjustable);
- pulse frequency – 1 kHz (adjustable);
- load (capacitance) voltage – 200 kV (adjustable);
- response scatter – less than 1 ns.

Секция 4

**СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ
ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ
ПРОЦЕССАХ**

Section 4

**PROPERTIES OF MATTER
AT HIGH-INTENSITY
PROCESSES**

**КВАЗИИЗЭНТРОПИЧЕСКОЕ
И УДАРНО-ВОЛНОВОЕ СЖАТИЕ
ПЛОТНОГО ГАЗООБРАЗНОГО ДЕЙТЕРИЯ
В ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ ДО 500 ГПа**

М.В. Жерноклетов, В.А. Аринин, В.Н. Бузин,
Н.Б. Давыдов, С.И. Киршанов, А.Б. Межевов,
М.Г. Новиков, В.Д. Орлов, В.В. Хрусталев

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

E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

Интерес к исследованию термодинамических свойств водорода и его изотопов при высоких давлениях и температурах связан с их широким распространением в природе и применением в различных высокоэнергетических конструкциях. Для изучения процессов в недрах планет-гигантов Юпитера, Сатурна, Нептуна и др. а также многочисленного отряда так называемых «вне-солнечных» планет необходимо знать как меняются параметры уравнения состояния при высоких давлениях и температурах.

В работе приведены результаты экспериментов по двум направлениям. В первом случае исследовались свойства газообразного дейтерия с начальной плотностью $D_{02} \rho = 0,04 \text{ г/см}^3$ при его сжатии в цилиндрических конструкциях, трансформирующих ударное сжатие в квазиизэнтропическое. Используя методики предварительного статического и динамического сжатий достигнуты давления сжатия дейтерия от 70 до 460 ГПа при плотностях от 1 до 3 г/см^3 и сжатиях от 25 до 75. Плотность газа определялась рентгенографическим методом по положению границ стальных оболочек, сжимающих газ. При регистрации рентгеновского изображения оболочек использовалась система диагностики, включающая ADC-комплекс для цифровой рентгенографии (CR). Метод CR-радиографии обеспечивает более высокую чувствительность регистрации, чем рентгеновские плёнки, а также высокое пространственное разрешение. Давления получены из газодинамических расчетов по уравнению состояния дейтерия, построенного на основе модифицированной модели сжимаемого коволюма.

Проведенные эксперименты с использованием улучшенной системы регистрации не подтвердили опубликованного ранее скачка плотности дейтерия при давлении $\sim 120\text{--}130$ ГПа. Полученные данные хорошо согласуются с расчетами, выполненными с использованием метода квантовой молекулярной динамики и феноменологическому «смесевому» уравнению водорода В.Д. Урлина. Совокупность экспериментальных и расчетных данных свидетельствует об отсутствии в дейтерии в области давлений до 400 ГПа аномалий, связанных с фазовым переходом.

Эксперименты по исследованию ударного сжатия плотного газообразного дейтерия выполнены с применением полусферических генераторов ударных волн и стальных капсул, способных обеспечивать герметичность при статических давлениях газа до 300 МПа. Начальная плотность газа в разных опытах менялась от 0,13 до 0,17 г/см^3 .

Скорость ударной волны в дейтерии измерялась оптическим методом с применением световодов, температура ударно сжатого дейтерия измерялась при помощи четырехканального пирометра. В экспериментах достигнуты значения давления 115 ГПа, плотности 0,76 г/см^3 и температуры 22 000 К. Полученные данные по сжатию газообразного дейтерия согласуются с результатами экспериментов по сжатию жидкого газа, а также с расчетами по модели Саха.

**QUASI-ISENTROPIC AND SHOCK-WAVE
COMPRESSION OF DENSE GASEOUS
DEUTERIUM IN PRESSURE RANGE UP
TO 500 GPa**

M.V. Zernokletov, V.A. Arinin, V.N. Buzin,
N.B. Davydov, S.I. Kirshanov, A.B. Mezhenov,
M.G. Novikov, V.D. Orlov, V.V. Khrustalev

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

E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

Interest for investigation of thermodynamic properties of hydrogen and its isotopes at high pressures and temperatures is caused by their widespread occurrence in nature and application of them in various high-energy constructions. For study of processes in planetary interiors of planets-giants Jupiter, Saturn, Neptune and others, as well as a large group of so-called «extrasolar» planets, it is necessary to know how parameters of the equation of state are changed at high pressures and temperatures.

The work presents results of tests in two directions. In the first case, properties of gaseous deuterium with initial density $D_{02} = 0.04 \text{ g/cm}^3$ were investigated when compressing it in cylindrical constructions, which transformed shock compression into quasi-isentropic. Using techniques of preliminary static and dynamic compressions, deuterium compression pressures from 70 to 460 GPa were reached at densities from 1 to 3 g/cm^3 and compressions from 25 to 75. Gas density was determined by the X-ray radiography method basing on location of boundaries of steel shells, which compressed gas. For recording X-ray image of the shells, the authors used a diagnostic system, including ADC-complex for digital X-ray radiography (CR). The CR-radiography method provides higher sensitivity of recording than X-ray films, as well as high spatial resolution. Pressures were obtained from gasdynamic calculations using the deuterium equation of state, which had been formulated basing on a modified model of compressed covolume.

Tests, which were performed with use of the improved recording system, did not confirm the earlier published jump of deuterium density at the pressure of $\sim 120\text{--}130$ GPa. The obtained data are in good agreement with results of calculations, which were performed with use of the method of quantum molecular dynamics and the phenomenological «mixing» equation of hydrogen of V.D. Urline. Experimental and calculated data together testify to absence of anomalies due to phase transition in deuterium in the pressure range up to 400 GPa.

Tests for investigation of shock compression of dense gaseous deuterium were performed with use of

hemispherical generators of shock waves and steel capsules, which were able to provide tightness at static pressures of gas up to 300 MPa. Initial gas density was varied from 0.13 to 0.17 g/cm³ in different tests.

Velocity of shock wave was measured in deuterium by the optic method with use of light guides; temperature of shock-compressed deuterium was measured by four-channel pyrometer. In the tests, we reached pressure of 115 GPa, density of 0.76 g/cm³ and temperature of 22 000 K. The obtained data on compression of gaseous deuterium are in agreement with the experimental results on compression of liquid gas, as well as with calculations by the Saha model.

4-2

МНОГОФАЗНОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ДЕЙТЕРИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

К.В. Хищенко

Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

E-mail: konst@ihed.ras.ru

Представлена новая полуэмпирическая модель уравнений состояния вещества с учетом полиморфных фазовых переходов, плавления и испарения. Приведены результаты расчетов термодинамических характеристик дейтерия в сопоставлении с имеющимися экспериментальными данными при высоких давлениях и температурах за фронтом сильных ударных волн.

MULTIPHASE EQUATION OF STATE FOR DEUTERIUM AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES

K. V. Khischenko

Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia,

E-mail: konst@ihed.ras.ru

A new semiempirical equation-of-state model for matter is proposed with taking into account polymorphic phase transformations, melting, and evaporation effects. Results of calculations of thermodynamic characteristics for deuterium are presented in comparison with available experimental data at high pressures and temperatures behind strong shock waves.

4-3

ПЕРВОПРИНЦИПНЫЕ РАСЧЕТЫ УПРУГИХ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОЦТ И ОЦК СТРУКТУР ОЛОВА

Н.А. Смирнов

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: nasmirnov@vniitf.ru

В данной работе исследована относительная устойчивость, упругие и термодинамические свойства оцт и оцк структур олова под давлением с помощью первопринципного метода расчета электронной структуры кристаллов FP-LMTO. Рассчитаны упругие константы и определены границы механической устойчивости рассмотренных структур при сжатии кристалла олова. В работе также были вычислены температуры Дебая, холодные кривые, изотермы 300 К олова до давлений ~180 ГПа. С помощью критерия Линдемана определена кривая плавления олова. Полученная кривая плавления удовлетворительно согласуется с данными других расчетов и экспериментов.

AB INITIO CALCULATIONS FOR THE ELASTIC AND THERMODYNAMIC PROPERTIES OF BCT AND BCC TIN

N.A. Smirnov

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

E-mail: nasmirnov@vniitf.ru

The relative stability, elastic and thermodynamic properties of bct and bcc tin under pressure are studied with the ab initio FP-LMTO method for electron structure calculations. Elastic constants are calculated and mechanical stability limits are determined. Also, the Debye temperature, cold curves and 300 K isotherms are calculated up to ~180 GPa. The melting curve is determined with the Lindemann criterion. It satisfactorily agrees with other calculated results and experimental data.

4-4

МОДЕЛЬ ПОГРУЖЕННОГО АТОМА И КРУПНОМАСШТАБНОЕ МОЛЕКУЛЯРНО- ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ ОЛОВА

Ф.А. Сапожников¹, Г.В. Ионов¹,В.В. Дрёмов¹, Л. Сулар²¹Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики
им. академ. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия²CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon, Франция

E-mail: f.a.sapozhnikov@vniitf.ru

Целью нашей работы было создание потенциала межатомного взаимодействия для олова, который мог быть использован в крупномасштабных молекулярно-динамических (МД) расчетах для предсказания его характеристик около кривой плавления, самой кривой плавления, кинетики плавления и рекристаллизации в разных условиях нагружения. Потенциал должен быть достаточно эффективным (быстрым), чтобы с ним могли проводиться многомиллиардные расчеты на кластерах с десятками тысяч процессоров.

Создание такого потенциала осложняется тем, что олово принадлежит к IV группе элементов периодической таблицы Менделеева, находясь между элементами

с алмазоподобной решеткой с сильными ковалентными связями (C, Si, Ge), и Pb, который стабилен в своей металлической фазе. Это делает фазовую диаграмму олова достаточно сложной. Так при $T = 0^\circ\text{C}$ известны по крайней мере три полиморфных перехода с сильно различающейся кинетикой. Четвертый предсказан теоретически, но не подтвержден экспериментально.

Модель Погруженного Атома (EAM) была выбрана именно из-за своей простоты и скорости, но ее функциональная форма была немного изменена. Как видно из фазовой диаграммы ударно нагруженное олово плавится из ОЦК фазы. Так как основной целью нашей работы было изучение плавления при ударном нагружении, то параметры EAM потенциала подбирались именно для этой фазы. Данный вариант EAM потенциала был реализован в программном комплексе «Молох» [1]. Мы калибровали параметры для олова, используя следующую информацию:

1. экспериментальная P - ρ ударная адиабата олова центрированная при $P = 0$, $\rho_0 = 7,29 \text{ г/см}^3$, $E_0 = -3,12 \text{ эВ}$ [2] (эти параметры относятся к β -олову в нормальных условиях);
2. изотермическая кривая сжатия при $T = 300\text{K}$;
3. экспериментальные данные и данные ab-initio MD расчетов кривой плавления при повышенных давлениях;
4. данные ab-initio MD расчетов по температуре вдоль ударной адиабаты.

Было также интересно проверить сможет ли потенциал с подобранными по этим данным параметрами описать кристаллизацию олова в ОЦК фазу из расплава. Нами была проведена серия расчетов кристаллизации в промежутке давлений от 10 до 100 ГПа. Анализ кристаллической структуры производился с использованием Анализа Адаптивным Шаблоном (АТА) [3]. Охлаждение расплава вело к кристаллизации в ОЦК фазу.

Рассчитанная ударная адиабата находится в хорошем соответствии с экспериментальными данными выше β -bct перехода и до ~ 60 ГПа. При более высоких давлениях наблюдается увеличивающееся различие между расчетными и экспериментальными данными. Возможной причиной является то, что данные параметры EAM потенциала плохо описывают жидкую фазу олова. Тем не менее, от bct- и ОЦК фаз и вплоть до давлений, при которых происходит плавление, наблюдается хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных.

Температура вдоль ударной адиабаты, посчитанная с использованием данного потенциала, хорошо согласуется с данными, представленными в [4].

Было проведено крупномасштабное моделирование ударного нагружения олова.

Литература

1. Sapozhnikov F.A., Dremov V.V., Derbenev I.V., Ionov G.V., Chizhkova N.E. MOLOCH Computer Code for MD Simulations of Processes in Condensed Matter, European Phys. J. (Web of Conferences), v.10 (2010), 00017.
2. Ravelo R., M. Baskes Phys. Rev. Lett. 79 2482 (1997).
3. Sapozhnikov Ph.A., Ionov G.V., Dremov V.V. Russian Journal of Physical Chemistry, 2 (2008) 238–245.
4. Jianbo Hu, Xianming Zhou, Chengda Dai, Hua Tan, and Jiabo Li, J. Appl. Phys., 104, 083520 (2008).

EMBEDDED ATOM MODEL AND LARGE-SCALE MOLECULAR DYNAMICS SIMULATION OF SHOCK LOADING OF TIN

F.A. Sapozhnikov¹, G.V. Ionov¹,
V.V. Dremov¹, L. Soulard²

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

²CEA, DAM, DIF, Arpajon, France

E-mail: f.a.sapozhnikov@vniitf.ru

The aim of our work was to develop an interatomic interaction potential for tin, that can be used in large-scale molecular-dynamics simulations to predict tin properties near the melting curve, the melting curve it-self, and kinetics of melting and solidification under different conditions of loading. The potential is required to be as effective (quick) as to allow multibillion atoms calculations on massively parallel computers with tens of thousands of processors.

The construction of such a potential is complicated by the fact that tin enters group IV of the periodic table, standing between elements which have a diamond-like structure with strong covalent bonds (C, Si, Ge), and Pb which is stable in its metal phase. This makes its phase diagram rather sophisticated. So, at $T = 0^\circ\text{C}$ at least three polymorphous transitions with strongly different kinetics are known for tin. A fourth is predicted theoretically but not confirmed in experiment.

EAM model was chosen to make calculations quick but its functional form was slightly changed. As seen from the phase diagram, shocked tin melts from BCC phase, and since the main objective of our work was to investigate melting under shock loading, the EAM potential was parameterized namely for this phase. The EAM model was implemented in MOLOCH code [1]. We fit EAM parameters for tin using the following information:

1. Experimental P - ρ Hugoniot of tin centered at $P = 0$, $\rho_0 = 7.29 \text{ g/cm}^3$, $E_0 = -3.12 \text{ eV}$ [2] (these parameters correspond to β -tin at ambient conditions);
2. Isothermal compression curve $T = 300\text{K}$;
3. Experimental and ab-initio MD data on melting curve at elevated pressures;
4. ab-initio MD data on temperature along the Hugoniot.

It was also interesting to check whether the parameterization of the EAM provides for the crystallization into BCC phase from the melt. We carried out a series of calculations of crystallization in the pressure range from 10 to 100 GPa. Crystal structure was analyzed by ATA (Adaptive Template Analysis) [3]. Cooling down the melt leads to its recrystallization into BCC lattice.

The calculated Hugoniot is in good agreement with experimental data above β -BCT transition pressure and up to ~ 60 GPa. At higher pressures there is increasing discrepancy between calculated and experimental Hugoniots. The possible reason is that the EAM parameterization does not provide for proper liquid-phase description. Nevertheless, in the region of BCT- and BCC-phases and up to the melting pressure we have good agreement of MD and experimental data. Temperature along the Hugoniot calculated with the EAM is in agreement with the data from [4].

Large scale MD simulations of tin shock loading were done using current potential.

References

1. Sapozhnikov F.A., Dremov V.V., Derbenev I.V., Ionov G.V., Chizhkova N.E. MOLOCH Computer Code for MD Simulations of Processes in Condensed Matter, *European Phys. J. (Web of Conferences)*, v.10 (2010), 00017.
2. Ravelo R., Baskes M. *Phys. Rev. Lett.* 79 2482 (1997).
3. Sapozhnikov Ph.A., Ionov G.V., Dremov V.V. *Russian Journal of Physical Chemistry*, 2 (2008) 238–245.
4. Jianbo Hu, Xianming Zhou, Chengda Dai, Hua Tan, and Jiabo Li, *J. Appl. Phys.*, 104, 083520 (2008).

4-5

**НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ
ОСТОВНЫХ ПСЕВДОПОТЕНЦИАЛОВ
И МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ
И СПЕКТРОВ СОЕДИНЕНИЙ АКТИНИДОВ
ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ**

А.В. Зайцевский^{1,2}, А.В. Титов², Н.С. Мосягин²

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Петербургский институт ядерной физики, Гатчина, Россия

E-mail: zaitsevskii@kintechlab.com; titov@pnpi.spb.ru

Представлена прецизионная модель релятивистских псевдопотенциалов (РПП) «малых» атомных остовов [1], предполагающая явное описание как валентных, так и части остовных электронных оболочек атомов тяжелых элементов. При ее построении принимаются во внимание как брейтовские взаимодействия, так и эффекты конечного размера ядра. Отличие от традиционной модели, обеспечивающее высокую точность в химических приложениях, заключается в оптимизации параметров РПП именно для валентных оболочек. Это отнюдь не исключает адекватного описания свойств, ассоциируемых с более высокими энергиями процессов (десятки электронвольт) и субвалентными электронными оболочками, при условии введения в РПП сепарабельных поправок (модель обобщенных РПП). Наконец, техника апостериорного восстановления электронной структуры в окрестностях атомных ядер [2] создает возможность прогнозирования и интерпретации характеристик, определяемых внутренними остовными электронными оболочками и традиционно считавшимися недоступными для анализа в рамках приближений РПП (например, химических сдвигов в рентгеновских эмиссионных и мессбауэровских спектрах).

Анализируются результаты, проблемы и перспективы применения нового класса РПП в расчетах электронного строения соединений актинидов и трансактинидов. Высокую надежность демонстрируют модели, исключаяющие из явного описания лишь 60 «внутренних» остовных электронов каждого актинидного атома. В сочетании с относительно простыми вариантами двухкомпонентной неколлинеарной формулировки релятивистской теории функционала плотности, определяемая ими модель электронной структуры может быть универсальным и экономичным средством количественного прогнозирования широкого диапазона свойств как газоплазменных образований, так и кластеров, имитирующих фрагменты твердых тел. Отмечена сложность подбора приближения для обменно-корреля-

ционного функционала; одной из центральных проблем является сбалансированное описание систем с разными координационными числами актинидных атомов. В качестве примеров приложений основное внимание уделяется свойствам оксидов U и Pu и моделированию экспериментов по регистрации трансактинидов.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты 11-03-12155-офи-м, 10-03-00727, 12-03-00821)

Литература

1. Mosyagin N.S., Zaitsevskii A., Titov A.V. // *Int. Rev. At. Mol. Phys.*, 2010. V. 1, n. 1., p. 63–72.
2. Titov A.V., Mosyagin N.S., Petrov A.N. et al., // *Progr. Theor. Chem. Phys.*, 2006. V. B 15, p. 253–283.

**NEW GENERATION OF RELATIVISTIC CORE
PSEUDOPOTENTIALS AND FIRST-PRINCIPLE
BASED MODELING OF STRUCTURES AND
SPECTRA OF ACTINIDE COMPOUNDS**

A.V. Zaitsevsky^{1,2}, A.V. Titov², N.S. Mosyagin²

¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, Russia

E-mail: zaitsevskii@kintechlab.com; titov@pnpi.spb.ru

Accurate small-core relativistic pseudopotential (RPP) model [1] implying the explicit description of valence and outer core electronic shells of heavy-element atoms is presented. The model is designed to take properly into account the Breit interactions and the effects of finite nuclear size. In contrast with the conventional model, RPP parameters are optimized just for valence shells, thus ensuring high accuracy in applications to chemistry. However, this in no way blocks adequate description of the properties associated with higher energies (dozens of electronvolts) and subvalence electronic shells, provided that few separable terms are added to the RPPs (generalized RPP model). Finally, the technique of a posteriori restoration of the electronic structure in the vicinity of atomic nuclei [2] offers the possibility of predicting or interpreting the properties defined by inner core electronic shells and usually assumed beyond the reach of RPP approximations (for instance, chemical shifts in X-ray emission and Mössbauer spectra).

The results, prospects, and problems of applications of the new RPPs in the calculations of electronic structure of actinide and transactinide compounds are discussed. A high reliability is achieved with the models replacing only 60 inner core electrons of each actinide atom by an appropriate RPP. Combined with relatively simple two-component non-collinear formulations of relativistic density functional theory, these models provide universal and inexpensive tools for predicting qualitatively a wide variety of properties of systems in gas and plasma as well as of the clusters simulating fragments of solids. The difficulties in choosing an appropriate approximation for the exchange-correlation functional are noticed; one of the central problems is to achieve a well-balanced description of systems with different coordination number of actinide atoms. Examples of applications concern mainly the calculations of properties of oxides of U and Pu and modeling the experiments on the detection of transactinides.

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grants # 11-03-12155-ofi-m, 10-03-00727, 12-03-00821).

References

1. Mosyagin N.S., Zaitsevskii A., Titov A.V. // Int. Rev. At. Mol. Phys., 2010. V.1, n.1. P. 63–72.
2. Titov A.V., Mosyagin N.S., Petrov A.N. et al. // Progr. Theor. Chem. Phys., 2006. V. B 15. P. 253–283.

4-6

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ЗВУКА В ТИТАНЕ И ЕГО СПЛАВЕ В ОБЛАСТИ ПОЛИМОРФНОГО ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ДО ДАВЛЕНИЙ 150 ГПа

Л.И. Канунова, С.И. Киршанов, А.Е. Ковалев,
А.Б. Межевов, М.Г. Новиков

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия
E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

Титан – один из важнейших конструкционных металлических материалов, который относится к переходным металлам с недостроенной d-оболочкой. Исследования фазового (α - ω) перехода показали, что существует значительное расхождение в измеренных значениях величины давления начала перехода: от 2 до 9 ГПа (для статики) и от 6 до 12 ГПа (в ударных волнах). Давления завершения фазового перехода при динамическом сжатии варьируются от $\approx 17,5$ до 22 ГПа. Такой разброс объясняется разной постановкой экспериментов, технологией изготовления титана, сильным влиянием на параметры перехода исходной микроструктуры образцов и пр.

Со структурными переходами в ударно-сжатом веществе связан излом в зависимости скоростей звука от давления. После плавления вещество теряет свои анизотропные свойства. Таким образом, по измерению продольной упругой CL и объемной СВ скоростей звука могут быть обнаружены фазовые превращения вещества вдоль ударной адиабаты, в том числе и его плавление.

В работе выполнены исследования фазовых превращений технически чистого титана марки VT1-0 (содержание титана 99,3 вес.%) и его сплава VT20 (содержание титана ~ 83 вес.%, остальное Al 6,0%, Zr 2,0%, Mo 1,25%, V 1,3%) в волнах ударного сжатия. Методом встречной разгрузки пьезорезистивными датчиками на основе манганина измерены скорости звука в титане при давлениях ударного сжатия менее 30 ГПа. При давлениях вплоть до 150 ГПа скорости звука в VT1-0 и в VT20 измерены методом догоняющей разгрузки с использованием индикаторных жидкостей. Зарегистрированы два излома зависимости скоростей звука в титане при давлениях (20÷40) ГПа и (60÷90) ГПа. Первый излом может соответствовать (α - ω) фазовому превращению титана. Впервые зафиксированный излом зависимости при $P \sim 60$ ÷90 ГПа отвечает фазовому превращению, но требует дополнительного исследования. Не исключено, что он связан с плавлением металла. Из экспериментов следует, что плавление VT20 на ударной адиабате начинается при давлениях выше ~ 130 ГПа.

MEASUREMENT OF SOUND VELOCITIES IN TITANIUM AND IN ITS ALLOY VT-20 IN AREA OF POLYMORPHIC PHASE TRANSITION UP TO PRESSURES OF 150 GPa

M.V. Zhernokletov, L.I. Kanynova, A.E. Kovalev,
S.I. Kirshanov, A.B. Mezhenov,
M.G. Novikov, M.E. Shavrin

Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific Research
Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia
E-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

Titanium is an important structural metallic material, which refers to transient materials with unfinished d-shell. In titanium was investigated in the conditions of both static and dynamic pressures. Investigations of the phase transition (α - ω) revealed that there is significant discrepancy in the measured values of pressure in the transition beginning: from 2.0 to 9.0 GPa (in statics) and from 6.0 to 12 GPa (in shock waves). The pressures of completion of phase transition in the conditions of dynamic compression are from ≈ 17.5 to 22 GPa. This scatter can be explained by different experimental setups, technologies of titanium manufacture, strong influence of the initial microstructure of the samples on the transition parameters and etc.

The kink in the «sound velocity-pressure» relation is caused by structural transitions in a shock-compressed substance. Therefore, by measurement of longitudinal elastic sound velocity CL and volume sound velocity CB, it is possible to reveal phase transitions of a substance along shock adiabat, including its melting.

Researches of phase transitions were performed in shock waves in technically pure titanium VT1-0 (the titanium content is 99.3 weight %) and titanium alloy VT-20 (the titanium content is ~ 83 weight %, besides, it includes Al 6%, Zr 2%, Mo 1.25%, V 1.3%). Sound velocities were measured in pure titanium in the pressure range up to 30 GPa by the rarefaction oncoming technique with use of piezoresistive manganin-based gauges. Sound velocities were measured in titanium VT1-0 and alloy VT-20 in the pressure range of 30...150 GPa by the rarefaction overtake technique with use of indicator liquids. Two kinks of the dependence of sound velocities are observed at the pressures of (20...40) GPa and (60...90) GPa on titanium shock adiabat. The first kink can point to the fact that titanium undergoes (α - ω) phase transition. First recorded kink in the pressure range of $P \sim 60$...90 GPa also corresponds to phase transition, so there is need for additional investigation. It cannot be excluded that this transition is caused by metal melting. As it is possible to see from the experiments, the melting of VT-20 on shock adiabat begins under the pressures higher ~ 130 GPa.

4-7

ПОВЕРХНОСТНАЯ СВОБОДНАЯ ЭНЕРГИЯ ЗАРОДЫШЕЙ НОВОЙ ФАЗЫ В ОБЛАСТИ СИЛЬНОЙ МЕТАСТАБИЛЬНОСТИ

В.Г. Байдаков, К.С. Бобров, А.О. Типеев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: baidakov@itp.uran.ru

При ударных воздействиях в веществе могут реализовываться большие степени метастабильности. Для описания фазового распада в этом случае нужно учитывать зависимость свойств зарождающейся фазы от ее размера. Методом молекулярной динамики исследована кинетика спонтанной кавитации и кристаллизации в модельной жидкости – леннард-джонсовском флюиде при температурах ниже температуры тройной точки.

Рассчитана барическая зависимость частоты нуклеации в моделях, содержащих до взаимодействующих частиц в интервале $J = 10^{31}–10^{35} \text{ с}^{-1}\text{м}^{-3}$. Наряду с частотой нуклеации в компьютерном эксперименте определены размер и давление в зародышах, коэффициент диффузии зародышей, что позволило в рамках теории гомогенной нуклеации рассчитать размерную зависимость поверхностной свободной энергии кавитационных полостей и зародышей кристаллической фазы.

Установлено, что на линии предельного переохлаждения ($J = \text{const}$) γ кристаллических зародышей является монотонно возрастающей функцией температуры, а характерный размер зародыша от температуры не зависит. Величина γ кристалликов с радиусами до 0,7 нм отличается от поверхностной свободной энергии плоской межфазной границы на 8–14%. Такое поведение свойств зародышей кристаллической фазы связано с отсутствием спинодали у переохлажденной жидкости.

Поверхностная свободная энергия (поверхностное натяжение) кавитационных полостей существенно (на 25–40%) меньше ее плоского предела. Показано, что для описания размерной зависимости γ вблизи границы спонтанной кавитации помимо первой поправки (поправка Толмена) необходимо учесть и вторую поправку пропорциональную квадрату кривизны межфазной границы. Обсуждается асимптотическое поведение γ при приближении к спинодали.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы Президиума РАН № 2.

SURFACE FREE ENERGY OF NEW-PHASE NUCLEI IN A REGION OF HIGH METASTABILITY

V.G. Baidakov, K.S. Bobrov, A.O. Tipeev

Institute of Thermophysics of the Ural Branch of RAS,
Yekaterinburg, Russia

E-mail: baidakov@itp.uran.ru

High degrees of metastability may be realized in substances under shock actions. To describe the phase decay in this case, one should take into account the dependence of properties of the incipient phase on its size. The molecular dynamics method has been used to investigate the kin-

tics of spontaneous cavitation and crystallization in a model liquid – a Lennard-Jones fluid at temperatures below that of the triple point.

The baric dependence of the nucleation rate has been calculated in models containing up to 10^6 interacting particles in the range $J = 10^3 \dots 10^{35} \text{ s}^{-1}\text{m}^{-3}$. Along with the nucleation rate, a computer experiment has determined the size and the pressure in nuclei, the diffusion coefficient of nuclei, which made it possible to calculate in the context of homogeneous nucleation theory the size dependence of the surface free energy γ of cavitation cavities and crystal-phase nuclei.

It has been found that on the line of limiting supercooling ($J = \text{const}$) γ crystal nuclei in a monotonically increasing function of the temperature, and the characteristic size of a nucleus is temperature independent. The value of γ of crystals with radii to 0.7 nm differs from the surface free energy of a flat interface by 8–14%. Such a behavior of the properties of crystal-phase nuclei is connected with the fact that a supercooled liquid has no spinodal.

The surface free energy (surface tension) of cavitation cavities is considerably (by 25–40%) smaller than its flat limit. It is shown that for describing the size dependence of γ close to the boundary of spontaneous cavitation besides the first correction (Tolman's correction) it is necessary to take into account the second correction, proportional to the square of the interface curvature. The asymptotic behavior of γ at the approach to the spinodal is discussed.

This work has been performed with a financial support of the Programme of the Presidium of the Russian Academy of Sciences № 2.

4-8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦЫ ДОСТИЖИМОГО ПЕРЕСЫЩЕНИЯ ЖИДКОЙ И КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ФАЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ НУКЛЕАЦИИ В ОЛОВЕ И БЕРИЛЛИИ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Г.В. Ионов¹, В.В. Дрёмов¹, А.В. Караваев¹,
С.П. Проценко², В.Г. Байдаков², А.О. Типеев²¹Российский федеральный ядерный центр – ВНИИ
технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия²Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт теплофизики УрО РАН,
Екатеринбург, Россия
E-mail: gionov@mail.ru

Разработана методика определения границ достижимого перегрева монокристалла и переохлаждения жидкости в молекулярно-динамическом эксперименте. Методика основана на фиксации момента зарождения новой фазы в однородной системе по изменению коэффициента самодиффузии и потенциальной энергии.

Построены молекулярно-динамические модели олова и бериллия. Межатомные взаимодействия в олове описываются потенциалом погруженного атома, хорошо воспроизводящим свойства ОЦК фазы. Для

описания взаимодействий в бериллии применен обобщенный потенциал погруженного атома [1]. В молекулярно-динамических экспериментах рассчитаны линии плавления и границы предельных перегревов и переохлаждений кристаллической и жидкой фаз в системах из нескольких десятков тысяч атомов.

В интервале температур от 1000 до 7000 К и давлений от 0 до 200 ГПа в режиме непрерывного изменения температуры исследована гомогенная нуклеация в бериллии. Кинетика нуклеации изучена также при фиксированных температуре, плотности и внутренней энергии. По результатам статистической обработки событий нуклеации определены наиболее вероятные температуры кристаллизации и плавления, среднее время жизни метастабильных фаз и размеры критических зародышей. Рассчитана частота нуклеации, величина которой составляет 10^{34} – 10^{35} с⁻¹м⁻³. Оценена избыточная свободная энергия на искривленных границах раздела жидкость–кристалл.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта ориентированных фундаментальных исследований УрО РАН 11-2-25-ЯЦ.

Литература

1. Ionov G.V., Dremov V.V., Sapozhnikov F.A., Karavaev A.V., Vorobyova M.A., Korotin M.A., Shorikov A.O., Anisimov V.I. MD Simulation of low symmetry phases of Pu with the MEAM and beyond. US-Russian Workshop on Pu Fundamentals, Livermore 2009, pp. 6–7.

EVALUATION OF METASTABLE REGION BOUNDARIES FOR LIQUID AND SOLID STATES IN MD SIMULATIONS

G.V. Ionov¹, V.V. Dremov¹, A.V. Karavaev¹, S.P. Protsenko², V.G. Baidakov², A.O. Tipeev²

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

²Institute of Thermal Physics Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia

E-mail: gionov@mail.ru

An automatic method was developed for detecting the boundaries of metastable states of superheated crystal and supercooled liquid. The method uses molecular-dynamics approach. The main measure for detection of early nucleation of the new phase is the self-diffusion coefficient and potential energy change.

We construct a molecular-dynamics model of tin and beryllium. The interatomic interactions are described in tin with embedded atom model (EAM) potential well reproduces the properties of the bcc phase. To describe the interactions in beryllium used a generalized embedded atom model (GEAM) potential [1]. In the molecular-dynamic experiments evaluated of the melting line and the boundaries of extreme overheating and overcooling of the crystal and liquid phases in the systems of several tens of thousands atoms.

In the temperature range from 1000 to 7000 K and pressures from 0 to 200 GPa in a continuous change of temperature was studied homogeneous nucleation in beryllium. The kinetics of nucleation also studied at fixed

temperature, density and internal energy. As a result of statistical analysis of nucleation events the most probable temperature of crystallization and melting, the average lifetime of the metastable phases and the size of critical nuclei. Calculated nucleation rate, the value of which is 10^{34} – 10^{35} s⁻¹м⁻³. Estimated the excess free energy of curved interfaces in liquid–crystal systems.

This work was supported by the project-oriented basic research, UB RAS 11-2-25.

Reference

1. Ionov G.V., Dremov V.V., Sapozhnikov F.A., Karavaev A.V., Vorobyova M.A., Korotin M.A., Shorikov A.O., Anisimov V.I. MD Simulation of low symmetry phases of Pu with the MEAM and beyond. US-Russian Workshop on Pu Fundamentals, Livermore 2009, pp. 6–7.

4-9

КОЭФФИЦИЕНТЫ САМОДИФФУЗИИ, СДВИГОВОЙ И ОБЪЕМНОЙ ВЯЗКОСТИ В МЕТАСТАБИЛЬНЫХ СОСТОЯНИЯХ ПРОСТОГО ФЛЮИДА

С.П. Проценко, В.Г. Байдаков, З.Р. Козлова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики УрО РАН,
Екатеринбург, Россия
E-mail: sp@itp.uran.ru

При фазовых переходах первого рода реализуются метастабильные состояния. Информация о свойствах вещества в таких состояниях важна для прогнозирования его поведения при высокоскоростном нагружении и разгрузке, нагреве и охлаждении, и для решения задачи динамики роста зародышей новых фаз при интенсивных фазовых превращениях. Компьютерное моделирование позволяет реализовать степени метастабильности, превышающие достигаемые в реальных экспериментах, и, таким образом, рассчитать свойства в тех областях параметров состояния, которые недоступны натурному эксперименту.

В данной работе методом молекулярно динамического моделирования рассчитаны коэффициенты самодиффузии $D^* = D\sqrt{m/\varepsilon\sigma^2}$, сдвиговой $\eta_s^* = \eta_s\sigma^2/\sqrt{m\varepsilon}$ и объемной $\eta_b^* = \eta_b\sigma^2/\sqrt{m\varepsilon}$ вязкости простого флюида в интервале температур $0,35 \leq k_B T/\varepsilon \leq 2,0$ и плотностей $0,005 \leq \rho\sigma \leq 1,2$, где k_B – постоянная Больцмана; m – масса частицы; T – температура; ρ – плотность, ε и σ – параметры потенциала Леннард-Джонса. Расчеты были проведены в стабильных и метастабильных состояниях жидкости и газа до границ спонтанной нуклеации в моделях, содержащих 2048 и 4000 взаимодействующих частиц. Построены уравнения, описывающие зависимости транспортных коэффициентов от температуры, плотности и давления.

Показано, что на линии плавления D^* слабо зависит от температуры и давления. В интервале от $T^* = 0,55$ до 2,0 величина D^* изменяется от 0,03 до 0,039. Жидкость сохраняет подвижность в метастабильном состоянии при температурах ниже тройной точки за счет высокого растяжения. Здесь наименьшие значения D^* составляют

около 0,005. При давлении выше давления фазового равновесия жидкость–кристалл D^* экспоненциально убывает с ростом давления.

Установлено, что на изотерме η_s^* и η_b^* резко возрастают с увеличением плотности при приближении к линии плавления и в области переохлажденных состояний жидкости. Понижение давления в жидкости ниже давления насыщенных паров приводит к уменьшению η_s^* вследствие убывания характерных времен релаксации сдвиговых напряжений при растяжении жидкости. Объемная вязкость возрастает и в области перегретой жидкости. Такое поведение связано с увеличением сжимаемости и ростом характерных времен релаксации автокорреляционных функций диагональных компонент тензора давления. Характер плотностных зависимостей η_s^* , η_b^* сохраняется и при температурах ниже температуры тройной точки, в области отрицательных давлений.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Президиума РАН №18.

COEFFICIENTS OF SELF-DIFFUSION, SHEAR AND BULK VISCOSITY IN METASTABLE STATES OF A SIMPLE FLUID

S.P. Protsenko, V.G. Baidakov, Z.R. Kozlova

Institute of Thermophysics of the Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russia

E-mail: sp@itp.uran.ru

Metastable states are realized in first-order phase transitions. Information on the properties of substances in such states is important for predicting their behavior under high-rate loading and unloading, heating and cooling, and for solving the problem of the dynamics of growth of new-phase nuclei during intense phase transitions. Computer simulation makes it possible to realize degrees of metastability that exceed those achieved in real experiments, and thus to calculate properties in ranges of state parameters inaccessible to real experiments.

In the present paper the method of molecular dynamics simulation is used to calculate the coefficients of self-diffusion $D^* = D\sqrt{m/\epsilon\sigma^2}$, shear $\eta_s^* = \eta_s\sigma^2/\sqrt{m\epsilon}$ and bulk $\eta_b^* = \eta_b\sigma^2/\sqrt{m\epsilon}$ viscosity of a simple fluid in the range of temperatures $0,35 \leq k_B T/\epsilon \leq 2,0$ and densities $0,005 \leq \rho\sigma \leq 1,2$, where k_B is the Boltzmann constant; m is the mass of a particle; T is temperature, ρ is density; ϵ and σ are parameters of the Lennard-Jones potential. Calculations have been made in stable and metastable states of liquid and gas up to the boundaries of spontaneous nucleation in models containing 2048 and 4000 interacting particles. Equations have been built up which describe temperature, density and pressure dependences of transport coefficients.

It is shown that on the melting line D^* exhibits only a weak dependence on temperature and pressure. In the range from $T^* = 0.55$ to 2.0 the value of D^* varies from 0.03 to 0.039. The liquid also retains mobility in metastable states below the temperature of the triple point. Here the lowest values of D^* are about 0.005. At a pressure in excess of that of the liquid-crystal phase equilibrium D^* decreases exponentially with increasing pressure.

Has been established that η_s^* and η_b^* sharply increase on an isotherm with density increase at the approach to the

melting line and in the field of the supercooled states of a liquid. A pressure decrease in the liquid phase below the pressure of saturated vapors leads to decreasing of shear viscosity owing to the decrease of characteristic times of relaxation of shear stresses in the process of a liquid stretching. Bulk viscosity increases in the region of a superheated liquid. Such a behavior is connected with an increase in compressibility and growth of characteristic times of relaxation of autocorrelation functions of diagonal components of a pressure tensor. The character of density dependences of η_s^* and η_b^* is also retained at the temperatures below temperature of the triple point, in the field of negative pressures.

The work has been performed with financial support of the program of Presidium of the Russian Academy of Sciences № 18.

4-10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ В ИМПУЛЬСНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ С ПРОВОЛОЧНЫМ ЗОНДОМ

В.И. Горбатов, А.Д. Ямпольский, А.А. Смотрицкий, А.А. Старостин, П.В. Скрипов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия
E-mail: star@itp.uran.ru

Теплофизические свойства веществ обычно измеряются в устойчивых состояниях. Применительно к таким условиям разработаны экспериментальные методы, работающие в линейном приближении. Большое распространение получили методы импульсного и периодического нагрева тонкого проволочного зонда – термометра сопротивления [1, 2]. Значения теплофизических свойств вещества определяются из амплитудных или частотно-фазовых характеристик изменения температуры зонда. В современных версиях метода импульсного нагрева привлекается процедура конечно-элементного моделирования для согласования результатов опыта с моделью теплообмена [3].

По причине очевидных экспериментальных сложностей практически не изучена область термически неустойчивых состояний вещества. В этой связи нами развиваются варианты метода импульсного нагрева зонда, впервые примененного для изучения спонтанного режима вскипания перегретых жидкостей [4], и метода численного моделирования параметров теплообмена на основе результатов опыта. Для воспроизведения различных режимов импульсного нагрева разработаны устройства цифрового синтеза функции нагрева и записи температурного сигнала [5, 6]. В опыте регистрируются электрическая мощность $P(t)$, выделяемая в зонде для выполнения заданного температурного режима, и изменение температуры $T(t)$, вычисляемая по изменению сопротивления зонда во время эксперимента. Можно построить процедуру идентификации системы по параметрам теплообмена с учетом зависимости свойств от температуры путем

сравнения численного решения прямой задачи и данных опыта. Оценка или уточнение параметров модели с известной структурой решается с помощью различных оптимизационных процедур – от метода наименьших квадратов до использования генетических алгоритмов [7]. Важно снизить влияние систематических и случайных ошибок в исходных опытных данных. Например, применение процедуры подбора оптимального решения при использовании в качестве изменяемых параметров геометрических размеров зонда и фиксации остальных параметров модели (известных в случае эталонов) позволяет уточнить размеры зонда. Последующая процедура идентификации теплофизических свойств позволяет получить набор близких решений, разница в значении отслеживаемого параметра которых составляет для «эталонных» веществ менее 1%. Применимость изложенного выше подхода для оценки наиболее вероятного вида температурной зависимости обобщенных теплофизических свойств среды в широкой области изменения температуры показана на примере ряда предельных углеводородов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 10-08-00538-а.

Литература

1. Филиппов Л.П. Измерения теплофизических свойств веществ методом периодического нагрева. М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Анализ методики эквивалентного импеданса и некоторые результаты измерений теплопроводности органических жидкостей / А.В. Багинский, А.С. Басин // Теплофизические свойства растворов. Новосибирск: ИТ СО АН СССР. 1983. С. 70–86.
3. Assael M.J., Karagiannidis L., Malamataris N., Wakeham W.A. The Transient Hot-Wire Technique: A Numerical Approach // *Int. Journ. Thermophys.* 1998. V.19, № 2. P. 379–389.
4. Павлов П.А., Скрипов В.П. Вскипание жидкостей при импульсном нагреве // *ТВТ.* 1965. Т. 3. № 1. С. 109–14.
5. Скрипов П.В., Старостин А.А., Волосников Д.В. Перенос тепла в импульсно перегретых жидкостях // *Доклады РАН.* 2003. Т. 390. № 2. С. 192–195.
6. Skripov P.V., Smotritskiy A.A., Starostin A.A., Shishkin A.V. A Method of Controlled Pulse Heating: Applications // *J. Eng. Thermophys.* 2007. Vol. 16. № 3. P. 155–163.
7. Czel B. and Grof G. Genetic Algorithm-Based Method for Determination of Temperature-Dependent Thermophysical Properties // *Int. J. Thermophys.* 2009. V. 30. № 6. P. 1975–1991.

Эволюция собственных точечных дефектов (междоузлий и вакансий) является первой стадией релаксации дефектной структуры после образования каскада столкновений. Эта стадия играет ключевую роль в процессах зарождения полостей и дислокаций. Современная кинетическая теория радиационного старения описывает кинетику этих процессов с использованием характерного радиуса взаимодействия [1]. Из-за сложности механизма взаимодействия междоузлий друг с другом и с вакансией эта величина является параметром в кинетических моделях. Теоретическое предсказание радиуса взаимодействия усложняется одномерной диффузией в некоторых металлах, например в молибдене. Диффузия междоузлий в Мо является одномерной вплоть до температур 1000–1500K [3]. Методом кинетического Монте-Карло показано, что одномерная диффузия может существенно изменять кинетику процессов [4].

Данной работа посвящена молекулярно-динамическому моделированию эволюции системы с междоузлиями и вакансиями. Используется новый потенциал межатомного взаимодействия [3], параметризация которого включает в себя энергии образования и миграции дефектов. Кластеризация и рекомбинация точечных дефектов исследуется с помощью изменения концентрации в течении времени. Рассчитаны константы скоростей. Проведено сопоставление с теорией диффузионно-контролируемых реакций. Исследованы эффекты температуры и концентрации дефектов на скорость реакций.

Литература

1. J. Rest, *J. Nucl. Mat.* 2000. V. 277. P. 231.
2. B. Grant, J. Harder, D. Bacon, *J. Nucl. Mat.* 1990. V. 171. P. 412.
3. Starikov S. V., Insepov Z., Rest J., Kuksin A. Yu., Norman G. E., Stegailov V. V., Yanilkin A. V. // *Phys. Rev. B.* 2011. V. 84. P. 104–109.
4. H. Heinisch, H. Trinkaus, B. Singh, *J. Nucl. Mat.*, 2007. V. 367. P. 332.

ATOMISTIC SIMULATION OF DEFECT EVOLUTION UNDER IRRADIATION IN MOLYBDENUM.

A.V. Yanilkin^{1, 2}, A.Yu. Kuksin²,
G.E. Norman², V.V. Stegailov²

¹All-Russia Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

²Joint Institute for High Temperatures of RAS, Moscow, Russia

E-mail: aleyanilkin@gmail.com

4-11

АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ДЕФЕКТОВ В МОЛИБДЕНЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОБЛУЧЕНИЯ

А.В. Янилкин^{1, 2}, А.Ю. Куксин²,
Г.Э. Норман², В.В. Стегайлов²

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматизации им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

Объединенный институт высоких температур РАН

E-mail: aleyanilkin@gmail.com

The evolution of self-interstitial atoms (SIA) and vacancies is the first stage of the defective structure relaxation after the cascade formation. This stage plays an important role in the nucleation process of the dislocations and voids. The modern kinetic theory of the radiation damage describes the kinetics of these processes in terms of the interaction radius [1]. But there are no accurate values of these parameters, because of the complex mechanism of SIA and SIA or SIA and vacancy interaction [2]. The theoretical prediction of the interaction radius becomes complicated by the one dimensional (1D) diffusion of SIA in some metals, for example in Mo. The diffusion of SIA in Mo is strongly 1D up to 1000–1500K [3]. It is shown by means of kinetic Monte Carlo that 1D diffusion can

change the kinetics of the interaction between SIA and sink strength dramatically [4]. In the case of SIA and vacancies it is possible to observe the similar effect.

The present work is devoted to the molecular dynamics simulation of evolution of the system with SIA and vacancies. The new accurate potential is used [3], which parameterization includes the formation and migration energy of the defects. The clustering and annihilation is investigated in terms of the concentration changing of defects during the calculation time. The rate constants are evaluated. The comparison with theory of the diffusion controlled reactions is carried out. The effects of temperature and defect concentrations on the reaction rates are also studied.

References

1. J. Rest, J. Nucl. Mat. 2000. V. 277. P. 231.
2. B. Grant, J. Harder, D. Bacon, J. Nucl. Mat. 1990. V. 171. P. 412.
3. Starikov S. V., Insepov Z., Rest J., Kuksin A. Yu., Norman G. E., Stegailov V. V., Yanilkin A. V. // Phys. Rev. B. 2011. V. 84. P. 104–109.
4. H. Heinisch, H. Trinkaus, B. Singh, J. Nucl. Mat., 2007. V. 367. P. 332.

4-12

ВЛИЯНИЕ $\alpha' - \epsilon - \alpha'$ И $\alpha' - \epsilon - \gamma$ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ 30ХГСА HRC 35...40 НА ПРОТЕКАНИЕ В ОБРАЗЦАХ ОТКОЛЬНЫХ РАЗРУШЕНИЙ

Е.А. Козлов, С.А. Бричиков,
Д.М. Шалковский, А.А. Брагин

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: e.a.kozlov@vniitf.ru

Представлены первые результаты лазерно-интерферометрических измерений изменения во времени скорости движения границы раздела исследуемого образца из закаленной стали 30ХГСА HRC 35...40 единиц и окна из LiF при нагружении изучаемых образцов толщиной 2–3 мм ударниками из стали 12Х18Н10Т толщиной 1–2 мм с подлетными скоростями 1,80; 2,74 и 3,96 км/с.

Обсуждается влияние изменения положения в (P , T)-координатах траекторий разгрузки закаленной стали 30ХГСА на особенности временного профиля скорости анализируемой контактной границы на фазе разгрузки стали и формирование в ней откольного разрушения.

THE INFLUENCE OF $\alpha' - \epsilon - \alpha'$ AND $\alpha' - \epsilon - \gamma$ PHASE TRANSITIONS IN QUENCHED STEEL 30KhGSA HRC 35...40 ON SPALLATION SAMPLES

E.A. Kozlov, S.A. Brichikov,
D.M. Shalkovsky, A.A. Bragin

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

E-mail: e.a.kozlov@vniitf.ru

The paper presents the first results of laser-interferometric time-resolved measurements of the interface velocity of

investigated sample made of quenched 30KhGSA steel with HRC 35...40 units, and the LiF window, under loading of the 2–3mm-thick samples by 1–2 mm-thick plate impactors of steel 12Kh18N10T with velocities of 1.80; 2.74, and 3.96 km/s.

The influence of positions of the unloading trajectories of quenched steel 30KhGSA in (P , T)-coordinates on peculiarities of velocity profile of the interface of steel and LiF-window, as well as spall fracture formation in steel samples are discussed.

4-13

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОФИЛЕЙ ВОЛН РАЗГРУЗКИ В СТАЛИ 30ХГСА, ПРЕТЕРПЕВАЮЩЕЙ $\epsilon - \alpha$ ПРЕВРАЩЕНИЕ

А.С. Майорова¹, А.В. Павленко², С.И. Балабин²,
А.В. Дулов², О.Е. Козелков²

¹СФТИ НИЯУ МИФИ, Снежинск, Россия

²Российский федеральный ядерный центр – ВНИИ
технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: ann_may@mail.ru; avpavlenko@vniitf.ru

Реалистичное прогнозирование поведения материалов требует адекватного учета фазовых переходов. Железо претерпевает полиморфное $\alpha - \epsilon$ превращение при давлении 13 ГПа с изменением плотности на 6%. Современные модели [1] достаточно точно описывают прямое полиморфное превращение в железе и стали 30ХГСА. Обратные фазовые превращения являются малоизученными. Данная работа посвящена исследованию профилей волн разгрузки в стали 30ХГСА, которая близка по свойствам к хорошо изученному чистому железу [2]. Опыты проводились на легкогазовой пушке калибра 44 мм. Профили волн напряжений регистрировались с помощью двухканального лазерно-интерферометрического комплекса VISAR. Условия проведения экспериментов подбирали таким образом, чтобы исследовать особенности кинетики обратного фазового превращения и оценить динамические свойства материала в ϵ -фазе.

Литература

1. Задорожный Г.А., Коваленко Г.В., Петровцев А.В. Моделирование полиморфных превращений в железе в широком диапазоне состояний // В трудах VII Забабахинских научных чтений, Снежинск, 2003.
2. Jensen B.J., Gray G.T., Hixson R.S. Direct measurement of the $\alpha - \epsilon$ transition stress and kinetics for shocked iron // J. Appl. Phys., v. 105, 103502, 2009.

INVESTIGATION INTO RAREFACTION WAVE PROFILES IN 30HhGSA STEEL UNDERGOING THE ϵ - α TRANSFORMATION

A.S. Mayorova¹, A.V. Pavlenko²,
C.I. Balabin², A.V. Dulov², O.E. Kozelkov²

¹Snezhinsk Physical and Technical Institute of National Research Nuclear University MIFI, Snezhinsk, Russia,

²Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia
E-mail: ann_may@mail.ru; avpavlenko@vniitf.ru

Realistic forecasting of materials behavior requires adequate consideration of phase transitions. Iron undergoes the polymorphic α - ϵ transformation under the pressure of about 13 GPa with the density changing by 6%. The up-to-date models [1] describe in details direct polymorphic transformation in iron and in the 30HhGSA steel. Reverse phase transformations turn out to be poorly studied. The goal of this paper is to investigate the rarefaction wave profiles in the 30HhGSA steel having properties that are similar to those of well-defined pure iron [2]. Experiments were performed with the light-gas gun having 44-mm caliber. The stress wave profiles were registered with the help of the two-channel laser VISAR interferometric system. Experimental conditions were taken so that specific features of the reverse phase transformation kinetics could be studied and dynamic properties of materials in the ϵ -phase could be estimated.

References

1. Zadorozhny G.A., Kovalenko G.V., Petrovtsev A.V. Simulation of polymorphic transitions in iron within a wide range of states // VII Zababakhin Scientific Talks, Snezhinsk, 2003.
2. Jensen B.J., Gray G.T., Hixson R.S. Direct measurement of the α - ϵ transition stress and kinetics for shocked iron // J. Appl. Phys., v. 105, 103502, 2009.

4-14

СВОЙСТВА ФИБРОБЕТОНА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

А.М. Брагов¹, А.Ю. Константинов¹,
Д.А. Ламзин², А.К. Ломунов²

¹НИИМ Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Н. Новгород, Россия

²Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Н. Новгород, Россия
E-mail: bragov@mech.unn.ru; lomunov@nngasu.ru

Известно, что фибробетон по сравнению с обычным бетоном обладает более высокими прочностными показателями. В этой связи представляется перспективным его использование в ответственных конструкциях и сооружениях атомной, энергетической, военной техники, которые в процессе эксплуатации из-за техногенных и природных катастроф, террористических актов могут испытывать интенсивные воздействия ударного или взрывного характера. В докладе представлены результаты динамических испытаний на сжатие, растяжение при раскалывании и ударную вязкость фибробетона CARDIFRC, изготовленного в университете г. Кардифф

(Великобритания). Испытания проводились с использованием экспериментального комплекса НИИМ ННГУ, в основу работы которого положен метод Кольского и его модификации. В результате испытаний получены диаграммы деформирования материала, определены его некоторые механические характеристики и построены их зависимости от скорости деформации, скорости роста напряжений и амплитуды нагрузки. Отмечено влияние скорости деформации и скорости роста напряжений на механические свойства материала. Выявлено влияние масштабного фактора на значения ударной вязкости.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты РФФИ № 11-08-00545; 10-01-00585).

PROPERTIES OF FIBER REINFORCED CONCRETE UNDER DYNAMIC LOADING

A.M. Bragov¹, A.Yu. Konstantinov¹,
D.A. Lamzin², A.K. Lomunov²

¹Research Institute of Mechanics Nizhny Novgorod State University, Nizhny Novgorod, Russia

²Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia

E-mail: bragov@mech.unn.ru; lomunov@nngasu.ru

It is known that fiber reinforced concrete has a higher strength than conventional concrete. In this regard, application fiber reinforced concrete in dependable facilities and structures of power and nuclear industry, defense technology, which on-stream may be subjected impacts or explosive because of natural and anthropogenic disasters, terrorist acts is promising. In this report the results dynamic tests on compression, splitting and impact toughness of fiber reinforced concrete CARDIFRC, manufactured at the University of Cardiff (UK) are presented. Tests were conducted using an experimental set of Research Institute of Mechanics of State University of Nizhny Novgorod based on the Kolsky method and its modifications. In results of test stress – strain curves of material have obtained and defined some of its mechanical properties and then have plotted these data versus strain rate, stress rate and amplitude of load. The influence of strain rate and stress rate on the mechanical properties of the material is noted. The influence of scale factor on the impact toughness values is shown.

This work was done at supporting by the Russian Fund of Fundamental Researches (grants № 11-08-00545; №10-01-00585).

4-15

СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ВОЛЬФРАМА В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СОУДАРЕНИЯ

С.А. Афанасьева, Н.Н. Белов, А.Н. Ищенко,
А.Н. Табаченко, М.В. Хабибуллин, Н.Т. Югов

Научно-исследовательский институт прикладной математики
и механики Томского государственного университета,
Томск, Россия

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

Высокопрочные и высокоплотные сплавы на основе вольфрама с 3d-переходными металлами активно используются в различных областях высокоскоростного взаимодействия твердых тел. Ударники из них по своим физико-механическим характеристикам выгодно отличаются от остальных: они имеют большую плотность, высокую твердость, более высокий модуль упругости и т. д. Считается, что материал с такими характеристиками должен обладать и повышенной проникающей способностью при ударном взаимодействии. В месте с тем известно, что конечные свойства спеченного материала определяются структурными факторами: средним размером зерен, их распределением по размерам, состоянием границ зерен, степенью искажения кристаллической решетки и др.

В данной работе рассмотрены некоторые особенности получения сплавов системы вольфрам–никель (ВН) и вольфрам–никель–железо (ВНЖ) методом жидкофазного спекания порошкообразных заготовок, в том числе содержащих наноразмерные вольфрамовые порошки. Проведено исследование влияния исходной пористости порошковых образцов на плотность сплавов на основе вольфрама, полученных методом спекания. Путем варьирования исходной пористости получены образцы высокопористых сплавов. В отдельном случае для имитации пор в сплавы ВНЖ дополнительно вводили наполнитель из оксида магния с существенно более низкими механическими свойствами по сравнению с другими компонентами (псевдапористые сплавы). Проведен анализ проникающей способности цилиндрических стержней из разработанных композиционных материалов в стальные бронеплиты в диапазоне скоростей удара 2000...4000 м/с расчетно-экспериментальным методом. Особое внимание уделено ударникам из высокопористых и псевдапористых композитов, отличающихся повышенной проникающей способностью при высокоскоростном соударении по сравнению с монолитными аналогами.

PROPERTIES OF TUNGSTEN-BASED COMPOSITE MATERIALS IN THE CONDITIONS OF HIGH-SPEED IMPACT

S.A. Afanasyeva, N.N. Belov, A.N. Ishchenko,
A.N. Tabachenko, M.V. Habibullin, N.T. Yugov

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

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

High-strength and high-density alloys on the basis of tungsten with 3d-transitive metals are actively used in various areas of high-speed interaction of solid bodies. Drummers made of them profitably differ from the others in their physical-mechanical characteristics: they have bigger density, high hardness, higher module of elasticity etc. A metal with such characteristics is considered to have to possess raised penetrating ability at shock interaction. At the same time it is known that final properties of sintered material are defined with structural factors: average grain size, their size distribution, grain border condition, distortion degree of a crystal lattice etc.

In the given work some features of reception of tungsten – nickel (TN) and tungsten – nickel – iron (TNI) alloys with liquid phase sintering of powdery blanks, including those containing nanodimensional tungsten powders are considered. The research of influence of grain sizes and initial porosity of powder samples on density of tungsten alloys received with sintering is conducted. Samples of high-porous composites are received with variation of initial porosity. In a separate case for pore imitation a magnesium oxide filler with essentially lower mechanical properties in comparison with other components were additionally entered into TNI alloys, as a result the so-called pseudoporous alloys were received. The analysis of penetrating ability of cylindrical cores made of the developed composite TN and TNI materials into steel armour plates in the range of impact speeds 2000...4000 m/s is carried out with experiment-calculated method. A special attention is given to drummers made of high-porous and pseudoporous composites which are notable for their raised penetrating ability at high-speed impact in comparison with monolithic analogs.

4-16

ПРОЧНОСТЬ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ Ti-Al₃Ti ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

А.М. Пацелов¹, В.В. Рыбин², Б.А. Гринберг¹

¹Институт физики металлов УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный политехнический
университет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: patselov@imp.uran.ru; rybin.spb@gmail.com

Разработка высокопрочных слоистых композитов типа металл–интерметаллид является перспективным направлением в области современного материаловедения. Такие композиты имеют вдвое большую удельную жесткость, чем у сталей, удельную твердость на уровне большинства керамических материалов, и превосходят многие металлические сплавы по удельной вязкости и прочности. Получение композитов с чередованием слоев металл–интерметаллид основано на реакционном спекании фольг химически активных металлов под давлением. Высокая прочность и жесткость такого композита достигается за счет интерметаллидного слоя, высокая вязкость за счет металлического слоя. Используя в качестве исходных материалов фольги (или листы) титана и алюминия, удалось синтезировать

слоистые композиты типа титан–триалюминид титана, либо с более сложным чередованием слоев, где, кроме титана, в мотив чередования слоев встраивается неизрасходованный в процессе реакционного спекания алюминий. Методами статических и динамических испытаний проведена оценка механических свойств композитов с различным содержанием металлической и интерметаллидной составляющих [1]. Установлен анизотропный характер механических свойств слоистых композитов при статическом и динамическом нагружении. Следует отметить существенное различие механических свойств, определенных при статическом сжатии, для направлений приложения нагрузки вдоль и поперек слоев. Так, предел пропорциональности для них различается в 1,4–1,7 раза, а деформация при пиковой нагрузке – в 6,5–8 раз. Явно выраженный анизотропный характер механических свойств отмечен и при испытаниях на ударный изгиб. Работу зарождения и распространения трещины определяли по диаграммам нагрузка–прогиб. Установлено, что ударная вязкость и полная работа разрушения, существенно зависят от ориентации надреза. Для образцов с V-образным надрезом, пересекающим последовательно чередующиеся металлические и интерметаллидные слои, работа, затрачиваемая на распространение трещины, в 3–4 раза превышает аналогичную величину для образцов, в которых надрез пересекает вышеупомянутые слои одновременно.

Литература

1. Пацелов А.М., и др. Синтез и свойства слоистых композитов системы Ti–Al с интерметаллидной прослойкой // Деформация и разрушение материалов, 2010. № 6. С.27–31.

STRENGTH OF Ti–Al₃Ti LAMINATED COMPOSITES UNDER STATIC AND DYNAMIC LOAD

A.M. Patselov¹, V.V. Rybin², B.A. Greenberg¹

¹Institute of Metal Physics RAS Ural Branch, Yekaterinburg, Russia

²State Polytechnical University, St. Petersburg, Russia

E-mail: patselov@imp.uran.ru; rybin.spb@gmail.com

Development of the high-strength metal–intermetallic laminated composites (MIL) is a recognized field of focus in materials science and engineering. These composites have the specific stiffness (modulus/density) is nearly twice that of steel, the specific hardness is on par with many ceramic materials, and specific toughness and specific strength are similar or better than nearly all metallic alloys. Preparation of composites with alternating layers of metal–intermetallic based on the intermetallic reaction during the sintering of reactive metal foils under pressure. The high strength and the stiffness of the composite is achieved at the expense of intermetallic layer, a high toughness due to the metal layer. Using as a starting materials the foils (or sheets) of titanium and aluminum, the different MIL composites were synthesized including both titanium–titanium tri-aluminide, and also the same combination with unconsumed second metal (aluminum) layers. Using the static and dynamic tests, the estimation of some mechanical properties was carried out

for the MIL composites with different contents of metallic and intermetallic constituents [1]. The results indicated that the MIL composites exhibited anisotropic features both for mechanical properties and fracture behavior. It should be noted a significant difference in mechanical properties determined by static compression for the load application directions along and across the layers. Thus, offset yield strengths differ by a factor of 1.4–1.7 and the strains at a peak load differ by a factor of 6.5–8. A pronounced anisotropic character of the mechanical properties is also observed during impact bending tests. The works of crack nucleation and propagation were determined from load–flexure impact diagrams. It is established that the impact strength and total work of destruction, depend strongly on the orientation of the notch. For the samples with a V-shaped notch on the side of one of the layers, the crack propagation energy is higher than that in the case of a notch intersecting metallic and intermetallic layers by a factor of 3–4.

Reference

1. Patselov A.M., Rybin V.V., Grinberg B.A., Ivanov M.A., and Eremina O.V. Synthesis and Properties of Ti–Al Laminated Composites with an Intermetallic Layer // Russian Metallurgy (Metallurgy), 2011, No. 4, pp. 356–360.

4-17

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДИССИПАЦИИ УПРУГОЙ ЭНЕРГИИ В УМК АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ ПРИ СЖАТИИ ПО МЕТОДИКЕ КОЛЬСКОГО

А.Н. Петрова¹, И.Г. Бродова¹, О.А. Плехов²,
О.Б. Наймарк², Е.В. Шорохов³

¹Институт физики металлов УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

²Институт механики сплошных сред УрО РАН,
Пермь, Россия

³Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: petrovanastya@yahoo.com; poa@icmm.ru;
e.v.shorokhov@vniitf.ru

Проведено исследование механического поведения ультрамелкокристаллических (УМК) и крупнокристаллических (КК) образцов из алюминиевых сплавов В95 и АМц при динамическом сжатии методом Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона. В процессе экспериментов с разной интенсивностью нагружения определялись динамические механические свойства образцов, а с помощью инфракрасного сканирования регистрировалась температура образцов, что дало возможность определить долю диссипированной энергии, которая рассчитывалась как отношение энергии, преобразованной в тепло, к энергии затраченной на деформирование образца. Для определения закономерностей накопления и диссипации энергии в УМК и КК образцах проводилась аттестация их структуры до и после динамического сжатия. УМК образцы из сплава В95 были получены методом динамического канального-углового прессования (ДКУП) при 1–2 проходах (*N*)

и скорости $V = 150$ м/с, а из сплава АМц – при $N = 1...4$ и $V = 150...300$ м/с. Показано, что условия динамического прессования (V и N) влияют на механизмы формирования УМК состояния и на механические свойства этих сплавов. Исследован спектр структур с различным размером структурных фрагментов, разными долями фрагментированной и рекристаллизованной структур и уровнем внутренних напряжений, а также различным соотношением малоугловых и большеугловых границ кристаллитов. Установлено, что значения динамических пределов прочности и текучести для УМК и КК материалов отличаются на 10–20%, в то время как при квазистатическом растяжении УМК материалы демонстрируют прочность в 2–2,5 раза выше, чем КК. Обнаружено, что при динамическом сжатии УМК образцы обладают большей диссипативной способностью по сравнению с КК образцами, а доля диссипированной энергии зависит от степени дефектности УМК структуры. Так, в сплаве В95 наибольшей диссипативной способностью обладает полученный при $N = 2$ и $V = 150$ м/с УМК образец с фрагментированной структурой и высокой плотностью дислокаций. После низкотемпературного отжига, когда уровень внутренних напряжений снижается, диссипативная способность уменьшается. В сплаве АМц УМК образцы, имеющие преимущественно рекристаллизованную структуру, также характеризуются меньшей долей диссипированной энергии при динамическом сжатии по сравнению с образцами с фрагментированной структурой.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта ориентированных фундаментальных исследований УрО РАН №11-2-11ЯЦ и гранта РФФИ (проект №11-03-00047).

THE FEATURES OF DEFORMATION BEHAVIOR AND REGULARITIES OF ENERGY DISSIPATION IN ULTRAFINEGRAINED ALUMINUM ALLOYS DURING COMPRESSION BY KOLSKY METHOD

A.N. Petrova¹, I.G. Brodova¹, O.A. Plekhov²,
O.B. Naimark², E.V. Shorokhov³

¹Institute of Metal Physics, Ural Branch of RAS,
Yekaterinburg, Russia

²Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch
of RAS, Perm, Russia

³Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

E-mail: petrovanastya@yahoo.com; poa@icmm.ru;
e.v.shorokhov@vniitf.ru

The investigation of mechanical behavior of ultrafine-grained (UFG) and coarsegrained (CG) aluminum alloys A3003 and A7075 under dynamic compression by traditional Kolsky-Gopkinson method were carried out. The dynamic mechanical properties of the materials were determined during experiments with different intensity of loading. By infrared scanning the temperature of the samples was registered during compression, then the share of dissipated energy was calculated as ratio of the energy transformed to heat to the energy expended to the deformation. To determine the regularities of energy storage and dissipation in UFG and CG samples their structures were inves-

tigated before and after compression. UFG samples were produced by dynamic channel-angular pressing (DCAP). It was shown that DCAP loading conditions (initial velocity of the sample through the canals V , number of passes N) effect on structure formation mechanisms and mechanical properties of the alloys. The structures with different characteristics (structural fragments size, the share of fragmented and recrystallized structure and the level of internal stress, the share of low-angle and high-angle boundaries) were investigated.

It was established that the difference in the value of dynamic mechanical properties of UFG and CG samples is 10–20%, while during quasistatic tensile tests UFG samples exhibit high strength that 2–2.5 times higher than strength of CG samples.

It was found that under dynamic compression UFG materials have greater dissipation capability compared to CG samples, and the share of dissipated energy depends of the structural imperfection. So the sample from A7075 alloy produced by two DCAP passes at $V = 150$ m·s⁻¹ with dispersed structure and high dislocation density formed as a result of fragmentation has the highest dissipation capability. The level of internal stress in this sample decreases after annealing as well as energy dissipation capability. The samples of A3003 alloy having recrystallized structure are characterized by lower share of dissipated energy compared to the samples with fragmented structure.

4-18

ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ: АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

А.Ю. Куксин¹, А.В. Янилкин^{2, 3}

¹Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия,

²Всероссийский институт автоматики им. Духова,
Москва, Россия

³Московский физико-технический институт,
Долгопрудный, Россия

E-mail: alexey.kuksin@gmail.com; aleyanilkina@gmail.com

В работе изучаются механизмы пластической деформации при ударно-волновом сжатии монокристаллических гцк металлов (Al, Cu) и сапфира Al₂O₃. Рассмотрение основывается на атомистическом моделировании методами молекулярной динамики и функционала электронной плотности. Проанализирована структура дефектов, образующихся за фронтом ударной волны. Проведены оценки скорости роста и критических напряжений, необходимых для зарождения и размножения дефектов.

В гцк металлах наблюдается образование дислокационных петель с большой областью, занимаемой дефектом упаковки. Их развитие (появление второй частичной дислокации или двойникование) зависит от кристаллографического направления, вдоль которого происходит сжатие. Зарождение петель происходит как по гомогенному [1], так и по гетерогенному механизмам. В некоторых случаях наблюдается распространение

первичного дефекта, не относящегося к определенной кристаллографической плоскости скольжения. С течением времени он расщепляется с образованием обычных дислокационных петель или двойников. В большинстве случаев дефекты распространяются медленнее, чем фронт ударной волны, что приводит к задержке фронтов упругой и пластической деформации.

В монокристаллическом сапфире наблюдается гомогенное зарождение и рост ромбоэдрических двойников. При моделировании ударно-волнового нагружения сапфира с микротрещиной выявлен механизм быстрой пластической деформации [2]. В этом случае зарождение и рост ромбоэдрических двойников происходит по двухстадийному механизму. На первой стадии (которая активируется на поверхности микротрещины) на фронте ударной волны происходит образование линейного дефекта нового типа. На втором этапе из линейного дефекта вырастают и объединяются друг с другом двойники. Структура, стабильность и энергетические характеристики дефектов сопоставляются с расчетами методом функционала электронной плотности. Они подтверждают возможность образования линейных дефектов при большой степени сжатия.

Работа поддержана программой фундаментальных исследований РАН и грантом РФФИ 11-08-12107-офи-м-2011.

Литература

1. Норман Г.Э., Янилкин А.В. Гомогенное зарождение дислокаций // Физика твердого тела, 2011. Т. 53. № 8. С. 1536–1541.
2. Kuksin A.Yu., Yanilkin A.V. Formation of twins in sapphire under shock wave loading: atomistic simulations // Journal of Applied Physics, 2012. V. 111. No. 3.

PLASTIC DEFORMATION UNDER SHOCK WAVE LOADING: ATOMISTIC SIMULATIONS

A. Yu. Kuksin¹, A.V. Yanilkin^{2,3}

¹Joint Institute for High Temperatures of RAS, Moscow, Russia

²All-Russia Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

³Moscow Institute of Physics and Technology,
Dolgoprudny, Russia

E-mail: alexey.kuksin@gmail.com; aleyanilkin@gmail.com

The mechanisms of the plastic deformation under shock compression of single crystalline fcc metals (Al, Cu) and sapphire Al₂O₃ are considered by means of atomistic simulations: molecular dynamics and density functional theory. The structure of defects formed after the shock front is analyzed. The growth rates and critical stresses required for nucleation and multiplication of defects are estimated.

Both homogeneous [1] and heterogeneous nucleation of dislocation loops with wide stacking fault area is observed in fcc metals. Their further transformations (formation of the second partial or twinning) depends on the crystallographic direction of the shock compression. In some cases the propagation of the leading defect (which do not belong to a certain crystallographic slip plane) is observed. Later it splits into a number of regular dislocation loops and twins. In most cases the defects propagate slower than the shock wave front resulting in a lag between the fronts of elastic and plastic deformation.

Homogeneous nucleation and growth of rhombohedral twins are observed in single crystal sapphire. A fast mechanism of plastic deformation is revealed under shock-wave loading of sapphire with microcrack [2]. Rhombohedral twins nucleate and grow as a result of a two stage process. At the first stage the formation of a new type of linear defect takes place in the shock wave front, which is initiated at the surface of the microcrack. At the second stage the rhombohedral twins grow from the primary linear defects and combine with each other. The possibility of the formation of linear defect under strong compression is confirmed by first principles calculations.

This work is supported by the Program for Basic Research of RAS and the RFBR grant 11-08-12107-ofi-m-2011.

References

1. Norman G.E., Yanilkin A.V. Homogeneous nucleation of dislocations // Physics of the Solid State, 2011. V. 53. No. 8. P.1614–1619.
2. Kuksin A.Yu., Yanilkin A.V. Formation of twins in sapphire under shock wave loading: atomistic simulations // Journal of Applied Physics, 2012. V. 111. No. 3.

4-19

ОБРАТНЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА-ПЕТЧА В УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ МЕТАЛЛАХ ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

И.Н. Бородин, А.Е. Дудоров, А.Е. Майер

Челябинский государственный университет,
Россия, Челябинск,

E-mail: elbor7@gmail.com

Обратный эффект Холла-Петча хорошо известен и наблюдается во многих нанокристаллических металлах, когда размер зерна становится меньшим нескольких десятков нанометров. Его принято связывать со сменой доминирующего механизма пластической деформации с дислокационного скольжения на проскальзывание по границам зерен. Большинство экспериментальных данных зависимости предела текучести металла от размера зерна получено при низких скоростях деформации 10⁻⁵–10⁻³ с⁻¹. С другой стороны, методы молекулярной механики позволяют определять подобные зависимости при высоких скоростях деформации, но размеры зерен здесь ограничены несколькими десятками нанометров; в этом случае зависимость предела текучести от размера для крупнокристаллических металлов, как правило, достраивают из экспериментальных данных, полученных при существенно более низких скоростях деформации.

Численное исследование пластической деформации на основе модели, учитывающей механизмы дислокационной пластичности и зернограничного проскальзывания, демонстрирует существование аномального эффекта Холла-Петча как в нанокристаллических, так и в субмикрокристаллических поликристаллах металлов. В области субмикрометровых размеров зерен этот эффект связан с дислокационным голоданием при высоких скоростях деформации, вызванным недостаточной эффективностью известных источников дислокаций.

Высокие значения предела текучести в этих областях могут привести как к активизации новых источников дислокаций, таких как гомогенная нуклеация, так и к новым механизмам пластической деформации, подобным двойникованию.

INVERSE HALL-PETCH RELATION IN ULTRAFINE GRAINED METALS AT HIGH STRAIN RATES

E.N. Borodin, A.E. Dudorov, A.E. Mayer

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: elbor7@gmail.com

Inverse Hall-Petch effect is well known, it was described for many nanocrystalline metals and alloys. It appears when the grain size of material becomes less than a few tens of nanometers, and it is usually associated with change of the dominant mechanism of plastic deformation from the dislocation glide to the grain boundary sliding.

Most experimental data for the grain size dependences of yield strength is obtained at low strain rates 10^{-5} s $^{-1}$ – 10^{-3} s $^{-1}$.

On the other hand, molecular dynamic (MD) simulations allow one to determine these dependences at extremely high strain rates. But the grain sizes available in MD are usually less than a few tens of nanometers, and the Hall-Petch relation remains uncertain for the coarse grained materials – it is typically extrapolated from the experimental data, which are obtained at much lower strain rates.

Our numerical study of plastic deformation demonstrates the existence of anomalous Hall-Petch effect both for nanocrystalline and ultrafine crystal metals at high strain rates (greater 10^7 s $^{-1}$). A numerical model was used, which takes into account both the dislocation plasticity and the grain boundary sliding.

In the submicron range of grain sizes, this effect is associated with a dislocation starvation at high strain rates caused by the lack of efficiency of known dislocation sources.

High values of the yield strength at these conditions can lead both to activation of new dislocation sources (homogeneous nucleation) and to new mechanisms of plastic deformation, such a twinning.

меров различают три физических состояния – стеклообразное, высокоэластическое и вязкотекучее. Каждому из перечисленных состояний соответствует свой набор микро-, мезо- и макроструктурных механизмов необратимого деформирования. При этом последовательно активируются механизмы деформирования, связанные не только с гибкостью макромолекул и конформационными переходами, но и с перемещениями и перестройками надмолекулярных образований. В квазистатических процессах переход из одного физического состояния в другое происходит при изменении температуры и сопровождается изменением микроскопических и макроscopicких свойств.

В докладе проводится обзор результатов построения моделей для описания динамического и ударно-волнового деформирования полимеров, основывающихся на развиваемых авторами максвелловских представлениях о механизмах необратимого деформирования. Модели включают формулировку уравнений, выражающих законы сохранения, учитывающих эффект релаксации касательных напряжений в процессе деформирования. Для замыкания моделей построены соответствующие определяющие соотношения – уравнения состояния при нешаровом тензоре деформаций и зависимости для времени релаксации касательных напряжений от параметров, характеризующих состояние среды. Построение зависимости для времени релаксации основывается на учете перечисленных выше структурных механизмов необратимого деформирования. В рамках сформулированных моделей решен ряд задач динамического и ударно-волнового деформирования, результаты которых сравниваются с соответствующими экспериментальными данными.

В заключение обсуждаются перспективы дальнейшего развития используемого подхода. Для учета наследственных свойств реальных полимеров и фрактальности их строения предполагается использовать аппарат производных и интегралов дробного порядка. Приводятся примеры определяющих соотношений с производными дробного порядка. Обсуждается влияние значения порядка производных на свойства определяющих соотношений.

Работа поддержана Интеграционным проектом СО РАН № 115.

DEVELOPMENT OF THE MAKSVELL APPROACH IN MODELS OF THE DYNAMIC DEFORMATIONS OF POLYMERS

L.A. Merzhievsky, M.S. Voronin, A.N. Korchagina

Lavrent'ev Institute of Hydrodynamics SB of RAS,
Novosibirsk, Russia

In the process of deformation under the influence of external loading polymeric mediums show the difficult behavior connected with features of their structure. These features are shown in variety of structural mechanisms of the deformation realized at different structural levels. For amorphous polymers distinguish three physical conditions – glasslike, highlyelastic and viscoplastic. To each of the listed conditions there corresponds to mikro, meso- and macrostructural mechanisms of irreversible deformation.

4-20

РАЗВИТИЕ МАКСВЕЛЛОВСКОГО ПОДХОДА В МОДЕЛЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРОВ

Л.А. Мержиевский, М.С. Воронин,

А.Н. Корчагина

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

В процессе деформирования под действием внешней нагрузки полимерные среды демонстрируют сложное поведение, связанное с особенностями их строения. Эти особенности проявляются в многообразии структурных механизмов деформирования, реализующихся на разных структурных уровнях. Для аморфных поли-

Thus the mechanisms of deformation connected not only with flexibility of macromolecules and conformational transitions, but also with movings and reorganizations of supramolecular formations are consistently activated. In quasistatic processes transition from one physical condition in another occurs at change of temperature and is accompanied by change of microscopic and macroscopical properties.

In the report the review of results of construction of models for the description of dynamic and shock-wave deformation of the polymers which are based on developed authors representations about mechanisms of irreversible deformation is made. Models include the formulation of the equations of conservation laws, considering effect of a relaxation of tangents stresses in the process of deformation. For closing of models the equations of states with nonspherical tensor of deformations and relation for time of a relaxation of tangents of stresses are constructed. Construction of relations for relaxation time is based on the account listed above structural mechanisms of irreversible deformation. With using of the formulated models a number of problems of dynamic and shock wave deformations has been solved. The results are compared with corresponding experimental date.

Development of the used approach are in summary discussed. To taking into account memory and fractal properties of real polymers is supposed of derivatives and integrals of a fractional order to use. Examples of constitutive equations with derivatives of a fractional order are presented.

This work is supported by the Integration project of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science № 115.

4-21

**ШИРОКОДИАПАЗОННЫЕ
ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ УРАВНЕНИЯ,
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ
И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ
МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ
ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

О.Б. Наймарк

Институт механики сплошных сред УрО РАН,
Пермь, Россия,

E-mail: naimark@icmm.ru

Обоснование определяющих уравнений механического и термодинамического поведения материалов при интенсивных воздействиях является в последнее десятилетие одним из ключевых направлений в физике ударных волн в связи с необходимостью учета многомасштабного поведения ансамблей мезодефектов на релаксационные свойства и разрушение материалов. Широкодиапазонные уравнения в интервале скоростей деформирования 10^3 – 10^9 с⁻¹ позволили установить связь структурной релаксации с механизмами пластического течения и локализации разрушения [1]. Показано, что кинетика многомасштабного развития ансамблей дефектов реализуется в условиях структурно-скейлинговых переходов – нового класса критических явлений

в системах с дефектами. Определяющие уравнения позволили описать переходы от термоактивационного режима пластического течения к автомодельным (steady plastic wave fronts) пластическим фронтам в диапазоне скоростей деформации 10^3 – 10^5 с⁻¹ и к перегрузочным (overdriven shock) волновым фронтам в диапазоне скоростей деформации 10^6 – 10^8 с⁻¹ [2]. Особенностью развитаго подхода (по сравнению с известными широкодиапазонными моделями, например, MTS-PTW-моделью) является неизменность формы термодинамического потенциала во всем указанном диапазоне скоростей деформирования и значительно меньшее количество материальных параметров (7 вместо 15 в MTS-PTW-модели). Экспериментальная верификация параметров широкодиапазонной модели проводилась с использованием данных оригинальных экспериментов по динамическому и ударно-волновому нагружению поликристаллического ванадия с исследованием скейлинговых закономерностей формирования дефектных структур по данным New View доплеровской интерферометрии и атомно-силовой микроскопии.

Исследования были поддержаны проектами РФФИ 11-01-92005, 11-01-712, а также программой Президиума РАН 09-П-1-1011.

Литература

1. Naimark O.B. Structural-scaling transition in mesodefekt ensembles as mechanism of relaxation and failure in shocked and dynamically loaded materials (experimental and theoretical study) // J. Phys. IV, France, 2006. – Vol. 134. – P. 3–9.
2. Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б., Уваров С.В. Численное моделирование откола, индуцированного мезодефектами при ударно-волновом нагружении металлов // Вычислительная механика сплошных сред. 2010. Т. 3. № 1. С. 13–23.

**WIDE-RANGE CONSTITUTIVE EQUATIONS,
EXPERIMENTAL VERIFICATION AND MATERIAL
MODELING UNDER INTENSE LOADING**

O.B. Naimark

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS,
Perm, Russia

E-mail: naimark@icmm.ru

One of the key problems in shock wave physics is the wide-range constitutive modeling of material responses taking into account the link of multiscale collective behavior of mesodefekts, relaxation properties and damage-failure transitions under intensive loading. The work presented here is intended to address the viscoplastic deformation and failure of metals in shock waves and construct wide-range constitutive models in the range of strain rates 10^3 – 10^9 s⁻¹ [1]. It was shown that the kinetics of multiscale defect evolution proceeds in the conditions of structural-scaling transitions, that is specific type of critical phenomena in condensed matter with defects. Wide-range constitutive model allowed the description of transitions from thermally-activated plastic flow related to the dislocation glide at lower deformation rates ($\sim 10^3$ s⁻¹) to the steady-state plastic fronts at strain rates ($\sim 10^5$ s⁻¹) and the flow response in very strong (overdriven) shock waves (strain rates 10^6 – 10^8 s⁻¹) [2]. Comparative analysis of MTS-PTW-models and

original model allowed us to link of hardening mechanisms, yield stresses under thermo-activation flow and nonlinearity of thermodynamic potential, the explanation of «the singularity» of transition to the self-similar («steady-state» plastic front) and «overdriven» shock wave fronts.

Comparative analysis of MTS-PTW-models and original model allowed us to establish the link of hardening mechanisms, yield stresses under thermo-activation flow and nonlinearity of thermodynamic potential, the explanation of transition to the self-similar («structured steady-state») and «overdriven» shock wave fronts .

The peculiarity of proposed model in the comparison with wide-range MTS-PTW model is the universality of statistically based thermodynamic potential in mentioned range of strain rates and essentially less number of material parameters (7 instead of 15 in MTS-PTW model). Experimental verification of wide-range constitutive model was obtained using the data of original experiments on dynamic and shock wave loading (in the recovery conditions) of polycrystalline vanadium and the following study of scaling regularities of defect structure formation (using New View and atomic force microscopy data) in corresponding ranges of strain rates.

The author would like to acknowledge the Russian Foundation for Basic Research (grant RFBR 11-01-92005, grant RFBR 11-01-00712) and the Program of Presidium RAS 09-II-1-1011.

References

1. Naimark O.B. Structural-scaling transition in mesodefekt ensembles as mechanism of relaxation and failure in shocked and dynamically loaded materials (experimental and theoretical study) // J. Phys. IV, France, 2006. – Vol. 134. – P. 3–9.
2. Bayandin Yu.V., Naimark O.B., Uvarov S.V. Numerical modeling of mesodefekt induced spall failure in shocked materials // Computational continuum mechanics, 2010. V. 3. N. 1. P. 13–23.

4-22

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТИТАНА МАРКИ VT1-0 И СТАЛИ 30ХГСА В РАЗЛИЧНЫХ ПОЛИМОРФНЫХ МОДИФИКАЦИЯХ

А.В. Павленко, А.Н. Пайгозин

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забахина,
Снежинск, Россия

E-mail: avpavlenko@vniitf.ru

Реалистичное прогнозирование поведения материалов требует адекватного учета фазовых переходов. Сталь 30ХГСА, как и железо, претерпевает полиморфное α - ϵ превращение при давлении порядка 13 ГПа с изменением плотности на 6%. Экспериментальные данные по фазовому α - ω превращению в титане достаточно противоречивы. Современные модели [1], учитывающие полиморфные превращения металлов в твердофазном состоянии, требуют тонкой настройки с использованием прецизионных экспериментальных данных. Данная работа посвящена исследованию профилей волн напряжений в стали 30ХГСА и техниче-

ски чистом титане марки VT1-0. Опыты проводились на легкогазовой пушке калибра 44 мм. Профили волн напряжений регистрировались с помощью двухканального лазерно-интерферометрического комплекса VISAR с разрешением по амплитуде и времени на уровне 6 м/с и 2 наносекунд соответственно. Условия проведения экспериментов подбирали таким образом, чтобы исследовать зависимости модулей сдвига, объемного сжатия откольной прочности материалов в различных полиморфных модификациях и вблизи границы полиморфного превращения.

Литература

1. Задорожный Г.А., Коваленко Г.В., Петровцев А.В. Моделирование полиморфных превращений в железе в широком диапазоне состояний // В трудах VII Забавихинских научных чтений, Снежинск, 2003.

DYNAMIC PROPERTIES OF VT1-0 TITANIUM AND 30HhGSA STEEL IN VARIOUS POLYMORPHIC MODIFICATIONS

A. V. Pavlenko, A. N. Paigozin

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

E-mail: avpavlenko@vniitf.ru

Realistic forecasting of materials behavior requires adequate consideration of phase transitions. The 30HhGSA steel (just the same as iron) undergoes the polymorphic α - ϵ transformation under the pressure of about 13 GPa with the density changing by 6%. Experimental data on the α - ω phase transformation in titanium turn out to be rather conflicting. The up-to-date models [1] that consider polymorphic solid-state transformations of metals require fine adjustment based on the high-precision experimental data. The task of this paper is to investigate profiles of stress waves in the 30HhGSA steel and the technically pure VT1-0 titanium. Experiments were performed with the light-gas gun having 44-mm caliber. Profiles of stress waves were registered with the help of the two-channel VISAR interferometric system with the ~ 6 m/s amplitude resolution and the ~ 2 ns time resolution, respectively. Experimental conditions were taken such that dependencies of shear modulus, volume compression, and spall strength of materials would be studied in different polymorphic modifications and near the polymorphic transformation boundary.

Reference

1. Petrovtsev A.V., Kovalenko G.V., Zadorozhny G.A. / Simulation of Polymorphous Transformations in Iron in a Wide Range of States / Proc. of ZST- 2003, Snezhinsk, Russia.
-

4-23

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВА В ОБЛАСТИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЙ, СОЗДАВАЕМЫХ ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА ПИКОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

С.А. Абросимов¹, А.П. Бажулин¹, В.В. Воронов¹,
И.К. Красюк¹, П.П. Пашинин¹, А.Ю. Семенов¹,
И.А. Стучебрюхов¹, К.В. Хищенко²

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
Москва, Россия

²Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

E-mail: krasyyuk@kapella.gpi.ru

Использование лазеров с короткой длительностью излучения дает уникальную возможность изучения прочностных свойств твердого тела при больших скоростях деформирования, недостижимых при других способах воздействия на исследуемые материалы. Динамическая прочность вещества в области предельно малых длительностей ударно-волновой нагрузки исследуется путем анализа откольных явлений при отражении импульсов сжатия от свободной поверхности мишени. После отражения импульса сжатия от тыльной поверхности внутри мишени генерируются растягивающие напряжения, которые могут привести к его внутреннему разрыву – отколу.

В сообщении представлены результаты экспериментальных исследований динамической механической прочности алюминия, сплава АМг6М, меди и полиметилметакрилата при воздействии на них импульсным лазерным излучением длительностью 70 пс. В предшествующих опытах авторов длительность лазерного импульса составляла 2,5 нс [1–3]. Использование более коротких импульсов позволило реализовать в настоящем исследовании скорости деформирования выше 10^7 с⁻¹. Эксперименты показали, что полученные экспериментальные данные укладываются на продолжение функциональных зависимостей исследуемых материалов, полученных при больших длительностях ударно-волнового воздействия [4]. Можно предположить, что в условиях проведенных экспериментов не происходит значительного упрочнения исследованных материалов.

Было выяснено, что поведение вещества в области отрицательных давлений при использовании методов лазерного воздействия зависит в большой степени от предыстории динамического нагружения, включающей в себя много факторов, среди которых существенное значение имеют как амплитуда, так и длительность импульса ударного сжатия мишени.

Литература

1. Вовченко В.И., Красюк И.К., Пашинин П.П., Семенов А.Ю. // Прикладная физика. 2009. № 1. С. 12–17.
2. Батани Д., Вовченко В.И., Канель Г.И. и др. // ДАН. 2003. Т. 389. № 3. С. 328–331.
3. Geras'kin A.A., Khishchenko K.V., Krasyyuk I.K. et al. // Contrib. Plasma Phys. 2009. V. 49. № 7–8. P. 451–454.
4. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996. 407 с.

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF MATTER IN THE FIELD OF NEGATIVE PRESSURES CREATED BY MEANS OF PICOSECOND LASER PULSE

I.K. Krasyyuk¹, S.A. Abrosimov¹, A.P. Bazhulin¹,
V.V. Voronov¹, P.P. Pashinin¹, A.Yu. Semenov¹,
I.A. Stuchebyukhov¹, K.V. Khishchenko²

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

²Joint Institute of High Temperatures RAS, Moscow, Russia

E-mail: krasyyuk@kapella.gpi.ru

The using of laser with short pulse duration gives a unique opportunity to study the strength properties of solid at high strength rate, unreachable when other ways to affect on the tested materials. Dynamic strength of materials at very small duration's shock-wave loadings is investigated by analysis of spall phenomena in reflection from the rear surface of the target. After reflection a compression pulse from the rear surface, in the inside of target a negative pressure is generated in targets that could lead to its internal rupture.

In this communication the results of experimental research of dynamic mechanical strength of aluminum, alloy AMg6M, copper and polymethylmethacrylate under the influence of pulse laser radiation with duration 70 ps are presented. In the us previous experiments laser pulse duration was 2.5 ns [1–3]. Shorter pulses have to realize in this study of strain rate above 10^7 1/s. Experiments have shown that experimental data are stacked on the continuation of the functional dependencies of material produced by large durations shock wave effects [4]. It can be assumed that the experiments are not a significant hardening of the examined materials. It was found that the behavior of the matter in the area of negative pressures when using methods of laser effects depend to a great extent on the prehistory of dynamic loading, which includes many factors, among which are essential as the amplitude, and pulse duration of shock compression of target.

References

1. Vovchenko V.I., Krasyyuk I.K., Pashinin P.P. Semenov A.Yu // Applied physics. 2009. № 1. P. 12–17.
2. Batani D., Vovchenko V.I., Kanel G.I. etc. // DAN. 2003. Vol. 389. No. 3. P. 328–331.
3. Geras'kin A.A., Khishchenko K.V., Krasyyuk I.K. et al. // Contrib Plasma Phys. 2009. V. 49. No. 7 – 8. P. 451–454.
4. Kanel G.I., Razoryonov S.V., Utkin A.V., Fortov V.E. Shock wave phenomena in condensed matter. M.: Janus-k, 1996. 407 p.

4-24

ОСОБЕННОСТИ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ БЕРИЛЛИЯ

В.А. Аринин, Д.В. Крючков, А.Н. Малышев,
В.А. Огородников, К.Н. Панов, В.В. Пешков,
В.А. Раевский, В.И. Скоков

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

В работе выполнены исследования откольного разрушения в образце бериллия Ø90×20 мм при нагружении детонационной волной заряда ВВ из ТГ 5/5 толщиной

12 и 100 мм, октогена толщиной 100 мм. Откольное разрушение в образце формировалось при его разгрузке в воздушный зазор. С помощью лазерного интерферометра Visar измерялся профиль скорости на свободной границе, толщина откольного слоя измерялась методикой двухкадровой импульсной рентгенографии, методикой манганинового датчика измерялся профиль ударно-волнового импульса во фторопластовом основании при торможении откольного слоя бериллия, методикой электроконтактного датчика определялось положение откольного слоя на два момента времени.

Получено, что при толщине ТГ 5/5 12 и 100 мм толщина откольного слоя, измеренная после прохождения им расстояния в 8 мм, почти не изменилась и составила 1,8 и 2,1 мм соответственно.

В опыте с зарядом из октогена было установлено, что в зависимости от пройденного расстояния x толщина откольного слоя в условиях отсутствия в нем растягивающих напряжений уменьшается в соответствии с соотношением .

PECULIARITIES OF SPALL FRACTURE OF BERYLLIUM

V.A. Arinin, D.V. Kryuchkov, A.N. Malyshev,
V.A. Ogorodnikov, K.N. Panov, V.V. Peshkov,
V.A. Raevsky, V.I. Skokov

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

Authors of this work performed investigations of spall fracture in a beryllium sample with $\varnothing 90 \times 20$ mm when loading HE charge made of TG 5/5 with thicknesses of 12 and 100 mm, HMX with thickness of 100 mm by detonation wave. Spall fracture was formed in the sample during its release into air gap. Laser interferometer Visar was used to measure velocity profile at the free boundary, thickness of the spall layer was measured by the technique of two-frame pulse X-ray radiography, the manganin gauge technique was used to measure profile of the shock-wave pulse in the fluoroplastic base when decelerating the beryllium spall layer, the technique of electrocontact gauge was used for determination of location of the spall layer at two times.

When TG 5/5 thicknesses were 12 and 100 mm, it was revealed that the spall layer thickness, which was measured after its traveling the distance of 8 mm, was nearly unchanged. It was equal to 1.8 and 2.1 mm, respectively.

It was observed in the test with a charge made of HMX that, depending on traveled distance x , thickness of the spall layer δ under the condition of absence of tensile stresses was described by the equation .

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ И ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ПРОБИВАНИИ КАК РЕЗУЛЬТАТ СТРУКТУРНО-КИНЕТИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ В АНСАМБЛЯХ МИКРОСДВИГОВ

М.А. Соковиков, В.В. Чудинов,
С.В. Уваров, О.А. Плехов, Е.А. Ляпунова,
Ю.В. Баяндин, О.Б. Наймарк

Институт механики сплошных сред УрО РАН,
Пермь, Россия

E-mail: sokovikov@icmm.ru

Работа посвящена экспериментальному и теоретическому изучению деформационного поведения материалов при высокоскоростном пробивании.

Проведено изучение пробивания преграды в виде формирования и выноса пробки при скоростях 101–260 м/с с регистрацией «in-situ» неоднородностей температурного поля с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP и системы измерения скорости VISAR. На оригинальной баллистической установке по изучению пробивания исследовались образцы из алюминия марки 6061, для которых были реализованы различные режимы импульсного нагружения, сопровождающиеся неустойчивостью пластического течения и выносом пробки. С применением доплеровской интерферометрии изучено изменение скорости движения тыльной поверхности в различные моменты времени в процессе выноса пробки. Сохраненные после эксперимента образцы подвергались микроструктурному анализу с помощью оптического интерферометра-профилометра и сканирующего электронного микроскопа с последующей обработкой 3D данных деформационного рельефа, что позволило получить оценку распределений градиентов пластической деформации в различные моменты времени при формировании и выносе пробки.

Обнаружено, что имеет место локализация пластической деформации в узкой области по образующей пробки. По мере продвижения пробки происходит как огрубление рельефа поверхности разрушения, так и увеличение локальных неоднородностей сдвиговых деформаций.

Проведено исследование автомодельных закономерностей процесса деформирования материалов при высокоскоростном ударе и численное моделирование появления областей неустойчивости пластического сдвига. Для этого использовалась ранее разработанная теория, в которой методами статистической физики и термодинамики необратимых процессов изучается влияние микросдвигов на деформационные свойства материалов.

Показано, что автомодельный характер поведения материалов при высокоскоростном ударе, характеризующийся, начиная с определенных скоростей соударения, слабой зависимостью сопротивления от условий нагружения, является следствием кинетических переходов в ансамблях микросдвигов.

В рамках рассматриваемой модели проведено также численное моделирование распространения полос

неустойчивости пластического сдвига как специфических волн пластической деформации, обладающих признаками уединенных волн.

Работа выполнена при частичной поддержке Программ Президиума РАН 09-П-1-1010; 09-П-1-1011; 09-Т-1-1005, грантов РФФИ 09-01-92005-ННС_a, 11-01-00712_a, 11-01-00153_a, 11-01-96005-р_урал_a.

INSTABILITY AND LOCALIZATION OF PLASTIC DEFORMATION UNDER HIGH-SPEED PERFORATION DUE TO STRUCTURAL-KINETIC TRANSITIONS IN MICROSHEAR ENSEMBLES

M.A. Sokovikov, V.V. Chudinov, S.V. Uvarov,
O.A. Plekhov, E.A. Lyapunova, Yu.V. Bayandin,
O.B. Naimark

Institute of Continuous Media Mechanics Russian Academy
of Sciences, Perm, Russia

In this work we study both experimentally and theoretically the deformation behavior of materials subjected to high-speed perforation.

The perforation of a target involving plug formation and ejection at impact velocities of 101–260 m/s was investigated. The «in-situ» measurements of temperature field inhomogeneities were made using a high-speed infrared camera CEDIP and a VISAR velocity interferometer system. The original ballistic set-up designed for studying perforation was used to test Al 6061 alloy samples in different impulse loading regimes followed by plastic flow instability and plug ejection. Changes in the velocity of a rear surface at different time of plug ejection were analyzed by means of Doppler interferometry techniques. The microstructure analysis of the recovered samples was performed using an optical interferometer-profilometer and a scanning electron microscope. Processing of 3D data obtained for the deformation relief at different time of plug ejection provided plastic strain gradient distribution estimates.

It has been found that the localization of plastic strain occurs in a thin region providing the plug formation. As the plug moves, the surface relief undergoes the roughening effect and the local inhomogeneities of shear deformation become larger.

The self-similarity mechanisms of deformation of materials subjected to high-velocity impact are examined, and the appearance of plastic shear instability regions is simulated numerically. To this end, a recently developed theory has been used, in which the influence of micros shears on the deformation behavior of the material is investigated by the methods of statistical physics and thermodynamics of irreversible processes.

It is shown that, starting with certain collision velocities, the self-similar behavior of the material under high-velocity impact only weakly depends on loading conditions and is attributed to kinetic transitions in micros shear ensembles.

The proposed model is used to simulate numerically the propagation of plastic shear instability bands as specific waves of plastic deformation with the features of solitary waves.

This work was supported by grants within the research programs of the Presidium of RAS (09-П-1-

1010; 09-П-1-1011; 09-Т-1-1005) and by the RFBR grant (09-01-92005-ННС_a).

4-26

НЕКОТОРЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗРУШЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ

Ху Хайбо, Тан Тъеган, Чен Йонтао,
Ван Янпин, Ли Кинжон

Лаборатория физики ударных волн и детонации
Научно-исследовательский Институт Физики Жидких Сред,
КАИФ, Китай

Экспериментально изучается поведение многостадийного разрушения цилиндрических металлических оболочек под действием взрывного нагружения в режиме самоорганизованных полос сдвига и обсуждаются соответствующие вопросы моделирования. С помощью оптической фотографии высокого разрешения было показано, что на средней стадии расширения оболочек под действием интенсивного взрывного нагружения типичные кольцевые деформации для полос сдвига, разрушающие стенку оболочки, могут быть не более ~20% для ТС4 и ~50% для стали #45. На более ранних этапах проходят и заканчиваются стадии конкурентного отбора единой ориентации и роста полос сдвига до некоторого определенного числа полос макро-сдвигового разрушения. В то время как на более позднем этапе типичные кольцевые деформации, соответствующие утечке продуктов детонации через трещины, обычно более 100%. Более детальные экспериментальные исследования показали, что толщина извлеченных фрагментов уменьшилась меньше, чем на 100%, но значение ее близко к величине деформации вокруг полос сдвига, выходящих на внешнюю стенку оболочки. Кажется, после выхода на сдвигового разрушения на наружную поверхность, фрагменты стенки оболочки ведут себя, как упругое «тело» при дальнейшем расширении стенки цилиндра. В таком процессе решающее значение играют скольжение на поверхности сдвигового разрушения и общее количество макро-разрушений в стенке цилиндра, а не пластические свойства материала оболочки. Эти аспекты должны быть основательно учтены при реалистичном численном моделировании разрушения металлических оболочек под действием высокоскоростной деформации при взрывном нагружении.

**SOME EXPERIMENTAL ASPECTS
ON FRACTURE MODELLING
OF CYLINDRICAL METAL SHELLS
UNDER EXPLOSIVE LOADING**

Hu Haibo, Tang Tiegang, Chen Yongtao,
Wang Yanping, Li Qinzghong

Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research,
Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang, Sichuan, China

The multi-stage fracture behavior of explosively loaded cylindrical metal shells in self-organized shear bands mode is studied experimentally and the corresponding modeling issues are discussed. With the help of high resolution optical photography diagnostic, it has shown that on the middle stage of shell expanding under intensive explosive loading the typical hoop strains for shear bands to break through shell wall might be no more than ~20% for TC4 and ~50% for 45#Steel, before which the early stage competitive selection of unitary orientation, growth of shear bands to macro shear fracture of some given number have developed and finished. While on the later stage, the typical hoop strains corresponding to the detonation products leakage through the fractures are usually more than 100%. More detailed experimental studies have shown that the recovery fragment thickness is decreased much less than 100%, but close to the value of the strain around the shear bands breaking through on outer shell wall. It seems that after the breaking through of the shear fracture, the shell wall fragments behavior likely as an elastic body during the further expanding of the cylinder wall. In such a process, the more dominating figure is played by the sliding behavior on the shear fracture surface and the total number of macro fracture in the cylinder wall rather than the plastic properties of shell material. These aspects should be properly taken into account in a reasonable numerical simulating of high strain rate fracture of metal shells under explosive loading.

4-27

**ПЛАСТИЧНОСТЬ СТАЛЬНЫХ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК,
НАГРУЖЕННЫХ ВЗРЫВОМ**

М.М. Бойко, Е.Ф. Грязнов, Е.В. Никитина

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
E-mail: sm4@sm.bmstu.ru

Одним из наиболее интересных способов исследования механических свойств материалов при скорости деформаций $10^4 \dots 10^6 \text{ c}^{-1}$ является взрывное нагружение оболочек. Исследованию пластичности металлических оболочек, нагружаемых взрывом, посвящено большое количество известных работ, в большинстве из которых отмечается заметное повышение уровня пластичности в динамических условиях: увеличение скорости деформаций при взрывном нагружении приводит к росту деформации разрушения [1]. В [2] показано, что при скорости деформаций примерно 10^4 c^{-1} в стальных оболочках достигается максимум деформации разрушения, названный пиком пластичности.

Характеристикой пластичности в известных работах служит радиус разрушения оболочек, который определяется экспериментально с применением высокоскоростной оптической съемки, или рентгеноимпульсной регистрации процессов. Радиус разрушения фактически эквивалентен одной из стандартных характеристик пластичности – относительному удлинению, то есть характеристике, являющейся нестабильной и существенно зависящей от размеров образца. Сравнительное обобщение практически всех известных работ, в которых за критерий оценки пластичности принято относительное удлинение, показало, что у многих металлов действительно наблюдается заметное повышение уровня пластичности по сравнению с исходными (статическими) значениями, причем данная тенденция наиболее ярко выражена у хрупких металлов. Однако, если за критерий пластичности принять другую стандартную характеристику – относительное сужение, которая определяется по толщине фрагментов, то наблюдается обратная тенденция: уровень динамического относительного сужения заметно ниже статического.

Для объяснения причин столь явных противоречий в оценке результатов исследований динамических характеристик пластичности в настоящей работе проведены экспериментальные исследования влияния параметров нагружения и исходных свойств ряда сталей на динамические характеристики относительного удлинения и сужения в широком диапазоне значений скорости деформаций. Показана существенная неоднородность деформаций в поперечном сечении оболочки, получены распределения микродеформаций и микротвердости материала в радиальном направлении. Исследован механизм зарождения и развития трещин в стенке оболочки, при этом показано, что начальный этап разрушения связан с ударно-волновыми эффектами, а заключительный этап разрушения – с локализацией сдвиговых деформаций и образованием полос адиабатического сдвига. Показано, что вследствие локализации деформаций металл в зоне полос адиабатического сдвига разогревается до расплавленного состояния.

Литература

1. Физика взрыва. Изд. 3-е исправленное / Под ред. Орленко Л.П. М.: Физматлит, т. 2. 2004.
2. Иванов А.Г. Особенности взрывной деформации и разрушения труб // Проблемы прочности. № 11. 1976.

**PLASTICITY OF CYLINDRICAL SHELLS,
LOADED EXPLOSION**

M.M. Boiko, E.F. Gryaznov, E.V. Nikitina

Bauman MSTU, Moscow, Russia
E-mail: sm4@sm.bmstu.ru

One of the most interesting ways of investigating the mechanical properties of materials at strain rates $10^4 \dots 10^6 \text{ s}^{-1}$ is an explosive loading shells. Study of the metal shells plasticity, loaded by the explosion, the subject of many famous works, most of which there is a marked increase in ductility under dynamic conditions: an increase in strain rate during explosive loading increases the fracture strain [1]. In [2] it is shown that the strain rates of about 10^4 s^{-1} in the steel shell reaches its maximum strain fracture, called a peak ductility.

Characteristic of plasticity in the well-known works is the fractures radius of shells, which is determined experimentally using high-speed optical data, or X-ray impulse registration process. The fractures radius is actually equivalent to one of the standard features of plasticity – elongation that is characteristic, which is unstable and essentially independent of sample size. A comparative synthesis of virtually all known works in which the criterion for plasticity made elongation, showed that many metals really seen a marked increase in ductility compared to the initial (static) values, and this trend is most pronounced in brittle metals. However, if the criterion of plasticity to the other standard features – relative narrowing, which is determined by the thickness of the fragments, it is bucking the trend: the dynamic level of contraction is much lower static.

To explain the reasons for the apparent contradictions in assessing the results of studies of dynamic plasticity characteristics in the present study, experimental study of the effect of initial loading parameters and properties of various steels in the dynamic characteristics of the elongation and contraction in a wide range of strain rates. That's shown a significant heterogeneity of strains in the cross section of the shell, obtained microdeformations distribution and microhardness of the material in the radial direction. The mechanism of nucleation and development of cracks in the wall of the shell, when it was shown that the initial stage of fracture associated with shock-wave effects, and the final stage of destruction – with the localization of shear deformation and the formation of adiabatic shear bands. It is shown that due to strain localization in metal bands adiabatic shear band is heated to a molten state.

References

1. Physics of the explosion. Ed. 3rd revised / by Ed. Orlenko L.P., Fizmatlit, v. 2. 2004.
2. Ivanov A.G. Features explosive deformation and fracture of pipes // Strength Problems. – № 11. – 1976.

4-28

ДИНАМИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ

А.Е. Майер¹, В.С. Красников^{1,2}

¹Челябинский государственный университет,
Челябинск, Россия

²Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

E-mail: mayer@csu.ru; vas.krasnikov@gmail.ru

Приводится модель динамического разрушения, которая применима для многих металлов в широком диапазоне скоростей деформации. В модели рассматриваются стадии термофлуктуационного образования, роста и объединения очагов разрушения. Модель содержит два параметра: поверхностное натяжение и параметр распределения ослабленных зон материала. Значения этих параметров найдены для меди, алюминия, железа, титана, никеля и молибдена путем сопоставления с экспериментальными данными и результатами мо-

лекулярно-динамического моделирования. Показано наличие в зависимости прочности от скорости деформации двух областей с различным наклоном кривой: в первой области (при скорости деформации $< 10^8$ с⁻¹) микроповреждения образуются в ослабленных зонах материала, и прочность быстро увеличивается с ростом скорости деформации, во второй области (при скорости деформации $> 10^8$ с⁻¹) количество ослабленных зон становится недостаточным и дефекты образуются преимущественно в бездефектных областях материала, рост прочности замедляется.

DYNAMIC FRACTURE OF METALS IN WIDE RANGE OF STRAIN RATE

A.E. Mayer¹, V.S. Krasnikov^{1,2}

¹Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

²South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: mayer@csu.ru; vas.krasnikov@gmail.ru

A model of dynamic fracture is constructed, which is applicable for many metals in wide ranges of strain rates and temperatures. Model considers a stage of thermo-fluctuation nucleation of voids and stages of voids growth and aggregation. It uses two fitted parameter for each substance: the first one is a surface tension; the second one is a distribution parameter for weakened zones of material. These parameters are found for copper, aluminum, iron, titanium, nickel and molybdenum by fitting with experimental data and molecular-dynamics simulations. It is shown, that there are two regions with different slope in the strain rate dependence of strength: in the first one (at strain rate $< 10^8$ s⁻¹) voids are nucleated in weakened zones, and strength grows up fast with strain rate; in the second one (at strain rate $> 10^8$ s⁻¹) number of weakened zones becomes insufficient, voids are nucleated predominantly in perfect material, and the strength growth is decelerated.

4-29

ОБ ОДНОЙ МОДЕЛИ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ

В.Ф. Куропатенко¹, И.В. Лавренюк²

¹Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²Южно-Уральский государственный университет,
Россия, Челябинск,

E-mail: v.f.kuropatenko@vniitf.ru; ivan.lavrenyuk@gmail.com

Прочность является одной из важнейших характеристик любого вещества, находящегося в твердом или жидком состоянии. Как правило, она проявляется при разнообразных динамических воздействиях на вещество, включающих импульсный нагрев потоком проникающих излучений, удар холодным ударником, нагружение ударной волной. При всех таких нагрузках в сплошной среде распространяются ударные волны и волны разрежения. При взаимодействии двух волн разрежения в веществе могут возникать отрицательные

давления, при которых вещество находится в метастабильном состоянии. Вследствие колебаний атомов возле положения равновесия при отрицательном давлении облегчается отрыв одного атома от другого и возникает «дырка». Совокупность таких «дырок» называется микроповрежденностью. Если вещество находится в области отрицательных давлений конечное время, то микроповрежденность растет, микропоры или микротрещины сливаются и их размер увеличивается. Процесс продолжается до тех пор, пока не возникает «большая» трещина и одна часть вещества отрывается (откалывается) от другой. Время от начала действия отрицательных напряжений до момента откола называется долговечностью.

Область отрицательных давлений ограничена зависимостью холодного давления от удельного объема линией, на которой давление равно нулю, и спинодали, на которой скорость звука обращается в ноль. В работе рассматривается модель прочности, которая в отличие от других известных моделей учитывает свойства вещества, проявляемые при приближении к спинодали. Частица вещества, двигаясь вдоль траектории в пространстве термодинамических переменных, не может пересечь спинодали. Она должна разрушаться, т. е. скорость роста поврежденности при приближении к спинодали должна стремиться к бесконечности. Такое поведение учитывается в уравнении для поврежденности. Рассмотрены случаи, когда отрицательные давления возникают при расширении вещества после облучения образцов потоком электронов, рентгеновским излучением и в системах ударник-мишень после выхода ударной волны на свободную поверхность мишени.

Работа поддержана РФФИ. Грант № 10-01-00032.

ABOUT ONE MODEL OF SPALL DESTRUCTION

V.F. Kuropatenko¹, I.V. Lavrenyuk²

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

²South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: v.f.kuropatenko@vniitf.ru;
ivan.lavrenyuk@gmail.com

Strength is one of the most important characteristics of any matter either in solid or liquid state. As a rule, strength shows itself under various dynamic impacts on the matter and these impacts include pulse heating by a penetrating radiation flow, stroke by a cold impactor, and shock wave loading. Under the above impacts, shock waves and rarefaction waves propagate in continuum. Matter is in the metastable state under negative pressures that can arise when two rarefaction waves interact. Due to atom oscillations near the equilibrium state, negative pressure facilitates the detachment of one atom from another and formation of a «hole». The family of these «holes» is called a micro damage. If matter is in the region of negative pressures for finite time, the micro damage grows, micro pores or micro cracks merge and their size increases. This process continues until a «large» crack is formed and one part of substance is detached (spalled) from another. The period from the negative stress onset till the time of spall itself is called the long-term strength.

Region of negative pressures is limited by the «cold pressure – specific volume» dependence, i.e. by a line where pressure is equal to zero and also by a spinodal where sound velocity turns to zero. The study describes a strength model, which, unlike other known models, takes into account matter properties that become apparent while approaching the spinodal. A matter particle moving along a trajectory in the space of thermo-dynamic variables cannot cross the spinodal. It shall be destructed, i.e. the rate of damage growth while approaching the spinodal shall tend to infinity. This behavior is taken into account in the damage equation. Consideration is given to cases when negative pressures arise if substance expands after samples are irradiated by a flow of electrons, X-radiation and in the impactor-target systems after the shock-wave arrival at the free surface of the target.

The work was supported by RFBR. Grant 10-01-00032.

4-30

О СИНЕРГЕТИЧЕСКИХ И АТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ В ДИНАМИЧЕСКИХ ДЕСТРУКТИВНЫХ ЯВЛЕНИЯХ

А.Я. Учаев, В.Т. Пунин,

Н.И. Сельченкова, Е.В. Кошелева

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

E-mail: uchaev@expd.vniief.ru

Результаты проведенных ранее исследований показали, что конденсированные среды, в том числе и металлы, проявляют универсальные синергетические признаки релаксации сильно неравновесных состояний путем деструктивных процессов. В свою очередь динамические деструктивные процессы в конденсированных средах на различных масштабно-временных уровнях носят кооперативный характер. Это обусловлено фрактальной природой ансамблей диссипативных структур, возникающих в результате высокоинтенсивного воздействия на конденсированные среды, их перколяционными свойствами, переходами неравновесной системы с одного масштабно-временного уровня на другой, подчиняющихся концентрационному критерию и тем, что вероятность состояния системы не пропорциональна функции распределения Больцмана [1, 2].

К кардинальному изменению реакции системы на внешнее воздействие приводит режим, когда ввод энергии не компенсируется релаксационными процессами. Характерные времена изменения параметра порядка существенно превышают время t_r , ω изменения управляющего параметра – энергии $\omega t = 1/\omega t \gg 1$, где t_r – скорость ввода энергии. ω – время релаксации,

Во фронте ударной волны невозможно ввести термодинамическую температуру, а можно ввести кинетические температуры частиц тела по направлению и перпендикулярно движению волны сжатия, которые имеют разное значение.

Поэтому проблематично говорить о термодинамических температурах в системах, подвергнутых высокоинтенсивному внешнему воздействию. Так, например,

в металлических образцах микронных масштабов, подвергнутых воздействию импульсов фемтосекундных лазеров, эти времена имеют значения $t_r \sim 10^{-10}$ с.

Следовательно, уравнения гидродинамики, основанные на принципе непрерывности, не применимы для описания быстропротекающих неравновесных процессов, для описания скачков давления, температуры, так как эти уравнения требуют локального термодинамического равновесия, что не выполняется в динамических деструктивных процессах.

В работе показано, что при увеличении интенсивности внешнего воздействия в системе нагруженного металла происходит кинетический фазовый переход, обусловленный режимами релаксации от многочастичного коррелированного поведения к некоррелируемому – атермическому, например, переход от явления динамического разрушения к процессам диспергирования.

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. Ильяев Р.И., Пунин В.Т., Учаев А.Я., Сельченкова Н.И., Платонова Л.А., Кошелева Е.В., Конкин А.С. Физическая природа долговечности металлов в явлении динамического разрушения // Ядерная физика и инжиниринг. 2010, том 1, № 2, с. 99–103.

ON SYNERGETIC AND ATHERMIC PROCESSES IN THE DYNAMIC FAILURE PHENOMENA

A.Ya. Uchaev, V.T. Punin,
N.I. Sel'chenkova, E.V. Kosheleva

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

E-mail: uchaev@expd.vniief.ru

The results of the earlier performed studies have shown that condensed media, also metals, manifest universal synergetic attributes of relaxation of strongly non-equilibrium states through failure processes. In its turn, dynamic failure processes in the condensed media on different time-scale levels are of cooperative character. This is conditioned by fractal nature of ensembles of dissipative structures, arising as a result of high-intense action on condensed media, by their percolation properties, transitions of non-equilibrium system from one-time-scale level onto another, subjected to a concentration criterion and by the fact that the system state probability is not proportional to the distribution function of Boltzmann [1, 2].

To a cardinal change of system response to external action there leads a mode, when energy input is not compensated by relaxation processes. Characteristic times of order parameter of change of governing parameter – ω change significantly exceed the time $\omega t = 1/ \gg 1$ ω energy \gg – energy input rate. $\omega 1$, where t_r – relaxation time.

It is impossible to introduce a thermodynamic temperature in the front of shock wave, and one can introduce kinetic temperatures of body particles in the line transversely to the motion of compression wave that have different values.

That is why it is problematic to speak about thermodynamic temperatures in the systems, exposed to high-intense external action. Thus, for example, in metal samples of micron scale, exposed to pulse action of femtosecond lasers, these times have values $t_r \sim 10^{-10}$ s.

Therefore, hydrodynamic equations, based upon the principle of continuity, are not applicable for description of fast non-equilibrium processes, as well as for description of pressure jumps, temperature, since these equations require local thermodynamic equilibrium, what is not observed in dynamic failure processes.

The paper demonstrates that when raising the intensity of external action in the system of loaded metal, there occurs a kinetics phase transition, conditioned by relaxation modes from multi-particle correlated behavior to non-correlated one – athermic, for example, going over from the dynamic failure phenomenon to the dispersion processes.

References

1. Il'kaev R.I., Punin V.T., Uchaev A.Ya., Novikov S.A., Kosheleva E.V., Platonova L.A., Selchenkova N.I., Yukina N.A. Time regularities of dynamic metals failure, conditioned on hierarchy properties of dissipative structures – failure centers cascade. // RAS, 2003, vol. 393, № 3. – P. 326–331.
2. Il'kaev R.I., Punin V.T., Uchaev A.Ya., Selchenkova N.I., Platonova L.A., Kosheleva E.V., Konkin A.S. Physical nature of metals longevity in the dynamic failure phenomenon // Nuclear Physics and engineering. 2010, vol. 1, № 2. – P. 99–103.

4-31

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ДОЛГОВЕЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ В ЯВЛЕНИИ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ

А.Я. Учаев, В.Т. Пунин, С.С. Соколов,
Н.И. Сельченкова, Е.В. Кошелева, Л.В. Жабька

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

E-mail: uchaev@expd.vniief.ru

В настоящее время является актуальным знание временной границы сохранения функциональных свойств металлов в экстремальных условиях, когда величина отклонения из равновесного состояния сравнима с энергией, например, фазового перехода.

Как правило, релаксация сильно неравновесных состояний сопровождается деструктивными процессами [1, 2].

Возможности современной высокоэнергетической импульсной научной техники напрямую связаны с долговечностью элементов, узлов, подвергаемых интенсивному воздействию. Следовательно, основной задачей исследования поведения металлов в экстремальных условиях является определение физических механизмов релаксации неравновесных систем, например, образцов металлов, подвергнутых высокоинтенсивному воздействию проникающих излучений.

Показано, что физическая природа долговечности металлов, находящихся в экстремальных условиях (взрывное нагружение, воздействие теплового удара) в диапазоне неравновесных состояний $t \sim 10^{-6} \div 10^{-10}$

с определена временем образования критической концентрации каскада центров разрушения, меняющей связность тела, являющийся перколяционным кластером.

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, том 393, № 3. – С. 326–331.
2. Ильяев Р.И., Пунин В.Т., Учаев А.Я., Сельченкова Н.И., Платонова Л.А., Кошелева Е.В., Конкин А.С. Физическая природа долговечности металлов в явлении динамического разрушения // Ядерная физика и инжиниринг. 2010, том 1, № 2, с.99–103.

PHYSICAL NATURE OF METALS LONGEVITY IN THE DYNAMIC FAILURE PHENOMENON

A. Ya. Uchaev, S.S. Sokolov, N.I. Sel'chenkova,
E.V. Kosheleva, L.V. Zhabyka

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

E-mail: uchaev@expd.vniief.ru

At present acute is the knowledge of time boundary of maintaining functional metal properties under extreme conditions, when the equilibrium state deviation value is comparable, for example, with phase transition energy.

As a rule, relaxation of strongly non-equilibrium states is accompanied by destruction processes [1, 2].

Capabilities of modern high-energy impulse scientific technology are directly associated with longevity of elements, units exposed to intense action. Consequently, the main problem of studying the metals behavior under extreme conditions is determining the physical mechanisms of non-equilibrium system relaxation, for example, metal samples exposed to high-level penetrating radiation.

It is shown that the physical nature of metals longevity under extreme conditions, (explosion loading, heat shock action) in the range of non-equilibrium state $t \sim 10^{-6}$ – 10^{-10} sec is specified by the time of forming critical concentration of failure centers cascade, changing the matter continuity, being a percolation cluster.

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 laws of dynamic metal failure conditioned by hierarchic properties of dissipative structures – failure center cascades // Academy of Sciences reports (DAN), 2003, vol. 393, N 3. – P. 326–331.
2. Il'kaev R.I., Punin V.T., Uchaev A.Ya., Sel'chenkova N.I., Platonova L.A. Kosheleva E.V., Konkin A.S. Physical nature of metals longevity in the dynamic failure phenomenon // Nucl. Phys. and Engineering. 2010, vol. 1, N 2, P. 99–103.

КРУПНОМАСШТАБНЫЕ МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ВЫБРОСА МАТЕРИАЛА

Оливер Дюран, Лоран Солар

CEA, DAM, DIF, Франция

Предлагается метод для моделирования ударно-волнового выброса материала с использованием крупномасштабных молекулярно-динамических (МД) расчетов. Образцы материала со свободной поверхностью, которая характеризуется заданной шероховатостью (качеством шлифовки), разбивается на две части – основную массу материала и приповерхностный слой. Первая часть моделируется с использованием метода Гюгониостата, что позволяет очень большому числу частиц через короткое время достичь равновесного состояния на ударной адиабате с помощью квазиравновесного МД расчета. Затем моделируется распространение ударной волны в NVE-ансамбле заданием основной массе материала движения со скоростью, соответствующей точке на ударной адиабате. С помощью этого метода проводятся исследования распределения размера частиц в системах, состоящих из 10^7 – 10^8 атомов, с различной глубиной дефектов для меди и олова. В случае олова используется потенциал, разработанный во ВНИИТФ. Результаты МД расчетов показывают, что полученные распределения размера частиц имеют вид различных степенных законов в зависимости от формы дефектов. В случае синусоиды степенной закон хорошо согласуется с теорией перколяции, в соответствии с которой формирование кластеров выброса происходит за счет крупномасштабных флуктуаций в окрестности критической точки, где нет преобладающего характерного размера. Использование квазиодномерного дефекта типа конуса приводит к совершенно другому закону распределения размера частиц, который свидетельствует об ином процессе разрушения.

LARGE SCALE MOLECULAR DYNAMICS SIMULATIONS OF SHOCK-INDUCED EJECTA PRODUCTION

Olivier Durand, Laurent Soulard

CEA, DAM, DIF, France

We propose a method for modelling shock-induced ejecta production using large scale molecular dynamics (MD) simulations. A material with a surface finish representative of the roughness arising from a machine polishing is divided into a bulk and a surface part. The bulk part is simulated using the Hugoniot technique, which allows a very large number of particles to reach a Hugoniot equilibrium state in a short physical time by the mean of a quasi-equilibrium MD simulation. Then the shock propagation is simulated in NVE ensemble by putting in motion the bulk part at the material velocity corresponding to the Hugoniot point. With this method, the particle size distribution generated by systems of about 10^7 – 10^8 atoms with different depths of defect is studied for copper and tin. Note that for the tin case we use a potential

function developed at VNIITF. Our MD results show that the particle size distributions exhibit various power laws depending on the defects shape. In the sinusoidal case the power law is in good agreement with the percolation theory. This theory suggests that the production of ejecta clusters is due to large-scale fluctuations present near a critical point, where there is no dominant characteristic scale. The use of quasi-one dimensional defect like conical shape leads to a strongly different particle size distribution law showing a different breaking process.

4-33

**ФАЗОВЫЕ, СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ
И ОСОБЕННОСТИ ОТКОЛЬНЫХ РАЗРУШЕНИЙ
ПЛАСТИН И ОБОЛОЧЕК ИЗ ЗАКАЛЕННОЙ
СТАЛИ 30ХГСА И СТАЛИ 12Х18Н10Т
ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ**

Е.А. Козлов¹, В.И. Таржанов¹, И.В. Теличко¹,
С.А. Бричиков¹, Д.С. Боярников¹, Д.П. Кучко¹,
А.В. Ольховский¹, В.Н. Ногин¹, А.В. Петровцев¹,
Д.М. Шалковский¹, А.В. Добромислов², Н.И. Талуц²

¹Российский федеральный ядерный центр – ВНИИ
технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: e.a.kozlov@vniitf.ru

В дополнение к [1–5], представлены данные о постановке взрывных экспериментов с плоскими образцами и модельными полусферическими оболочками из закаленной стали 30ХГСА и аустенитной стали 12Х18Н10Т различной исходной толщины, а также – результаты лазерно-интерферометрических измерений изменения во времени скоростей движения свободной поверхности образцов и внутренних границ стальных оболочек. Непосредственно при квазисферическом взрывном нагружении оболочек лазерно-интерферометрические измерения динамики их разгона осуществлены как под проекциями детонационных инициаторов, так и под проекциями мест четверных столкновений волн от смежных инициаторов.

Особое внимание, как и в [6], в работе уделено изучению материала сохраненных образцов и сошедшихся оболочек методами оптической и электронной (сканирующей и просвечивающей) микроскопии, методами измерения распределений твердости $H_v = H_v(r, \theta, \varphi)$ и микротвердости $H_\mu = H_\mu(r, \theta, \varphi)$.

В ходе материаловедческого исследования сохраненных образцов и оболочек получена важная дополнительная информация по толщинам и количеству образовавшихся в образцах и оболочках гладких отколов, необходимая для уточнения кинетики протекания обратного $\epsilon - \alpha'$ -фазового превращения.

Литература

1. Kozlov E.A. 2D- and 3D-explosive experiments for verification of spall and shear strengths models for some steels, Bull. Am. Phys. Soc., 2011, V. 56, No 6, P. 23, In: 17th Biennial International Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter, June 26 July 1, 2011, Chicago, Illinois, USA.

2. Kozlov E.A., Tarzhanov V.I., Telichko I.V., Pankratov D.G., Shear and spall strength of hardened 30KhGSA steel under explosive loading in the range of solid-solid phase transformation, In: Russian-US Conference on Materials Properties in Extremal Conditions, 6LAB Conference Engineering & Materials at Extreme Conditions, 23–28 October, 2011, Barcelona, Spain

3. Козлов Е.А., Таржанов В.И., Теличко И.В., Панкратов Д.Г., Сдвиговая и откольная прочности закаленной стали 30ХГСА при взрывном нагружении в области протекания твердофазного превращения, Деформация и разрушение материалов, 2012.

4. Kozlov E.A., Brichikov S.A., Zhilyaeva N.S., et al. Deterministic Perturbations Developing on Steel Shells under Quasispherical Explosive Loading. Investigation Results using Laser Interferometry and Gamma-Tomography. In: Russian-US Conference on Materials Properties in Extremal Conditions, 6LAB Conference Engineering & Materials at Extreme Conditions, 23–28 October, 2011, Barcelona, Spain

5. Козлов Е.А., Бричиков С.А., Боярников Д.С., Кучко Д.П., А.А. Дегтярев, Особенности динамики схождения стальных оболочек при их взрывном нагружении по результатам лазерно-интерферометрических измерений. ФММ, 2011, т.112, № 4, стр. 412–428 [Phys. Metals and Metallog. (Engl transl.), 2011, Vol. 112, No. 4, pp. 389–404].

6. Козлов Е.А., Теличко И.В., Горбачев Д.М., Панкратов Д.Г., А.В. Добромислов, Н.И. Талуц. К вопросу о метастабильности, неполноте протекания $\alpha - \epsilon$ -фазового превращения в нелегированном железе при пороговых импульсах нагрузки. Особенности деформационного поведения и структуры армо-железа, ФММ, 2005, т. 99, № 3, с. 83–97 [Phys. Met. & Metallog. (Engl transl.), 2005, Vol. 99, No. 3, pp. 300–313].

**PHASE, STRUCTURAL TRANSFORMATIONS,
AND PECULIARITIES OF SPALL FRACTURE
OF PLATES AND SHELLS OF QUENCHED STEEL
30KhGSA AND STEEL 12Kh18N10T UNDER
EXPLOSIVE LOADING**

Е.А. Козлов¹, В.И. Таржанов¹, И.В. Теличко¹,
С.А. Бричиков¹, Д.С. Боярников¹, Д.П. Кучко¹,
А.В. Ольховский¹, В.Н. Ногин¹, А.В. Петровцев¹,
Д.М. Шалковский¹, А.В. Добромислов², Н.И. Талуц²

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

²Institute of Metal Physics, Ural Branch of RAS,
Yekaterinburg, Russia

E-mail: e.a.kozlov@vniitf.ru

In addition to [1–5], the data on setups of experiments with plate samples and model hemispherical shells of quenched steel 30KhGSA and austenitic steel 12Kh18N10T of different initial thickness, as well as the results of laser-interferometric time-resolved measurements of free surface velocities of samples and shells are presented. Directly under quasi-spherical explosive loading of shells, the laser-interferometric measurements of acceleration dynamics of shells are realized both under projections of detonation initiators, and under projections of collisions of detonation waves from adjacent initiators.

Special attention, like in [6], is paid to investigation of the material recovered samples and converged shells by optical and electron (scanning and transmission) microscopy, as well as by methods measuring the distribution of hardness $H_v = H_v(r, \theta, \varphi)$ and microhardness $H_\mu = H_\mu(r, \theta, \varphi)$.

During the material science investigation of the recovered samples and shells, the important additional information on thicknesses and the number of smooth spalls formed in samples and shells, necessary for clarification of the inverse $\epsilon - \alpha'$ phase transition kinetics, was obtained.

References

1. Kozlov E.A. 2D- and 3D-explosive experiments for verification of spall and shear strengths models for some steels, *Bull. Am. Phys. Soc.*, 2011, V. 56, No 6, P. 23, 17th Biennial International Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter, June 26–July 1, 2011, Chicago, Illinois, USA.
2. Kozlov E.A., Tarzhanov V.I., Telichko I.V., Pankratov D.G. Shear and spall strength of hardened 30KhGSA steel under explosive loading in the range of solid-solid phase transformation, In: Russian-US Conference on Materials Properties in Extremal Conditions, 6LAB Conference Engineering & Materials at Extreme Conditions, 23–28 October, 2011, Barcelona, Spain.
3. Kozlov E.A., Tarzhanov V.I., Telichko I.V., Pankratov D.G. Shear and spall strengths of hardened 30KhGSA steel under explosive loading in the range of solid-phase transformation, *Russ. J. Deformation and Fracture of Materials*, 2012.
4. Kozlov E.A., Brichikov S.A., Zhilyaeva N.S., Khardina L.V., Brezgina L.P., Povyshev V.N., Dobromyslov A.V., Taluts N.I. Deterministic Perturbations Developing on Steel Shells under Quasispherical Explosive Loading. Investigation Results using Laser Interferometry and Gamma-Tomography. In: Russian-US Conference on Materials Properties in Extremal Conditions, 6LAB Conference Engineering & Materials at Extreme Conditions, 23-28 October, 2011, Barcelona, Spain.
5. Kozlov E.A., Brichikov S.A., Boyarnikov D.S., Kuchko D.P., and Degtyarev A.A. Features in Convergence Dynamics of Steel Shells under their Explosive Loading. Results of Laser-Interferometric Measurements, *Phys. Met. & Metall. (Engl transl.)*, 2011, Vol. 112, No. 4, pp. 389–404.
6. Kozlov E.A., Telichko I.V., Gorbachev D.M., Pankratov D.G., Dobromyslov A.V., and Taluts N.I. On the Metastability and Incompleteness of the $\alpha - \epsilon$ Phase Transformation in Unalloyed Iron under the Effect of Threshold Loading Pulses: Specific Features of the Deformation Behavior and Structure of Armco Iron, *Phys. Met. & Metall. (Engl transl.)*, 2005, v. 99, No. 3, pp. 300–313.

4-34

ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ МЕДИ В УСЛОВИЯХ НАГРУЖЕНИЯ СФЕРИЧЕСКИ СХОДЯЩИМИСЯ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

А.В. Добромыслов¹, Н.И. Талуц¹, Е.А. Козлов²

¹Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ.
Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

E-mail: Dobromyslov@imp.uran.ru; e.a.kozlov@vniitf.ru

Представлены результаты по изучению высокоскоростной пластической деформации поликристаллической меди. Образец в виде шара диаметром 70 мм был подвергнут нагружению сферически сходящимися ударными волнами. Начальное давление на поверхности шара составляло ~60 ГПа. В работе сделаны расчетные оценки изменения во времени давления на границе медного шара и для ряда выделенных лагранжевых частиц. Сохраненный образец изучали методами рентгено-

структурного анализа, оптической и просвечивающей электронной микроскопии и измерением микротвердости вдоль радиального направления. Установлено, что нагружение сферическими ударными волнами приводит к увеличению микротвердости меди по сравнению с исходным состоянием в два раза, при этом величина микротвердости не зависит от глубины залегания слоя в шаре. Изучение деформационной структуры на разных масштабных уровнях показало, что основным механизмом высокоскоростной пластической деформации поликристаллической меди при использованном способе нагружения является скольжение и, в меньшей степени, двойникование. В приповерхностных слоях образца наблюдаются тонкие двойники, образующиеся по нескольким системам двойникования. С увеличением глубины залегания слоя в шаре количество следов скольжения и двойников увеличивается. При электронно-микроскопическом исследовании обнаруживается изменение микроструктуры в зависимости от глубины залегания слоя в шаре. Микроструктура высоко расположенных слоев характеризуется высокой плотностью дислокаций, образованием микрополос и присутствием небольшого количества микродвойников. Установлено, что двойники и микрополосы в меди образуются по плоскостям {111}. Микроструктура глубоко расположенных слоев характеризуется увеличением плотности дислокаций и микрополос, при этом границы микрополос становятся более четкими. Микродвойники в структуре этих слоев отсутствуют. В слоях вблизи полости наблюдается образование полигональных границ.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта ОФИ УрО РАН № 11-2-35-ЯЦ.

DEFORMATION BEHAVIOUR OF COPPER LOADED BY SPHERICAL CONVERGING SHOCK WAVES

A.V. Dobromyslov¹, N.I. Taluts¹, E. A. Kozlov²

¹Institute of Metal Physics, Ural Branch of RAS, Russia,
Yekaterinburg, Russia

²Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia
Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia
E-mail: Dobromyslov@imp.uran.ru; e.a.kozlov@vniitf.ru

High-strain-rate plastic deformation of poly-crystalline copper is studied and results of this investigation are presented. The sample in the form of a sphere with the 70-mm diameter was loaded by spherical converging shock waves. The initial pressure on the ball surface was ~60 GPa. Pressure variation in time on the boundary of the copper ball and a number of fixed Lagrangian particles are calculated. The recovered sample was studied using X-ray diffraction analysis, optical and transmission electron microscopy, and microhardness measurements along the radial direction. Loading by spherical shock waves is stated to increase copper microhardness by a factor of two as compared to that in the initial state and microhardness is stated to be independent of the layer depth in the ball. Studying the deformation structure at different scale levels demonstrated that the basic mechanism of high-strain-rate plastic deformation of polycrystalline copper under these loading conditions is slip and, in a less degree, twinning. Thin twins

being formed by several twinning systems are observed in the surface layers of the sample. The number of both slip traces and twins increases with the layer depth. The electron-microscopic study revealed changes in the microstructure depending on the layer depth in the ball. The microstructure of the subsurface layers is characterized by: high density of dislocations, formation of microbands, and presence of few microtwins. It is established that twins and microbands in copper are formed on planes $\{111\}$. The microstructure of the deeper layers is characterized by increased density of dislocations and microbands; boundaries of microbands also become more distinct. Microtwins in the structure of these layers are absent. Polygonal boundaries are observed to form in the near-cavity layers.

This effort was partially supported by OBR Program of RAS Ural Division, Project # 11-2-35-NC.

4-35

**ФАЗОВОЕ α - ϵ ПРЕВРАЩЕНИЕ
И ОСОБЕННОСТИ ОТКОЛЬНОГО
РАЗРУШЕНИЯ ВЫСОКОЧИСТОГО
НЕЛЕГИРОВАННОГО ЖЕЛЕЗА ПРИ
ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ**

Е.А. Козлов¹, В.И. Таржанов¹, И.В. Теличко¹,
Д.Г. Панкратов¹, А.В. Петровцев¹, И.Г. Бродова²,
А.В. Добромислов², Н.И. Талуц², Дж.Т. Грэй III³,
М.А. Зохер³

¹Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

³Лос-Аламоская национальная лаборатория,
Лос Аламос, США

E-mail: e.a.kozlov@vniitf.ru

В дополнение к [1, 2] представлены результаты систематических экспериментальных исследований зарождения и развития откольных и сдвиговых разрушений клиновых образцов из высокочистого нелегированного железа при их высокоскоростном деформировании в области исходной α -фазы и в области протекания обратимого α - ϵ -фазового превращения.

Проведен анализ зарегистрированных методикой оптического рычага волновых процессов в клиновых образцах непосредственно при их взрывном нагружении, а также – результатов исследований методами оптической и электронной микроскопии сохраненных образцов с реализацией в них откольных и сдвиговых повреждений различной полноты.

Полученные результаты необходимы для верификации современных многоуровневых прочностных моделей и сертификации двумерных программных комплексов.

Благодарности. Исследования выполнены на образцах, изготовленных в РФЯЦ – ВНИИТФ из заготовки высокочистого нелегированного железа, поставленной из LANL в ходе проведения работ по контракту Lab to Lab с LANL № I 00530009-35.

Литература

1. Козлов Е.А., Таржанов В.И., Теличко И.В., и др. Кинетика упругопластической деформации, фазового превращения, а также откольные разрушения, структура и свойства высокочистого железа и стали 30ХГСА. Результаты экспериментальных и расчетно-теоретических исследований поведения и свойств железа и стали 30ХГСА при динамическом нагружении, Итоговый отчет РФЯЦ – ВНИИТФ по Контракту I00530009-35 с LANL, 2000, 336 с.
2. Козлов Е.А., Теличко И.В., Горбачев Д.М., Панкратов Д.Г., Добромислов А.В., Талуц Н.И. К вопросу о метастабильности, неполноте протекания α - ϵ -фазового превращения в нелегированном железе при пороговых импульсах нагрузки. Особенности деформационного поведения и структуры армо-железа, ФММ, 2005, т. 99, № 3, с. 83–97 [Phys. Met. & Metall. (Engl. transl.), Vol. 99, No. 3, 2005, pp. 300–313].

**PHASE α - ϵ TRANSITION AND PECULIARITIES
OF SPALL FRACTURE OF HIGH-PURITY
UNALLOYED IRON UNDER EXPLOSIVE LOADING**

E.A. Kozlov¹, V.I. Tarzhanov¹, I.V. Telichko¹,
D.G. Pankratov¹, A.V. Petrovtsev¹, I.G. Brodova²,
A.V. Dobromyslov², N.I. Taluts², G.T. Gray III³,
M.A. Zocher³

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

²Institute of Metal Physics, Ural Branch of the RAS,
Yekaterinburg, Russia

³Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, USA

In addition to [1, 2], the results of systematic experimental research of spall and shear fracture nucleation and development in wedge samples of high-purity unalloyed iron at their high-rate strain in the α -phase and in the region of reversible α - ϵ -phase transition are presented.

The wave processes recorded by the optical lever method in the wedge samples directly under their explosive loading and the results of optical and scanning electron microscopy studies of the recovered samples with realization of spall and shear damages of different completeness are analyzed.

The obtained results are necessary for verification of the recent multi-scale strength models and certification of 2D-software complexes.

Acknowledgements. The research was carried out on samples manufactured at RFNC – VNIITF from a billet of high-purity unalloyed iron supplied from LANL during Lab-to-Lab VNIITF – LANL Contract # I00530009-35.

References

1. Kozlov E.A., Tarzhanov V.I., Telichko I.V. et al., Kinetics of Elastoplastic Deformation, Phase Transformation, and Spalling Phenomena, Structure, and Properties of High-Purity Iron and Steel 30KhGSA. Results of Experimental and Theoretical Investigations of the Behavior and Properties of Iron and Steel 30KhGSA under Dynamic Loading, Final Report RFNC – VNIITF, 2000, 336 p.
2. Kozlov E.A., Telichko I.V., Gorbachev D.M., Pankratov D.G., Dobromyslov A.V., and Taluts N.I. On the Metastability and Incompleteness of the α - ϵ Phase Transformation in Unalloyed Iron under the Effect of Threshold Loading Pulses: Specific Features of the Deformation Behavior and Structure of Armco Iron, Phys. Met. & Metall. (Engl. transl.), 2005, v. 99, No. 3, pp. 300–313.

4-36

**ЧИСЛЕННОЕ 2D-МОДЕЛИРОВАНИЕ
ОТКОЛЬНЫХ РАЗРУШЕНИЙ В ОБРАЗЦАХ
ИЗ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ 30ХГСА HRC 35...40
ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ В ОБЛАСТИ
ПРОТЕКАНИЯ ОБРАТИМОГО α - ε -ФАЗОВОГО
ПРЕВРАЩЕНИЯ**

Е.А. Козлов¹, О.В. Ольхов², С.С. Соколов²,
М.А. Аношин², Л.Я. Габзетдинова², Н.С. Жилиева¹,
Л.В. Хардина¹, Д.М. Шалковский¹, Е.В. Шувалова²

¹Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

E-mail: e.a.kozlov@vniitf.ru; ololeg@vniief.ru

В развитие совместных исследований ВНИИЭФ и ВНИИТФ [1], в данной работе кратко описана постановка и представлены первые результаты численных расчетов по двум двумерным методикам ИТМФ–ВНИИЭФ [2, 3] и одной методике ВНИИТФ [4] волновых процессов в клиновых образцах из закаленной стали 30ХГСА HRC 35...40 при их нагружении через экран из стали 12Х18Н10Т нормальной детонацией слоев ВВ различной мощности и толщины. Проведено сопоставление получаемых в расчетах данных между собой и с зарегистрированными экспериментально [5–7] при нагружении клиновых образцов по профилям волн напряжений, включая данные:

- по кинетике релаксации напряжений на фронтах упругого и фазового предвестников с различных исходных состояний,
- по затуханию по толщине клина основной пластической волны,
- по профилям разгрузки,
- по форме и параметрам сигнала откола,
- по откольной прочности и толщине первого откола, их изменению по толщине клинового образца,
- положению на клиньях зон откольных и сдвиговых микро-, мезо- и макроповреждений, их изменению при варьировании условий взрывного нагружения.

Литература

1. Аношин М.А., Габзетдинова Л.Я., Козлов Е.А., Куратов С.Е., Ольхов О.В., Соколов С.С., Таржанов В.И., Шувалова Е.В. Численное моделирование процессов разрушения в экспериментах с нагружаемыми ударной волной клиновыми образцами, Деформация и разрушение материалов, 2011, №. 7, с. 23–30.
2. П.А. Авдеев, М.В. Артамонов, С.М. Бахрах и др. Комплекс программ ЛЭГАС для расчета нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды и принципы реализации комплекса на многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью, Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов, 2001, вып. 3, с. 14–18.
3. Соколов С.С., Воропинов А.А., Новиков И.Г., Панов А.И., Соболев И.В., Пушкарёв А.А. Методика ТИМ-2D для расчёта задач механики сплошной среды на нерегулярных многоугольных сетках с произвольным количеством связей в узлах, Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2006, вып.4, с. 29–44.

4. Быченков В.А., Гаджиева В.В. Метод СПРУТ расчета двумерных неустановившихся течений разрушаемых сред, ВАНТ. Сер. «Методики и программы численного решения задач математической физики», 1978, вып. 2 (2).

5. Kozlov E.A. 2D- and 3D-explosive experiments for verification of spall and shear strengths models for some steels, Bull. Am. Phys. Soc., 2011, V. 56, No 6, P. 23, 17th Biennial International Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter, June 26 – July 1, 2011, Chicago, Illinois, USA.

6. Kozlov E.A., Tarzhanov V.I., Telichko I.V., Pankratov D.G., Shear and spall strength of hardened 30KhGSA steel under explosive loading in the range of solid-solid phase transformation, In: Russian-US Conference on Materials Properties in Extremal Conditions, 6LAB Conference Engineering & Materials at Extreme Conditions, 23-28 October, 2011, Barcelona, Spain.

7. Козлов Е.А., Таржанов В.И., Теличко И.В., Панкратов Д.Г. Сдвиговая и откольная прочности закаленной стали 30ХГСА при взрывном нагружении в области протекания твердофазного превращения, Деформация и разрушение материалов, 2012.

**NUMERICAL 2D SIMULATION OF SPALL
DAMAGE IN SAMPLES OF QUENCHED STEEL
30KhGSA HRC 35...40 AT EXPLOSIVE LOADING
IN REGION OF REVERSIBLE
 α - ε -PHASE TRANSITION**

Е.А. Козлов¹, О.В. Ольхов², С.С. Соколов²,
М.А. Аношин², Л.Я. Габзетдинова²,
Н.С. Жилиева¹, Л.В. Хардина¹,
Д.М. Шалковский¹, Е.В. Шувалова²

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

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

E-mail: e.a.kozlov@vniitf.ru; ololeg@vniief.ru

In the framework of joint research by VNIIEF and VNIITF [1], the present paper provides a brief description of setups and the first results of numerical simulations utilizing two 2D ITMF–VNIIEF methods [2,3] and one VNIITF method [4] of wave processes in wedge samples of quenched steel 30KhGSA HRC 35...40 at their loading through the base plate of steel 12Kh18N10T by normal detonation of HE layers of different type and thickness. The results of simulation are compared with each other and with the experimental data [5–7], obtained under loading wedge samples. We analyzed: stress wave profiles, including data on:

- kinetics of stress relaxation at elastic and phase precursor fronts from different initial states;
- attenuation of the main plastic wave versus the wedge thickness;
- release profiles;
- shape and parameters of spall signal;
- spall strength and thickness of the first spall, and their change versus the wedge sample thickness;
- arrangement of spall areas and shear micro-, meso- and macrodamage, their change at different conditions of explosive loading conditions.

References

1. Anoshin M.A., Gabzhetdinova L.Ya., Kuratov S.E., Olkhov O.V., Sokolov S.S., Shuvalova E.V., Kozlov E.A., Tarzhanov V.I. Numerical simulation of material fractures in experiments with

wedge samples under shock wave loading, *Russ. J. Deformation and Fracture of Materials*, 2011, v. 7, pp. 23–30.

2. Avdeev P.A., Artamonov M.V., Bakhrakh S.M., et al. Complex of LEGAK codes to calculate unsteady flows of many-component continuum and principles of this complex realization on multiprocessor computers with distributed memory, *VANT, Series «Mathematical modeling of physical processes»*, 2001, issue 3. pp. 14–18.

3. Sokolov S.S., Voropinov A.A., Novikov I.G., Panov A.I., Sobolev I.V., Pushkarev A.A. TIM-2D technique to solve continuum mechanics problems on the irregular multangular meshes with an arbitrary number of bonds in nodes, *VANT, Series «Mathematical modeling of physical processes»*, 2006, issue 4, pp. 29–44.

4. Bychenkov V.A., Gadzhieva V.V. SPRUT-method to calculate 2D unsteady flows of media being destructed. *VANT, Series «Numerical solution techniques and prog-rams for mathematical physics problems»*, 1978, issue 2 (2)

5. E.A. Kozlov, 2D- and 3D-explosive experiments for verification of spall and shear strengths models for some steels, *Bull. Am. Phys. Soc.*, 2011, v. 56, No 6, p. 23. In: 17th Biennial International Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter, June 26 – July 1, 2011, Chicago, Illinois, USA.

6. Kozlov E.A., Tarzhanov V.I., Telichko I.V., Pankratov D.G. Shear and spall strength of hardened 30KhGSA steel under explosive loading in the range of solid-solid phase transformation, In: *Russian-US Conference on Materials Properties in Extremal Conditions*, 6LAB Conference Engineering & Materials at Extreme Conditions, 23–28 October, 2011, Barcelona. Spain.

7. Kozlov E.A., Tarzhanov V.I., Telichko I.V., Pankratov D.G. Shear and spall strengths of hardened 30KhGSA steel under explosive loading in the range of solid-phase transformation, *Russ. J. Deformation and Fracture of Materials*, 2012.

в замкнутом цилиндрическом объеме жесткой обоймы жестким же поршнем. При этом сам образец опирается на жесткое основание. Другим способом как-то приблизиться к истине является применение системы соотношений между размерами элементов разрушенной среды и геометрии образца.

В докладе излагаются способы испытаний образцов, в том числе и из разрушенных материалов, позволяющие учесть влияние на результаты испытаний практически неустраняемого при нагружении трения, жесткости основания и стенок цилиндра. Принимая некоторые достаточно правдоподобные упрощающие предположения, авторам удалось разработать методику испытаний, позволяющую учесть перечисленные выше факторы и даже связность грунта, если она имеется. Разработанный алгоритм может также использоваться при рассмотрении деформаций сыпучей среды в цилиндрических трубах и смежных задач. Предлагаемая схема экспериментального исследования была проверена на практике при нагружении щебня определенного гранулометрического состава.

DETERMINING THE DESTRUCTION CHARACTERISTICS FOR THE AXIALLY COMPRESSED MEDIUM

S.N. Kosorukov, A.A. Shakhov

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

4-37

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРУШЕННОЙ СРЕДЫ ОСЕВЫМ СЖАТИЕМ

С.Н. Косоруков, А.А. Шахов

Российский федеральный ядерный центр – ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

Известно, что расчеты взрывов на выброс являются одним из случаев, требующих досконального знания свойств грунтов и горных пород, определяющих поведение не только в процессе разрушения при малых деформациях, но и при больших деформациях в процессе разлета перемещаемого материала. Задача построения математической модели разрушенных горных пород являлась основной при выполнении проекта Международного научно-технического центра № 1124, руководителем которого был д.ф.-м.н Ю.С. Вахрамеев. Одним из направлений этого проекта являлось определение модуля объемного сжатия в постановке, близкой к определению модуля Юнга при одноосном сжатии, и коэффициента Пуассона. К сожалению при реальных попытках определения этих характеристик возникают проблемы как с получением однородного напряженно-деформированного состояния, так и измерением напряжений в среде и ее перемещений. В большинстве случаев и сейчас исследователи грунтов используют давно известный способ компрессии испытуемой среды

Calculations of excavation explosions are known to be a case that requires thorough knowledge of the soil-and-rock properties, since they precondition the behavior both in the process of destruction under low deformations, and in the process of displaced material scattering under high deformations. Developing the mathematical model of the destructed rocks was the major objective of ISTC Project #1124; principal investigator of this project was Yu.S. Vakhromeev, Doctor of Physics and Mathematics. Another objective of this project was to determine the Poisson coefficient and the bulk compression modulus in a setup being close to that one intended to determine Young's modulus under monoaxial compression. Unfortunately, real attempts to determine these characteristics encountered difficulties both in attaining the uniform stress-strain state, and in measuring stresses in a medium and also in measuring its displacement. In the majority of cases, soil-and-rock scientists use a well-known method when they compress a test medium in a closed cylindrical volume inside a rigid jacket by a rigid piston. The sample itself rests on a rigid base. Another method to find out the truth is to use the system of ratios between the sizes of destructed medium elements and the sample geometry.

The paper describes methods of testing samples including those of destructed materials. These methods take into account the role of friction, as well as rigidity of the cylinder base and walls that are practically inevitable under loading. Some reasonably good simplifying assumptions allowed the authors to develop a testing technique that is capable of considering the above factors and even soil tenacity if any. The developed algorithm can be also used

to consider deformation of a loose medium in cylindrical tubes and for other related tasks. The proposed experimental approach was experienced to load the crushed rock with a certain granulometric composition.

4-38

САМООРГАНИЗОВАННАЯ КРИТИЧНОСТЬ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ПЛАВЛЕННОГО КВАРЦА

С.В. Уваров, М.М. Давыдова

Учреждение Российской академии наук Институт механики сплошных сред, Пермь, Россия

Закономерности фрагментации изучались на составных стеклянных образцах, нагруженных по схеме «прямого удара». В процессе эксперимента регистрировалась механолюминесценция, связанная с разрушением образца с временным разрешением 1 нс. Было обнаружено, что процесс разрушения происходит за время, на 3–4 порядка больше чем время пробега упругой волны по стержню. Также частота возникновения импульсов неоднородна. Имеют место всплески, похожие на лавины, включающие в себя сотни и тысячи единичных событий (импульсов механолюминесценции). Было решено провести сравнительный анализ статистических закономерностей образования новых поверхностей (распределение интервалов между событиями и частота событий) с распределением фрагментов по размерам. Было обнаружено, что в обоих случаях имеется степенной вид распределения, характерный для т.н. самоорганизованной критичности (термин введен Бакком при анализе сейсмических сигналов).

SELF-ORGANIZED CRITICALITY IN THE MECHANOLUMINESCENCE OF SHOCKED QUARZ ROD

S.V. Uvarov, M.M. Davydova

Institute of Continuous Media Mechanics Ural Branch of RAS,
Perm, Russia

E-mail: Russia, Perm, usv@icmm.ru

The dynamic fragmentation was studied in the impact experiments with quartz cylindrical rods [1] using a gas gun. Impact leads to the formation of fracture surfaces, which produce an intensive light emission (mechanoluminescence or fractoluminescence). Mechanoluminescence was registered by two PMT connected with the oscilloscope. Mechanoluminescence was in form of impulses with typical rise time 2–5 ns and fall time 5–50 ns. It was found that the impulse rate was not decreases monotonically but there was some kind of bursts or avalanches and fragmentation process time is 3–4 orders longer than acoustic time (time needed for compression wave to travel along the specimen). We found that distribution of intervals between luminescence impulses is a power law distribution.

Therefore, we can conclude that time interval distribution show evidence of scaling, which suggests the possibility of self-organized criticality [2] in fragmentation.

Acknowledgements. We are very grateful to Vladimir Leont'ev for help in performing experiments. The author

would like to acknowledge the Russian Foundation for Basic Research (grant RFBR 11-01-96010, grant RFBR 11-01-00712).

References

1. Davydova M.M., Naimark O.B., Leontiev V.A. and S.V. Uvarov. Scaling properties of crack branching and brittle fragmentation. European Physical Journal Web of Conferences: 10, 00037. p.1–00037. p. 4, 2010.
2. P. Bak, C. Tang and K. Wiesenfeld, Self-organized criticality: an explanation of 1/f noise. Phys. Rev. Letters 59: 381–384, 1987.

4-39

СТРУКТУРНЫЕ И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СПЛАВЕ Al - 5%Fe ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КВАЗИСФЕРИЧЕСКИХ УДАРНЫХ ВОЛН

И.Г. Бродова¹, Е.А.Козлов²,
В.В. Астафьев¹, Т.И. Яблонских¹

¹Институт физики металлов УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

²Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: brodova@imp.uran.ru; e.a.kozlov@vniitf.ru;
vzv3@yandex.ru; yablonskikh@imp.uran.ru

Изучена эволюция структуры по сечению шара из двухфазного сплава Al-5% Fe под воздействием ударных волн напряжений. Методами металлографии установлено формирование нескольких структурных зон: высокоскоростной деформации, плавления и последующей кристаллизации перегретого расплава. Получены экспериментальные данные об эволюции огранки, размеров и кристаллического строения алюминидов железа по радиусу образца. По анализу Мессбауэровских спектров и рентгеновским данным проведено сравнение структурных характеристик алюминидов, которые образуются в центре шара при кристаллизации расплава, и кристаллов, которые расположены на периферии, в зоне высокоскоростной деформации. Установлено, что химический состав алюминидов одинаков и соответствует фазе Al₃Fe с моноклинной кристаллической решёткой. Показано, что при высокоскоростном деформировании алюминидов происходит разупорядочение кристаллической решетки, нарушение ближнего атомного порядка и появление структурных вакансий в подрешётке алюминия. Полученные результаты сопоставлены с данными по деформационному поведению сплава в условиях большой квазистатической деформации сдвигом под давлением.

STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS IN Al – 5% Fe ALLOY UNDER LOADING OF QUASISPHERICAL SHOCK WAVES

I.G. Brodova¹, E.A. Kozlov²,
V.V. Astafiev¹, T.I. Yablonskikh¹

¹Institute of Metal Physics, Ural Branch of RAS,
Yekaterinburg, Russia

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

E-mail: brodova@imp.uran.ru; e.a.kozlov@vniitf.ru;
vxv3@yandex.ru; yablonskikh@imp.uran.ru

The structure evolution of the cross section of a ball made of two-phase Al-5% Fe alloy under the shock waves effect was studied. By metallographic methods the formation of several structural zones: high-speed deformation, melting and following crystallization of the superheated and compressed melt were established. Experimental data on the evolution of facets, sizes and crystal structure of iron aluminides were product by the radius of the sample. From the analysis of Mössbauer spectra and X-ray data structural characteristics of the aluminides, which are formed at the center of the sample under the crystallization of the melt, and crystals, which are located at the sample periphery in the zone of high deformation were compared. It is established that the chemical composition of the aluminides is the same and corresponds to a phase Al₃Fe with monoclinic crystal lattice. It is shown that at high-speed deformation of aluminides there are the disordering of the crystal lattice, the violation of short-range atomic order and the appearance of structural vacancies in the sublattice of aluminum. The results are compared with data on the deformation behavior of the alloy under a large quasi-static deformation by shear under pressure.

4-40

УДАРНО-ИНИЦИИРОВАННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕТЕОРИТНОГО ЖЕЛЕЗА С СИЛИКАТАМИ

Д.Д. Бадюков¹, В.С. Русаков²

¹Институт геохимии и аналитической химии
им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

²Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова, Физический факультет,
Москва, Россия

E-mail: badyukov@geokhi.ru

Ударно-взрывные события являются важным и в ряде случаев ведущим процессом при аккреции планет и их геологической истории. Мощные ударные волны, генерируемые при кратерообразовании вызывают различные преобразования вещества ударника и мишени, в число которых входят ударно-инициированные реакции между фазами, слагающими вещество, в частности окислительно-восстановительные реакции. Целью настоящей работы является экспериментальная демонстрация возможности реакции метеоритного железа с силикатами.

Исходным материалом для проведения опытов служили порошковые смеси камасита Сихотэ-Алинского железного метеорита с кварцем, альбитом, олигоклазом, энстатитом и оливином. Опыты проводились в цилиндрических ампулах сохранения. Оценка максимального давления в осевой части образцов 84–93 ГПа. Методом микронзондового анализа и Мессбауэровской спектроскопии исследовалось вещество из центральных зон столбиков образцов. Это вещество представлено матрицей из стекла (кварц, полевые шпаты) или закалочных фаз (энстатит, оливин) с рассеянными в ней многочисленными металлическими сферами. Согласно микронзондовым данным кварцевое и полевошпатовые стекла обогащены Fe, тогда как металл из опытов с кварцем, полевыми шпатами и энстатитом содержит Si в количествах от 6 до 0,1 масс.%. Мессбауэровские исследования показали, что металл характеризуется уменьшением степени замещения атомов Fe на атомы Si в следующем порядке серии опытов: кварц, олигоклаз, альбит, пироксен, оливин. В стеклах из образцов, содержащих кварц и полевые шпаты, в результате ударно-волнового нагружения появляются ионы двухвалентного железа в высокоспиновом состоянии и атомы железа в парамагнитном металлическом состоянии.

Полученные данные свидетельствуют о том, что в процессе ударно-волнового сжатия происходит взаимодействие металла с силикатной матрицей, выражающееся в окислении железа при инертном поведении Ni и растворении FeO в силикатном расплаве и восстановлении Si и растворении его в металле по схеме $2[\text{Fe}]^0_{\text{металл}} + [\text{Si}]^{+4}_{\text{силикат}} = 2[\text{Fe}]^{+2}_{\text{силикат}} + [\text{Si}]^0_{\text{металл}}$.

Работа поддержана Программой РАН №22 и грантом РФФИ 11-05-00095.

SHOCK-INDUCED REACTION OF METEORITE IRON WITH SILICATES

D.D. Badyukov¹, V.S. Rusakov²

¹V.I. Vernadsky Institute of geochemistry
and analytical chemistry of RAS, Moscow, Russia

²M.V. Lomonosov Moscow State University,
Physical faculty, Moscow, Russia

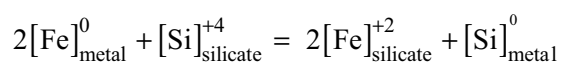
E-mail: badyukov@geokhi.ru

Impact events are important and in some cases basic processes by accretion of Earth-like planets and their evolution. Occurred by the events strong shock waves cause different transformations of target and projectile matters including shock-induced reactions between minerals such as redox reactions. The goal of this work is to demonstrate a possibility of a reaction between iron-nickel metal and silicates.

Specimens for the recovery experiments were powder mixtures of kamacite from the Sikhote-Alin meteorite with quartz, albite, oligoclase, enstatite, and olivine. The shock loading experiments were performed using cylindrical steel containers enveloped by high explosive. The peak pressures were estimated to range from 84 to 93 GPa depending on specimen Hugoniot. Samples picked out central zones of the recovered specimens were studied using a microprobe technique and Moessbauer spectroscopy. The samples are composed of the numerous metal droplets

disseminated in silicate matrices. The glassy matrices are enriched in Fe whereas the metal droplets contain some Si. The Si concentrations range from 6 to 0.1 wt.%. The Moessbauer study shows that a degree of Fe substitution on Si in metal from the sample suite is lowered from quartz through feldspars and pyroxene to olivine. The glass from the quartz and feldspars contain Fe⁺² ions and Fe atoms in a paramagnetic metal state.

Using the data we infer that during shock compression meteorite metal reacts with silicates. The reaction scheme is written as as



where $[\text{Si}]_{\text{silicate}}^{+4}$ is silicon in oxygen-silicon tetrahedra, $[\text{Fe}]_{\text{silicate}}^{+2}$ is ferrous ions in a silicate, and $[\text{Si}]_{\text{metal}}^0$ is silicon dissolved in the metal.

4-41

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНЫХ И ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В КВАРЦЕ И СМЕСИ ПОРОШКОВ КВАРЦА И МЕДИ ПРИ НАГРУЖЕНИИ СФЕРИЧЕСКИ СХОДЯЩИМИСЯ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

Н.И. Талуц¹, А.В. Добромислов¹, Е.А. Козлов²,
В.М. Гундырев¹, Ю.С. Поносов¹

¹Институт физики металлов УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

²Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: NinaTaluts@imp.uran.ru; e.a.kozlov@vniitf.ru

Изучение особенностей протекания химических реакций между различными металлами и окислами в условиях высоких давлений и температур принадлежит к числу наиболее важных задач материаловедения, минералогии и геохимии. В большинстве случаев при нормальном давлении и комнатной температуре скорость таких реакций крайне низка, однако при высоких давлениях и температурах она существенно возрастает. При нагружении материала сферически сходящимися ударными волнами в процессе их распространения на фронте ударной волны происходит непрерывное повышение давления и температуры, поэтому при таких условиях нагружения возможно как химическое взаимодействие исходных компонентов друг с другом, так и образование фаз высокого давления.

В данной работе представлены результаты исследования шаров из природного кварца и смеси порошков кварца и меди в соотношении 1:1. Нагружение образцов осуществлялось сходящимися детонационными волнами в системах с наружным радиусом взрывчатого вещества 40 мм. Послойный анализ структуры и фазового состава сохраненных образцов был осуществлен с использованием рентгеноструктурного анализа, оптической металлографии, сканирующей электронной микроскопии и рамановского рассеяния.

На меридиональных сечениях сохраненных образ-

цов обнаружено несколько концентрических зон, отличающихся друг от друга контрастом. Выявлены закономерные изменения структуры по зонам в зависимости от состава образца и режима нагружения. Показано, что кварц в центральных слоях переходит в аморфное состояние, о чем свидетельствует появление на рентгенограммах интенсивного диффузного гало и изменение типа рамановского рассеяния. Химическое взаимодействие между медью и кварцем не происходит вплоть до перехода этих веществ в жидкое состояние. Взаимодействие меди и кварца в жидком состоянии приводит к образованию окиси меди.

PECULIARITIES OF STRUCTURE AND PHASE TRANSFORMATIONS IN QUARTZ AND IN THE MIXTURE OF QUARTZ AND COPPER POWDERS UNDER LOADING BY SPHERICAL CONVERGING SHOCK WAVES

N.I. Taluts¹, A.V. Dobromyslov¹, E.A. Kozlov²,
V.M. Gundyreb¹, Yu.S. Ponomov¹

¹Institute of Metal Physics, Ural Branch of RAS,
Yekaterinburg, Russia

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

E-mail: NinaTaluts@imp.uran.ru; e.a.kozlov@vniitf.ru

The study of features of chemical reactions between metals and metal-oxides at high pressures and temperatures belongs to the most important problems of materials science, mineralogy and geochemistry. In most cases, the rate of such reactions is extremely low under atmosphere pressure and at room temperature; however, it strongly increases under high pressures and at high temperatures. Under loading of material by spherical converging shock waves, there is a continuous increase in pressure and temperature at the front the shock wave during its propagation, so as a chemical interaction of initial components with each other and the formation of high-pressure phases perhaps at such loading conditions.

In this work, the results of the study of natural quartz and a mixture of quartz and copper powder taking in a ratio 1:1 after loading are presented. The balls were loaded by spherically converging detonation waves in systems with an outside explosive radius of 40 mm. The layer-by-layer analysis of the structure and phase composition of the recovered samples was performed using X-ray diffraction, optical metallography, scanning electron microscopy, and Raman scattering.

A number of concentric zones differing in contrast were observed in the meridional sections of the samples. Regular changes in the structure of the zones were revealed depending on the composition of the sample and loading conditions. It is shown that the quartz in the central layers becomes amorphous. The appearance of the diffuse halo in the X-ray diffraction patterns and change in the type of Raman scattering evidence it. Chemical interaction between copper and quartz does not occur up to transition of these substances in a liquid state. Chemical interaction of copper and quartz in the liquid state leads to the formation of cuprous oxide.

4-42

**ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО
И КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО
ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ВАЛЕНТНОСТЬ
ИОНОВ, СТРУКТУРУ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ
ОКСИДОВ КАК МОДЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ
МИНЕРАЛОВ**

Б.А. Гижевский¹, В.Р. Галахов¹, Е.А. Козлов²

¹Институт физики металлов УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

²Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: gizhevskii@imp.uran.ru; e.a.kozlov@vniitf.ru

Ударно-волновое нагружение (УВН) в системах, сохраняющих нагруженные объекты, служит эффективным способом моделирования естественных планетарных явлений – астроблем, возникающих при падении метеоритов на Землю. В фундаментальных работах В.И. Фельдмана с соавторами указываются некоторые закономерности ударного метаморфизма породообразующих минералов. К числу наиболее интересных относятся миграционные фазовые переходы на твердофазной стадии процесса. Настоящая работа посвящена выяснению механизмов этого явления на примере оксидов как модельных объектов минералов с использованием различных физических методик. Основное внимание уделялось изучению изменений в оксидах под действием ударных волн на уровне химических связей, нарушениям ионного состава и стехиометрии, взаимосвязи этих процессов с возникновением микро(нано)структуры в оксидах при УВН, образованием новых высокоплотных фаз. Для сравнения и получения более полной картины оксиды подвергались также квазистатическим деформациям сдвига под давлением.

Показано, что при относительно слабых параметрах нагружения в оксидах происходит нарушение стехиометрии, появление катионов с пониженной валентностью, образование наноструктуры, возможны изменения симметрии кристаллической решетки. Скопления дефектов на границах кристаллитов и в местах локализованной деформации могут служить зародышами новой фазы. Образовавшийся на этом этапе продукт является неравновесным и обладает повышенной активностью. В генерации высокой дефектности, образовании наноструктуры существенную роль играют пластические деформации, возникающие в процессе УВН. При повышении параметров нагружения возможно разложение оксидов с выделением кислорода. Наноструктура и микротрещины могут способствовать распространению продуктов разложения на значительные расстояния и образованию новых фаз. Установленные закономерности преобразования вещества при УВН важны как для планетарных наук, так и для других направлений науки и технологии, в частности, для материаловедения.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проекты 11-02-00252, 11-02-00166 и проекта «Российско-Германская лаборатория на BESSY».

**EFFECT OF DYNAMIC AND QUASI-STATIC
DEFORMATIONS ON VALENCY OF IONS,
STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF
OXIDES AS MODEL OBJECTS OF MINERALS**

B.A. Gizhevsky¹, V.R. Galakhov¹, E.A. Kozlov²

¹Institute of Metal Physics, Ural Branch of RAS,
Yekaterinburg, Russia

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

E-mail: gizhevskii@imp.uran.ru; e.a.kozlov@vniitf.ru

Shock wave loading in recovery systems is an effective way of modeling of natural planetary phenomena such as astroblems, which arise at falling meteorites on the Earth. In V.I. Feldman's fundamental works some mechanisms of a shock metamorphism of minerals are specified. The most interesting phenomena are the migration phase transitions in the solid state stage of process. The present work is devoted to clarifying the nature of these phenomena by modeling minerals by simple oxides. The main attention is focus to the studies of changes in chemical bonds of oxides after shock wave loading, to disturbance of the ionic composition and stoichiometry, connection of these processes with the micro(nano)structure of oxides with stages of formation of new high density phases. In addition, we have analyze oxides subjected to quasi-static deformation by the high pressure torsion method.

It was shown that shock wave loading leads to disruption of stoichiometry, appearance of cations with valency, forming the nanostructure. Changes of the symmetry of a crystal lattice are possible. Aggregations of defects on borders of nanocrystallites can serve as germs of new phases. The product formed at this stage is nonequilibrium and has high activity. Severe plastic deformations arising in the course of shock wave loading play an essential role in generation of high deficiency and formation of the nanostructure. At high parameters of loading decomposition of oxides is possible. Nanostructure and microcracks can promote distribution of products of decomposition on considerable distances and formation of new phases. The established mechanisms of transformation of materials are important both for planetary sciences and for other fields of science and technology, in particular for material sciences.

The work is supported in part by the RFBR, projects 11-02-00252, 11-02-00166 and by the bilateral Program «Russian–German Laboratory at BESSY».

4-43

УДАРНОЕ СЖАТИЕ ДВУСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

В.В. Милявский¹, М. Mases², J. Waldbock³,
M. Dossot³, X. Devaux³, E. Mcrae³, A.B. Солдатов²

¹ОИВТ РАН, Москва, Россия.

²Lulea University of Technology, Лулео, Швеция

³CNRS – University of Lorraine, Нанси, Франция

E-mail: vlvm@ihed.ras.ru

Эксперименты, выполненные в 2011 году рядом авторов с использованием алмазных наковален, демонстрируют структурную стабильность двустенных углеродных нанотрубок (ДУНТ) при статическом сжатии вплоть до давления 35 ГПа. В данной работе обсуждаются результаты, полученные при ступенчатом ударно-волновом нагружении ДУНТ с использованием сборок сохранения плоской геометрии. Максимальное давление в экспериментах составляло 14, 19, 26 и 36 ГПа. Сохраненные образцы исследовались методами просвечивающей электронной микроскопии сверхвысокого разрешения и КР-спектроскопии. Было отмечено разрушение внешней оболочки ДУНТ, разворачивание, а так же уменьшение длины нанотрубок (за счет изломов). Нарушения структуры ДУНТ усиливались с увеличением максимального давления в эксперименте. КР-спектроскопия фиксирует увеличение отношения интенсивности D/G-полос с ростом ударного давления. Анализ структуры RBM полосы позволяет сделать вывод, что ДУНТ большего диаметра в условиях нашего эксперимента разрушаются более высокими ударными давлениями. Работа поддержана РФФИ.

SHOCK COMPRESSION OF DOUBLE WALLED CARBON NANOTUBES

V.V. Milyavsky¹, M. Mases², J. Waldbock³, M. Dossot³,
X. Devaux³, E. Mcrae³, A.V. Soldatov²

¹IHT RAS, Moscow, Russia

²Lulea University of Technology, Sweden, Lulea

³CNRS-University of Lorraine, Villers-les-Nancy, France

E-mail: vlvm@ihed.ras.ru

Recent experiments in a diamond anvil cell demonstrated high structural stability of double walled carbon nanotubes subjected to a static pressure of 35 GPa. Here we report the results of stepwise shock-wave compression of double walled carbon nanotubes with the use of recovery assemblies of planar geometry. In the different shock wave experiments the peak pressure was ramped to a certain level (14, 19, 26 and 36 GPa) with a new nanotubes sample but always from the same source batch. The recovered samples were characterized by Raman, XPS and HRTEM revealing outer wall disruption along with unzipping and shortening of the carbon nanotubes. Structural damage of the nanotubes increases with the shock pressure. Simultaneously, the Raman data exhibit a steep increase of D/G-band intensity ratio. Remarkably, there are indications that the largest diameter nanotubes were destroyed (RBM signal disappeared) by application of the highest shock. The work was supported by RFBR.

4-44

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ГИДРИДОВ ЛЕГКИХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Д.В. Шахрай

Институт проблем химической физики РАН,
Черноголовка, Россия

E-mail: shakhray@icp.ac.ru

В работе представлены результаты экспериментального исследования электрофизических и термодинамических свойств двух гидридов металлов (MgH_2 и LiH) в труднодоступных областях фазовых диаграмм, достигаемых квазиизэнтропическим (ступенчатым ударным) сжатием в диапазоне давлений 10–150 ГПа.

Известно, что давление перехода чистого водорода в металлическое состояние по теоретическим оценкам составляет более 400 ГПа при комнатной температуре. Однако эти параметры для водорода трудно достижимы на практике, как в алмазных наковальнях, где физически невозможно создать такие давления, так и в условиях динамического сжатия по причине сильного разогрева образца при ударном сжатии до таких давлений. Вместе с тем существует целый класс гидридов металлов и водородсодержащих соединений, в которых, благодаря «химическому предсжатию» водорода, ожидается переход диэлектрик–металл при давлениях 90–150 ГПа (см. [1] и ссылки в ней). При этом появление металлической проводимости гидрида обусловлено именно сближением атомов водорода, а не наличием атомов металлов в молекуле.

В работе исследованы электрофизические и термодинамические свойства ионного (MgH_2) и ковалентного (LiH) гидрида в условиях ступенчатого сжатия до 140 ГПа. Показано, что изменение проводимости гидрида магния коррелирует с полиморфными переходами между фазами высокого давления. Образцы гидрида лития приобретают проводимость на уровне 1 Ом/См. Изменение проводимости гидрида лития можно объяснить как плавлением, так и полиморфным переходом в фазу высокого давления. В предположении полиморфного перехода построена линия равновесия между фазой низкого и высокого давления LiH в диапазоне 50–320 ГПа.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 10-02-01078, а также Программы Президиума РАН «Вещество при высоких плотностях энергии».

Литература

1. Zurek E., Hoffmann R., Ashcroft N.W. et al. A little bit of lithium does a lot for hydrogen // PNAS, October 20, 2009. V. 106. N. 2. P. 17640–17643.

ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF LIGHT METAL HYDRIDES AT HIGH DYNAMIC PRESSURE

D.V. Shakh-ray, A.M. Molodets, V.E. Fortov

Institute of Problem of Chemical Physics RAS,
Chernogolovka, Russia

E-mail: shakh-ray@icp.ac.ru

In this work results of experimental research of electrophysical and thermodynamic properties of two metal hydrides (MgH_2 and LiH) in remote areas of the phase diagrams reached by quasiisotropic compression in a range of pressure 10–150 GPa are presented.

It is known that pressure of transition of pure hydrogen to metal condition by theoretical estimations makes more 400 GPa at room temperature. However these parameters for hydrogen are difficultly achievable in practice, as in diamond anvils where it is physically impossible to create such pressure, and in the conditions of dynamic compression because of a strong warming up of the sample at shock compression to such pressure. At the same time there is a whole class of hydrides of metals in which, thanking «chemical precompression» hydrogen, transition a dielectric-metal is expected at pressure 90–150 GPa (see [1] and references). Thus occurrence of metal conductivity of hydride is caused by rapprochement of atoms of hydrogen, instead of presence of atoms of metals in a molecule.

In this work electrophysical and thermodynamic properties ionic (MgH_2) and covalent (LiH) hydride in the conditions of step compression up to 140 GPa are investigated. It is shown that change of conductivity of hydride of magnesium correlates with polymorphic transitions between high pressure phases. Samples of hydride of lithium get conductivity at level 1 Ohm/cm. Change of conductivity of hydride of lithium it is possible to explain both fusion, and polymorphic transition in a high pressure phase. In the assumption of polymorphic transition the equilibrium line between a phase low and high pressure of LiH in a range 50–320 GPa is constructed.

Work is executed with RFBR support, the grant № 10-02-01078, and also Programs of Presidium of the Russian Academy of Sciences «Substance at high density of energy».

References

- Zurek E., Hoffmann R., Ashcroft N.W. et al. A little bit of lithium does a lot for hydrogen // PNAS, October 20, 2009. V. 106. N. 2. P. 17640–17643

4-45

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО УДАРНО-ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СУБСТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ α -, β - И γ -ФАЗ НИТРИДА КРЕМНИЯ

А.Н. Жуков¹, В.В. Якушев¹,
А.И. Рогачёва¹, В.А. Кудаккина²

¹Институт проблем химической физики РАН,
Черноголовка, Россия

²Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: azhukov@icp.ac.ru

В работе изучалось влияние ударно-волнового воздействия на степень микроискажений кристаллической решетки и размер кристаллитов α -, β - и γ -фаз нитрида кремния. Ударно-волновое воздействие (15–36 ГПа) осуществлялось методом высокотемпературного ударного сжатия [1] в плоских ампулах сохранения. Сущность метода состоит в том, что в ампулу для ударно-волнового воздействия помещается не чистое вещество, а его смесь с бромидом калия, обладающего большой сжимаемостью, что приводит, как к повышению температуры при ударном сжатии, так и к более сильному охлаждению в волне разгрузки. Давление генерировалось алюминиевым ударником, разогнанным продуктами детонации различных взрывчатых веществ. Исследование образцов проводилось рентгенографически. Субструктурные характеристики образцов определялись из анализа уширения линий в максимально широком диапазоне углов. Для части образцов был применен метод Ритвелда. Показано, что ударно-волновое воздействие на α - и β -фазы приводит к заметным микроискажениям их решеток, размеры же кристаллитов остаются достаточно большими, без перехода этих фаз в нанокристаллическое состояние. С ростом давления степень микроискажений увеличивается. Микроискажения кристаллической решетки β -фазы при прочих равных условиях больше, чем для α -фазы. При давлении 36 ГПа наблюдалось образование γ -фазы нитрида кремния в нанокристаллическом состоянии. Исследование γ - Si_3N_4 , полученного нами ранее [2] детонационным методом, также показали его нанокристалличность. Ударно-волновое воздействие 36 ГПа на γ -фазу, предварительно полученную методом детонационного синтеза, не привело к заметным изменениям ее субструктуры.

Литература

- Курдюмов А.В., Бритун В.Ф., Боримчук Н.К., Ярош В.В. Мартенситные и диффузионные превращения в углероде и нитриде бора при ударном сжатии. Киев: Куприянова О.О. 2005. 192 с.
- Тацкий В.Ф., Жуков А.Н., Ананьин А.В., Дремин А.Н., Рогачева А.И., Уткин А.В., Фортов В.Е. Способ получения кубического нитрида кремния. Патент РФ № 2331578, 2008.

THE EFFECT OF HIGH TEMPERATURE SHOCK WAVE COMPRESSION ON α -, β -, AND γ -SILICON NITRIDE SUBSTRUCTURE

A.N. Zhukov¹, V.V. Yakushev¹,
A.I. Rogacheva¹, V.A. Kudakina²

¹Institute of Problems of Chemical Physics RAS,
Chernogolovka, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: azhukov@icp.ac.ru

The effect of shock wave compression on lattice micro-distortion and crystallite size of α -, β -, and γ -silicon nitride phases has been investigated. The shock-wave loading (15–36 GPa) was performed by high temperature shock compression method in flat-type shock recovery setup. Main point of the method is that the investigated substance loaded in recovery ampoule not in pure form but as a mixture with high compressible compound – potassium bromide, thus temperature rise higher under compression stage and

fall lower in release wave. Pressure was generated by impact of aluminum flayer accelerated with detonation products of various explosives. Recovered samples were examined by X-ray method. The substructure parameters were determined from line broadening analysis in maximal wide diffraction angle range. For some samples the Rietveld method was applied. It has been shown that shock compression of α - and β -phases result in microdistortion of crystal lattices, but crystallite size remains sufficiently large. The microdistortion increases with pressure rise. Other conditions being equal the microdistortion of β -phase lattice is higher than α -phase. Transformation of silicon nitride into nanocrystalline γ -phase has been observed at 36 GPa. The investigation of γ -Si₃N₄, which we produced by detonation method earlier [2], have revealed its nanocrystalline structure, too. Shock-wave treatment of γ -Si₃N₄, produced by detonation method, leave substructure of this phase practically unchanged.

References

1. Kurdyumov A.V., Britun V.F., Borimchuk N.I., Yarosh V.V. Martensitnie i diffusionnie prevrascheniya v uglehode i nitride bora pri udarnom shtatii. Kiev: Kupriyanova O.O. 2005. 192 pages; Kurdyumov A.V., Britun V.F., Yarosh V.V., et al. Phase transformations of carbon-black in high-temperature shock compression. //Journal of Superhard Materials 2009, v. 31, no. 5, pp. 311–317.
2. Tatsy V.Ph., Zhukov A.N., Ananin A.V., Dremine A.N., Rogacheva A.I., Utkin A.V., Fortov V.E. Method of Cubic Silicon Nitride Production. Russian Federation Patent 2331578, 2008.

4-46

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СВАРКИ ВЗРЫВОМ

И.А. Батаев, А.А. Батаев, В.И. Мали,
Д.В. Павлюкова, П.С. Ярцев, А.С. Гонтаренко

Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, Россия

Одна из наиболее важных задач современного материаловедения связана с разработкой материалов, предназначенных для изготовления деталей машин и элементов конструкций ответственного назначения, способных длительное время эксплуатироваться в тяжелых условиях внешнего нагружения. Эффективное решение отмеченной проблемы заключается в разработке материалов слоистого типа. Для их изготовления могут быть использованы хорошо зарекомендовавшие себя титан и его сплавы, а также материалы на основе алюминия.

При формировании многослойных композиций «алюминий–титан» в процессе сварки взрывом наиболее интенсивно деформируемыми являются поверхностные слои пластин, расположенных ближе к слою взрывчатого вещества. Материал сильнодеформированных зон проявляет большую склонность к образованию интерметаллидов по сравнению с менее деформированными микрообъемами. Установлено, что в процессе выдержки композиции «Al–Ti» при 630°C в сварных швах формируются интерметаллиды Al₃Ti двух морфологических типов. На месте вихревых зон образуются компактные

выделения Al₃Ti, на остальных участках сварных швов выделяются интерметаллиды в форме пленки. Интерметаллиды первого типа растут более интенсивно и в итоге поглощают выделения пленочной формы.

В поверхностных слоях алюминиевых пластин в зоне безвихревых участков сварных швов в процессе сварки взрывом развиваются процессы полигонизации. Средний размер субзерен, сформированных в процессе кратковременного нагрева материала, составляет 1,3 мкм. Температурно-временные режимы сварки взрывом не обеспечивают развитие и завершение процессов полигонизации и рекристаллизации в титане.

Вихревые участки, наблюдаемые в верхних интенсивно деформированных слоях, отличаются переменным химическим составом. В интенсивно деформированных микрообъемах алюминия, прилегающих к вихревым зонам, в процессе сварки взрывом формируется наноструктурированный раствор титана в алюминии с размерами структурных элементов ~25 нм.

Характер распространения усталостных трещин в многослойных пакетах типа «Al–Ti» и «Al–Al₃Ti–Ti» принципиально отличается от разрушения образцов, изготовленных из титана и алюминия. Тормозящий эффект межслойных границ обусловлен ветвлением и перезарождением трещин в зонах сварных швов.

STRUCTURE AND PROPERTIES OF MULTILAYER COMPOSITES PRODUCED BY EXPLOSIVE WELDING

I.A. Bataev¹, A.A. Bataev, V.I. Mali, D.V. Pavlyukova,
P.S. Yartsev, A.S. Gontarenko

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

One of the most important problems of the modern materials science is development of new materials for manufacturing of machine components and construction elements for critical applications. This materials should work for a long time under severe external loading. Effective solution of the problem is development of layered-type materials. For manufacturing of this materials titanium and its alloys as well as materials based on aluminum can be used.

During the process of multilayer welding the surface layers of the plates located closer to the explosive undergo the highest degree of plastic deformation. The material of highly deformed zone shows a greater tendency to form intermetallic compounds, compared to slightly deformed microvolumes. It was shown that two morphologies of Al₃Ti can form during annealing at 630°C. At the site of former vortexes compact segregations of Al₃Ti are formed. At other sides of welding interface the film of Al₃Ti grows. Intermetallics of the first type grow more rapidly and eventually absorb the film segregations.

In surface layers of aluminum plates polygonization occurs during the explosive welding. The average size of subgrains formed during a short-time heating of the material is 1.3 μ m. Temperature-time regimes of explosion welding don't ensure the development of polygonization and recrystallization in titanium.

Vortexes have changeable chemical composition. The nanostructured solid solution of titanium in aluminum can be formed near the vortexes.

The propagation of fatigue cracks in multilayer composites such as «Al-Ti» and «Al-Al₃Ti-Ti» differs from fatigue cracks propagation in specimens made of bulk titanium or aluminum. Inhibitory effect of interlayer boundaries is explained by branching and renucleation of cracks in interlayer interfaces.

4-47

СТРУКТУРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ДИНАМИЧЕСКИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН

И.А. Батаев¹, А.А. Батаев¹, В.И. Мали^{1,2},
М.А. Есиков^{1,2}, В.С. Ложкин¹

¹Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, Россия

²Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
Россия, Новосибирск

E-mail: ivanbataev@ngs.ru

Сварка взрывом является одним из распространенных методов соединения разнородных материалов. Согласно ряду классификаций сварку взрывом принято относить к методу сварки давлением без нагрева материала [1, 2]. В то же время известно, что процесс сварки взрывом сопровождается значительной деформацией приповерхностных слоев, что неизбежно приводит к сильному нагреву. Цель работы заключалась в изучении процессов нагрева и деформации, имеющих место в тонких поверхностных слоях соударяющихся пластин.

В качестве материалов исследования в работе использовались сваренные взрывом многослойные композиты. Исследовались различные сочетания материалов, в частности «сталь 20–сталь 20», «сталь 20–12Х18Н10Т», «сталь 20–5ХВ2С» и другие.

Для изучения структуры металла, возникающей при сварке взрывом, в работе использовали методы оптической микроскопии, растровой и просвечивающей электронной микроскопии. Конечно-элементное моделирование процесса сварки взрывом проводили в пакете Ansys Autodyn.

Для всех свариваемых комбинаций характерным является образование ряда различающихся по структуре зон: вихревые участки; зона рекристаллизованного металла; зона сильнодеформированного металла; зона слабодеформированного металла.

Максимальные значения температур были достигнуты в вихревых зонах. Материал в зоне вихрей находился в расплавленном состоянии.

Тонкая прослойка рекристаллизованного металла расположена вдоль волнообразной границы между свариваемыми пластинами, а также вокруг вихрей. Материал этой зоны деформировался с большими скоростями и степенями деформации. Такие условия приводили к значительному разогреву и рекристаллизации материала.

В зоне сильнодеформированного металла температура нагрева была не достаточной для прохождения рекристаллизационных процессов. В зоне слабодеформированного металла единственным признаком пластической деформации является механическое двойникование.

Результаты математического моделирования хорошо объясняют результаты структурных исследований.

Результаты математического моделирования хорошо объясняют результаты структурных исследований.

Литература

1. Лысак В.И., Кузьмин С.В. Сварка взрывом. М.: Машиностроение, 2005. 544 с.
2. Кобелев А.Г., Лысак В.И., Чернышев В.Н. и др. Производство металлических слоистых композиционных материалов. М.: Интермет инжиниринг, 2002. 496 с.

STRUCTURAL CHANGES IN THE SURFACE LAYERS OF DYNAMICALLY INTERACTING METAL SHEETS

I.A. Bataev¹, A.A. Bataev¹, V.I. Mali^{1,2},
M.A. Esikov^{1,2}, V.S. Lozhkin¹

¹Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russia

²Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, SB RAS,
Novosibirsk, Russia

E-mail: ivanbataev@ngs.ru

Explosive welding is one of the most common methods of dissimilar materials joining. According to some classifications explosion welding is usually relegated to the of pressure welding method without material heating [1, 2]. At the same time the process of explosive welding is accompanied by significant deformation of the surface layers, which inevitably leads to a strong heating. The purpose of this work was studying of the heating and deformation processes taking place in thin surface layers of the colliding plates.

Explosively welded multilayered composites were used as materials for investigation. Different combinations of materials were studied («steel 20 – steel 20», «steel 20-12Cr18Ni10Ti», «steel 20–steel Cr18Ni9Mo5Ti», etc.)

The methods of optical microscopy, scanning and transmission electron microscopy were used to study metal structure. FEA of the explosive welding was carried out in Ansys Autodyn package.

All welded combinations are characterized by a number of different areas of the structure formation: the vortexes area; zones of recrystallized metal; zones of severe deformed metal and zones of weakly deformed metal.

Maximum temperatures were reached in the vortex zones. The material in the area of the vortices was in a molten state.

A thin layer of recrystallized metal is formed along the wavy boundary between the welding plates, as well as around the vortexes. The material of this zone is deformed at high speeds and deformation degrees. Such conditions lead to significant heating and recrystallization of the material.

In the area of severe deformed metal heating temperature was not sufficient for the recrystallization processes. In the zone of weakly deformed metal the only sign of plastic deformation is mechanical twinning.

The results of mathematical modeling are well explained by the results of structural studies.

References

1. Lysak V. I., Kuz'min C. V. Svarka vzryvom. M.: Mashinostroyeniye, 2005. 544 p.
2. Kobelev A.G., Lysak V.I., Chernyshev B.H. etc. Proizvodstvo metallicheskih sloistyh kompozitsionnyh materialov. M.: Internet Engineering, 2002. 496 p.

4-48

ВЛИЯНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ТИТАНА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТАБИЛЬНОСТЬ СТРУКТУРЫ ПРИ НАГРЕВЕ

Н.Ю. Фролова¹, В.И. Зельдович¹, А.Э. Хейфец¹,
Е.В. Шорохов², И.В. Хомская, П.А. Насонов²

¹Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики

им. академ. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

Определены механические свойства титана марки VT1-0 после динамического канально-углового прессования (ДКУП) со скоростью 10^4 – 10^5 с⁻¹ при температурах 500 и 530°C в один или два прохода в матрице с пересекающимися каналами под углом 90°, и после комбинированной обработки. Комбинированная обработка состояла из ДКУП при повышенных температурах и теплой прокатки на 50% при 300°C. Установлено, что теплая прокатка образцов, подвергнутых ДКУП, увеличивает общую плотность дислокаций и создает высокий уровень внутренних напряжений. После ДКУП при 530°C в два прохода предел прочности титана равен 650 МПа и относительное удлинение – 19%. Дополнительная прокатка на 50% при 300°C повышает предел прочности до 790 МПа при относительном удлинении 15%.

Установлено, что при нагреве образцов в интервал температур 400–600 °C после ДКУП скорость роста зерен больше, а полнота рекристаллизации меньше, чем после комбинированной обработки. После комбинированной обработки процесс рекристаллизации начинается из большого числа мест зарождения. Максимальная скорость роста зерен при нагреве наблюдается в интервале температур от 600 до 700°C. При нагреве до 700°C и выдержке 30 минут в структуре образцов после ДКУП наблюдаются зерна средним размером 46 мкм, разброс зерен по размерам составляет 17–83 мкм. Комбинированная обработка и нагрев до 700°C позволяют получить средний размер зерна 41 мкм, отклонение от среднего размера составляет 25–57 мкм. Наибольшее падение твердости HV при нагреве происходит в интервале температур от 400 до 600°C. После ДКУП твердость уменьшается от 2050 до 1500 МПа, а после комбинированной обработки – от 2400 до 1650 МПа. Падение твердости определяется степенью развития рекристаллизации.

Работа выполнена по плану РАН (тема «Структура», № г.р. 01201064335), при поддержке Программы Президиума РАН «Теплофизика и механика экстремальных энергетических воздействий» и РФФИ (проект № 11-03-00047).

INFLUENCE OF COMBINED TREATMENT OF TITANIUM FOR MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE STABILITY DURING HEATING

N.Yu. Frolova¹, V.I. Zeldovich¹, A.E. Kheifets¹,
E.V. Shorokhov², I.V. Khomskaya¹, P.A. Nasonov²

¹Institute of physics of metals, Ural Branch of RAS,
Yekaterinburg, Russia

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

Mechanical properties of titanium of mark VT1-0 after dynamical channel-angle pressure (DCAP) with velocity 10^4 – 10^5 s⁻¹ at temperature 500 and 530°C by one or two passes in die with cross channel at angle 90° and combined treatment were defined. Combined treatment consist of DCAP at high temperatures and warmth rolling at 50% at 300°C. It is established that the warmth rolling of specimens, subjected the DCAP, increase common dislocations density and and create high level internal stress. Titanium tensile strength is equal 650 MPa and elongation is 19% after DCAP at 530°C by two passes. Additional rolling by 50% at 300°C increase tensile strength to 790 MPa. Elongation is equal 15%. It is determined, that at heating of specimens in temperature interval 400–600°C after DCAP velocity grains growth is larger, but fullness of recrystallization is smaller, than after the combined treatment. The recrystallization begin in larger quantity plases of origin after the combined treatment. Maximum velocity of grains growth at heating was observe in temperature interval at 600–700°C. Grains with middle size 46 mkm and dispersion of grains sizes 17–83 mkm was observed in structure after DCAP and heating to 700°C and exposure 30 minutes. The combine treatment and heating to 700°C allowed turn middle grains size 41 mkm with dispersion on middle size is 25–57 mkm. Greatest decreasing od hardness for heating is observed in temperature interval at 400 to 600°C. Hardness decrease from 2050 to 1500 MPa after DCAP and – from 2400 to 1650 MPa after combaine treatment. Hardness decreasing decision of degree progress of recrystallization.

The work was performed according to Plan of the Russian Academy of Sciences (theme «Structure», № 01201064335), and was supported by the Program of Presidium of the Russian Academy of Sciences «Thermophysics and mechanics of extreme power influences» and RFBR (grant № 11-03-00047).

4-49

ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ ЖАРОПРОЧНЫХ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Н.В. Казанцева¹, Е.В. Шорохов²,
Н.И. Виноградова¹, Н.Н. Степанова¹

¹Институт физики металлов УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

²Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: kazantseva@imp.uran.ru; e.v.shorokhov@vniitf.ru

Методами структурного анализа (оптическая металлография, рентгеноструктурный анализ, просвечивающая электронная микроскопия) проведено исследование конструкционных жаропрочных сплавов на основе интерметаллидов Ti_3Al и Ni_3Al после динамического нагружения. Образцы двухфазного сплава на основе Ti_3Al подвергались воздействию ударных волн, максимальное давление на поверхности образца составило 100 ГПа, длительность импульса воздействия 1 мкс, образцы сплава на основе Ni_3Al вырезали из участка лопатки газовой турбины, подвергнувшейся ударному разрушению.

Обнаружено, что при ударном нагружении в сплаве на основе интерметаллида Ni_3Al релаксация возникающих напряжений происходит посредством процесса двойникования, в отличие от сплава на основе Ti_3Al , в котором двойники не обнаружены.

Результаты анализа дефектного состояния (дислокаций, дефектов упаковки, двойников) сопоставляются с дефектным состоянием этих сплавов при обычных процессах пластической деформации. Особенности деформационных процессов в интерметаллидах при ударном нагружении обсуждаются.

DEFORMATION BEHAVIOR OF THE HEAT- RESISTANT INTERMETALLIC COMPOUNDS UNDER THE SHOCK WAVE LOADING

N.V. Kazantseva¹, E.V. Shorokhov²,
N.I. Vinogradova¹, N.N. Stepanova¹

¹Institute of Metal Physics, Ural Branch of RAS,
Yekaterinburg, Russia

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

E-mail: kazantseva@imp.uran.ru; e.v.shorokhov@vniitf.ru

The study of the heat-resistant alloys after the dynamic loading was done by the methods of the structural analysis (the optical microscopy, TEM, X-ray analysis). We studied the Ti_3Al -base alloys and the nickel superalloys. The samples of the two-phase Ti_3Al -base alloy were subjected by the shock wave loading, maximum pressure on the surface of the sample was about 100 GPa, and the pulse duration was 1 μ m. The samples of the Ni_3Al -base alloy were cut from the gas turbine blade after accident.

It was found the twinning structure in the Ni_3Al -based after the impact loading, in contrast to the Ti_3Al -base alloy, in which the twins were not found.

The structure defects (dislocations, stacking faults, twins) are compared with the defect structure arising in the alloys after plastic deformation under static loading. Features of the deformation processes in intermetallic compounds under shock loading are discussed.

4-50

ФАЗОВЫЕ И СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА И МЕДИ ПРИ НАГРУЖЕНИИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

И.В. Хомская, В.И. Зельдович

Институт физики металлов УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

E-mail: khomska@imp.uran.ru

Ударно-волновое нагружение – один из наиболее эффективных высокоэнергетических методов упрочнения материалов, главное преимущество которого заключается в возможности получения значительного упрочнения при минимальном формоизменении. Структура металлов и сплавов при взрывной обработке изменяется под действием высокого давления, высокоскоростной деформации и температуры.

В работе обобщены экспериментальные результаты исследования эволюции структуры в сталях и сплавах на основе железа и меди с различными исходными структурами при нагружении: плоскими ударными волнами с давлениями $P = 12\div 39$ ГПа, сходящимися ударными волнами с $P = 50\div 200$ ГПа; и высокоскоростным ($\sim 10^5$ с⁻¹) динамическим прессованием $P \leq 8$ ГПа. Ударно-волновые эксперименты проводили в ИГ СО РАН (Новосибирск), МГТУ им. Н.Э. Баумана и РФЯЦ-ВНИИТФ (Снежинск).

Установлены эффекты, связанные с равномерной и локализованной деформацией: образование систем микродвойников и дислокационных структур во всем объеме образцов; возникновение трещин, полос адиабатического сдвига и участков локализованного течения. Установлены три типа локализованного течения: сдвиговое, струйное (кумулятивное) и турбулентное (вихревое).

В железо-никелевых сплавах при $P = 12\div 39$ ГПа наблюдали возникновение ϵ -фазы высокого давления, γ -фазы и определили механизм образования ГЦК-мартенсита. Высокое давление приводит к мгновенному возникновению большого числа центров зарождения. Высокоскоростная деформация способствует образованию игольчатых нанокристаллов с различной ориентацией и одновременно препятствует их росту, из-за потери когерентной связи между кристаллами и исходным мартенситом. При $P = 100$ ГПа и выше существенное влияние на формирование структуры оказывает остаточная температура: в сталях и сплавах меди происходят фазовые $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$, $\beta \rightarrow \alpha$, $\alpha \rightarrow \beta$ и $\beta_1 \rightarrow \alpha + \gamma_2$ превращения, плавление и кристаллизация.

Таким образом, ударно-волновое воздействие и обработки с применением ударных волн позволяют получить субмикроструктурные и нанокристаллические структуры с высокими механическими свойствами за счет высокоскоростных процессов фрагментации,

динамической рекристаллизации и фазовых превращений. Фазовые превращения в ударных волнах происходят из большого числа центров в течение времени, измеряемого микросекундами, в результате образуются дисперсные структуры, не формирующиеся в исследованных материалах в квазистатических условиях.

Работа выполнена по плану РАН тема «Структура» (№ г.р. 01201064335) и при частичной поддержке проекта Президиума РАН (№12-П-2-1009) и гранта РФФИ (№11-03-00047).

PHASE AND STRUCTURAL TRANSFORMATIONS IN ALLOYS BASED ON IRON AND COPPER DURING LOADING SHOCK WAVES

I.V. Khomskaya, V.I. Zeldovich

Institute of Metal Physics, Ural Branch of RAS,
Yekaterinburg, Russia

E-mail: khomskaya@imp.uran.ru

Shock-wave loading – one of the most effective high-energy methods of hardening the materials, the main advantage of which lies in the possibility of obtaining a significant hardening with minimal shape change. The structure of metals and alloys under shock-wave treatment, changes under the influence of several factors: high pressure, high-speed deformation and temperature

This paper summarizes the experimental results of studying the evolution of structure in steels and alloys based on iron and copper with different initial structures during several methods of loading: plane shock waves with pressures $P = 12...39$ GPa, convergent shock waves, with $P = 50...200$ GPa, and high speed ($\sim 10^5$ s⁻¹) dynamic pressing ($P \leq 8$ GPa). Shock-wave experiments were conducted in the IG SB of RAS, Novosibirsk; Bauman MSTU, Moscow and RFNC–VNIITF, Snezhinsk.

The effects associated with the uniform and localized deformation determined: forming systems micro twins and configuration dislocations in the whole volume of the samples; and formation of cracks, adiabatic shear bands, areas of a strong localized flow. Three types of localized flow were proposed: shear, jet (cumulative) and turbulent (vortex).

Under the pressure $P = 12-39$ GPa in the iron-nickel alloys occurrence of the ϵ -phase of high pressure observed, γ -phase and the mechanism of f_{cc} -martensite have identified. High pressure leads to an instantaneous rise of a large number of nucleation centers. High-speed deformation promotes the formation of needle-shaped nanocrystals with different orientations and at the same time prevent their growth, due to loss of coherent communication between the crystals and the initial martensite. Under $P = 100$ GPa and more residual temperature exerts substantially influential on formation of alloy structure: $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$, $\beta \rightarrow \alpha$, $\alpha \rightarrow \beta$ and $\beta_1 \rightarrow \alpha + \gamma_2$ trans-formation, melting and crystallization occur.

Thus, the shock-wave loading and processing of the application of shock waves lead to the formation submicrocrystalline and nanocrystalline structures with high properties at the expense of high-speed processes of fragmentation, dynamic recrystallization and phase transformations. Phase transformations in shock waves originate from a large number of centers in the course of

time, measured in microseconds, resulting in formation of dispersed structures, not formed in the these materials under quasistatic pressures.

This work was supported by RAS theme «Structure» (No g.r. 01201064335) and partially supported by projects of Presidium of RAS (No 2-P-2-1009) and a grant RFBR (No 11-03-00047).

4-51

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ИМПУЛЬСНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ

Г.Г. Савенков¹, В.А. Морозов²,
И.А. Оськин¹, В.А. Брагин¹

¹Научно-исследовательский институт «Поиск»,
Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: sav-georgij@yandex.ru

Исследованию подвергались плоские образцы из алюминиевого сплава Д16, вырезанные из прутка $\varnothing 34$ мм, после следующих воздействий электронного импульсного пучка: единичное облучение сильноточным электронным пучком (СЭП), имевшего параметры – энергия электронов в пучке ~ 300 кэВ, амплитуда тока 790 А, длительность импульса ~ 20 нс, диаметр пучка 10 мм; трехкратное облучение образца СЭП с теми же параметрами и с длительностью перерыва между каждым облучением ~ 5 мин. Во всех случаях использовались катоды взрывного типа из нержавеющей стали, что приводило при генерации пучка к возникновению плазмы, которая вносит существенный вклад в разогрев анода (образца). Поэтому во втором образце (с трехкратным облучением) для отсечения плазмы между катодом и анодом (образцом) устанавливалась мелкоячеистая титановая сетка.

Целью исследований являлось изучение возможностей положительного модифицирования поверхности алюминиевых сплавов с помощью импульсного электронного пучка наносекундной длительности.

После воздействия на образцы СЭП они разрезались вдоль диаметра и изготавливались шлифы с последующим просмотром на световом микроскопе «Аксиоверт».

Исследования образцов, испытавших воздействие и электронного пучка и плазмы, показали, что действие плазмы на его лицевую поверхность является основным фактором ее деградации. В центральной зоне образца на поверхности образуется характерный шероховатый рельеф с максимальными размерами выступов и впадин до 600 мкм. Приповерхностный слой выступов оплавлен. В ряде случаев под выступами обнаружены откольные микро, мезотрещины, пересекающие 3–4 гребня. В периферийной зоне наблюдаются мезотрещины длиной до 100 мкм, идущие от поверхности вглубь образца. Такие трещины являются следствием растягивающих напряжений, возникающих при плос-

ком напряженном состоянии в тонком приповерхностном слое за счет теплового удара и пучков электронов и плазмы, температура которой достигает 3000 К. Растягивающие напряжения для мезотрещин в случае плоского напряженного состояния есть макросдвиговые напряжения, действующие на всей глубине пробега (~0,3 мм) электронов в дюралюминиевом образце.

При трехкратном действии электронного пучка на образец его микроструктура качественно меняется. В центре мишени под действием давления, возникающего в области воздействия пучка, и (вероятно) локального выброса паров металла образуется кратер глубиной ~200 мкм. В периферийной зоне действия пучка (ближе к внешнему диаметру реакционной области) на поверхности образца наблюдаются микро, мезоразрушения. Появляется сеть продольных и откольных микро, мезотрещин, поверхность приобретает характерный микрошероховатый вид. Кроме того, ближе к центру облученной зоны обнаружен, как и в первом случае, оплавленный приповерхностный слой толщиной 10–25 мкм. Задняя граница оплавленного слоя практически параллельна тыльной поверхности образца. В большом количестве наблюдаются мезотрещины длиной до 50 мкм, проходящие через оплавленный слой. В единичных случаях на лицевой поверхности образца обнаружены частицы застывшей плазмы, сферической или полусферической формы диаметром 20–50 мкм, т. е. и в этом случае наблюдается деградация поверхностного слоя образца.

На основании проведенных исследований сделан вывод о том, модифицирование поверхности алюминия и его сплавов с целью улучшения ее свойств (например, увеличение микротвердости) при помощи воздействия на нее как сильноточного электронного пучка наносекундной длительности, так и в комбинации с плазмой невозможно.

ALUMINIUM ALLOY SURFACE MODIFYING BY PULSE ELECTRONIC BUNCHES

G.G. Savenkov¹, V.A. Morozov²,
I.A. Oskin¹, V.A. Bragin¹

¹«Poisk» Research Institute, Saint-Petersburg, Russia

²Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

E-mail: sav-georgij@yandex.ru

Aluminum alloy D16 flat samples cut out of stick Ø 34 mm were studied after they had been affected by the following impulse electronic bunches: by single irradiation high-current electronic bunch (H-CEB) that had the following features – 300 kV electron power in the bunch, 790 A current amplitude, 20 ns pulse duration, 10 mm diameter of the bunch, by triple irradiation (H-CEB) that had the same features as above-mentioned and 5 min break between each irradiation. Explosive type non-corrosive cathodes were used in all experiments therefore it led to occurrence of plasma at generation of the bunch and that plasma brings essential contribution to warming up of the anode (sample). So in the second experiment (by triple irradiation) to cut off plasma the fine-mesh titanite grid had been mounted between the cathode and anode (sample). The purpose of researches was studying of possibilities of posi-

tive modifying of a surface of aluminum alloys by means of a nanosecond duration pulse electronic bunch. After having been affected by (H-CEB) the samples were cut along diameter, then metallographic sections were made and examined by means the light microscope «Axiovert» in the following.

Study of samples which were affected by both electronic bunch and plasma showed that the main factor of sample's frontal surface degradation is plasma action on it. In the central zone of the sample's frontal surface the characteristic rough relief with the maximum sizes of ledges and hollows up to 600 microns is formed. Superficial layer of ledges is melted off. In some cases under ledges chip micro, meso-splits that crossing 3–4 crests are found out. In a peripheral area 100 microns long meso splits penetrating from the surface deep into the sample are observed. Such kind of splits is a consequence of tensile stress arising at a flat tension in a thin superficial layer at the expense of a heat-stroke of both electronic bunch and plasma which reaches 3000 °K temperature. In the case of the flat tension aforementioned tensile stress for meso splits are actually micro shift tensions that operate on all the electron action way down (~0,3 mm) in dural sample. The figure of electronic bunch triple irradiation on the sample qualitatively changes. In the center of a target the ~200 microns depth crater is formed because of the stress arising in an area of electronic bunch affecting and probably because of the local emission of steams of metal. In a peripheral electronic bunch operative zone (closer to the external diameter of reactionary area) micro – meso destructions were observed on the sample's surface. The mesh of longitudinal and micro – meso split chips arose, the surface had a characteristic micro rough form. Besides like in the first experiment the superficial melted 10–25 mikrons layer was found closer to the center of irradiated zone. Boundary line of back melted layer is almost parallel to the back surface of the sample. A lot of 50 microns long meso splits penetrating through the melted layer are observed. In some cases on the frontal surface of the sample there are 20–50 microns diameter spherical or hemispheric formed particles of stiffened plasma. And thus degradation of superficial layer of the sample is observed.

In conclusion on the basis of the accomplished investigations one can say that aluminum and aluminum alloys surface modifying is impossible if the purpose is in improvement of properties of the surface (improvement of micro solidity for example) by affecting of nanosecond duration high-current electronic bunch or the last joint with plasma on the surface.

4-52

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ

С.А. Бордзиловский¹, С.М. Караханов¹, К.В. Хищенко²¹Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева
СО РАН, Новосибирск, Россия²Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия,

E-mail: karakhanov@hydro.nsc.ru; konst@ihed.ras.ru

В настоящей работе экспериментально исследовалась спектральная светимость, регистрируемая в направлении распространения ударного фронта при сжатии образцов эпоксидной смолы EC141 NF ударными волнами интенсивностью 26–40 ГПа. Проводился анализ профилей спектральной светимости при разных давлениях. На основании такого анализа определена нижняя граница давлений, при которых возможно измерение яркостной температуры за фронтом ударной волны пирометрическим методом. Измерена яркостная температура ударно-сжатых образцов смолы при 34 и 39 ГПа. Полученные экспериментальные данные в пределах точности измерения согласуются с результатами расчетов по уравнению состояния, учитывающему физико-химическое превращение эпоксидной смолы при высоких давлениях и температурах за ударным фронтом.

TEMPERATURE MEASUREMENTS AND EQUATION OF STATE OF EPOXY RESIN AT SHOCK COMPRESSION

S.A. Bordzilovsky¹, S.M. Karakhanov¹,
K.V. Khischenko²¹M.A. Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Siberian RAS,
Novosibirsk, Russia²Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia
E-mail: karakhanov@hydro.nsc.ru; konst@ihed.ras.ru

In this work, the spectral luminosity of shock-compressed epoxy resin EC141 NF in the direction of a shock front propagation is investigated experimentally in shock waves of intensity 26–40 GPa. Spectral luminosity profiles were analyzed at different pressures. On the basis of this analysis, lower boundary of pressures, at which one can measure the brightness temperature behind a shock front using a pyrometer, is determined. The brightness temperature of shock-compressed samples of the resin is measured at 34 and 39 GPa. Obtained experimental data within the measurements accuracy agree with the results of calculations using an equation of state, which takes into account a physical-chemical transformation of epoxy resin at high pressures and temperatures behind a shock front.

4-53

МОДЕЛЬ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОВ С ЭФФЕКТИВНЫМ УЧЕТОМ ИОНИЗАЦИИ. УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ Cd, Pb

А.А. Каякин, Д.Г. Гордеев,
Л.Ф. Гударенко, В.Г. КуделькинРоссийский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

Представлена модель широкодиапазонного полуэмпирического уравнения состояния (УРС) металлов. Теплоемкость, коэффициенты Грюнайзена ионов и электронов являются функциями плотности и температуры. При низких температурах теплоемкость меняется в соответствии с теорией Дебая. Учитывается снятие вырождения электронного газа при повышении температуры. Эффективно учитывается влияние процессов ионизации на термодинамические функции. УРС позволяет рассчитывать состояния в двухфазной области жидкость–пар.

С использованием данной модели разработаны уравнения состояния Cd, Pb. Для своей области применимости уравнения состояния содержит относительно небольшое число свободных параметров, большинство из которых имеет физический смысл. Представленные результаты сравнения расчетов различных изолиний по УРС с экспериментальными данными и расчетами по другим моделям показывают, что уравнения состояния Cd, Pb описывают большинство экспериментальных данных для этих веществ. В области сверхвысоких давлений и температур расчеты по УРС удовлетворительно согласуются с расчетами по модели Томаса-Ферми с поправками.

EOS MODEL FOR METALS WITH IMPLICIT ACCOUNTING FOR IONIZATION. EQUATIONS OF STATE FOR Cd, Pb

A.A. Kayakin, D.G. Gordeev,
L.F. Gudarenko, V.G. KudelkinRussian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific Research
Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

The paper presents a model of wide-range semi-empirical equations of state (EOS) for metals. The specific heat and Grueneisen coefficients of ions and electrons are the functions of density and temperature. At low temperatures, the specific heat value varies according to the Debye law. The model takes into account that the electron gas degeneracy disappears with temperature rise. The effect of ionization on thermodynamic functions is effectively accounted for in the model. EOS allows calculating the two-phase fluid–vapor region states.

The model was used to develop EOSes for Cd and Pb. For their applicability area, the developed EOSes have a relatively small number of free parameters and a major part of these parameters have a certain physical meaning. Comparison between the isolines calculated using EOSes, on the one hand, and experimental data and results of calculations with some other models, on the other hand, demonstrates that the equations of state for Cd and Pb describe most of

the available data of experiments for these materials. The results of calculations with the developed EOSes are in a good agreement with the results obtained using Thomas-Fermi model with corrections, in a region of super-high pressures and temperatures.

4-54

МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СМЕСИ С РАЗЛИЧНЫМИ СВОЙСТВАМИ КОМПОНЕНТОВ

К.К. Маевский, С.А. Кинеловский

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

E-mail: konstantinm@hydro.nsc.ru; skin@hydro.nsc.ru

Для описания поведения порошковых смесей предложена достаточно простая модель, которая, однако, обеспечивает хороший уровень соответствия эксперименту в широком диапазоне давлений, как для сплошных, так и для пористых материалов. Модель основана на предположении, что все компоненты смеси при ударно-волновом нагружении находятся в термодинамическом равновесии. Для описания поведения конденсированных фаз используются уравнения состояния типа Ми-Грюнауизена. С учетом существенного разогрева пористых материалов при динамических нагрузках предлагается рассматривать коэффициент Грюнауизена зависящим в явном виде только от температуры.

Модель позволяет достоверно описывать поведение смесей в широком диапазоне пористостей для двух и более твердых фаз в пределах точности эксперимента, используя только параметры компонентов. Хорошее описание динамических нагрузок получено для смесей с компонентами, имеющими разные свойства. Для смеси вольфрама с парафином во всем диапазоне имеющихся данных получено хорошее соответствие эксперименту. Произведено сравнение с ранее проведенными расчетами других авторов.

Данная модель позволяет определять соотношение компонентов смеси с целью получения заданных параметров после динамического воздействия.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 10-03-00527).

MODEL OF DYNAMIC EFFECTS ON THE MIXTURE COMPONENTS WITH DIFFERENT PROPERTIES

K.K. Maevskij, S.A. Kinelovskij

Lavrentyev Institute of hydrodynamics, Siberian Branch
of RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: konstantinm@hydro.nsc.ru; skin@hydro.nsc.ru

To describe the behavior of powder mixes offered fairly simple model, which, however, provides a good level of compliance testing in a wide range of pressures, both for solid and porous materials. The model is based on the assumption that all components of the mixture by the shock wave loading are in thermal equilibrium. Equations of

the state of Mie-Grüneisen type are used to describe the behavior of the condensed phases. In view of the substantial heating porous materials under dynamic loads are invited to consider the Mie-Grüneisen function explicitly dependent only on temperature.

The model allows you to accurately describe the behavior of the mixtures in a wide range of porosity or two or more solid phases within the accuracy of the experiment, using only the component settings. A good description of the dynamic forces received in the case of mixtures with components which have different properties. For mixtures of tungsten with paraffin in the full range of available data received good conformity experiment. Made comparison with previously conducted calculations by other authors.

This model allows for selection of correlations of mixture components with the purpose to receive constrained parameters after shock wave influence.

This work is supported by Integration Project of the Siberian Division of the Russian Academy of Sciences (Grant No. 10-03-00527).

4-55

СКОРОСТЬ ЗВУКА В МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СМЕСИ

В.Ф. Куропатенко

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: v.f.kuropatenko@vniitf.ru

В многокомпонентной смеси (МКС) компоненты могут находиться в любом из агрегатных состояний: твердом, жидком, газовом и в состоянии плазмы. Свойства смеси и характер взаимодействия компонентов C_p сильно зависят от состояния каждого компонента и от характера воздействий на МКС. Законы сохранения должны выполняться для каждого компонента в отдельности и для смеси в целом. Плотность, энергия и скорость смеси выражаются через соответствующие характеристики компонентов и массовые или объемные концентрации. Эти связи определяются мгновенными законами сохранения. С производными основных характеристик вещества дело обстоит сложнее. К таким производным относятся давление и температура, теплоемкости и C_p , сжимаемость, коэффициент объемного расширения и скорость звука. В механике сплошных сред показано, что малые возмущения распространяются в сплошной однородной среде со скоростью, определяемой формулой

$$C = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s}$$

Производная давления по плотности при постоянной энтропии определяется уравнением состояния среды. Но в МКС уравнения состояния имеются лишь у каждого компонента, а у смеси уравнения состояния нет. Чтобы преодолеть это затруднение при определении скорости звука смеси, делаются различные упрощающие предположения о равенстве скоростей и давлений компонентов, о постоянстве энтропии смеси и компонентов, о постоянстве массовых концентраций и некоторые

другие. В результате получаются формулы, связывающие скорость распространения малых возмущений в смеси со скоростями звука, концентрациями и другими характеристиками компонентов. Наибольшее распространение получила формула Лойтянского. В работе анализируются различные уравнения для скорости звука смеси и предлагается и обосновывается формула, для получения которой требуется минимум упрощающих предположений.

Работа поддержана РФФИ. Грант 10-01-00032.

SOUND VELOCITY IN MULTI-COMPONENT MIXTURE

V.F. Kuropatenko

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

E-mail: v.f.kuropatenko@vniitf.ru

In a multi-component mixture (MCM), components can be in any of aggregate states: solid, liquid, gaseous, and plasma. Mixture properties and character of components interaction strongly depend on the state of each component and on the character of impact on MCM. Conservation laws are to be true for each component individually and for the mixture on the whole. Density, energy, and velocity of the mixture are expressed via appropriate characteristics of components, as well as mass or volume concentrations. These links are conditioned by the instantaneous conservation laws. As for derivatives of the main characteristics, the situation is more complicated. These derivatives are pressure and temperature, heat capacities C_p and C_v , compressibility, coefficient of volume expansion, and sound velocity. In continuum mechanics, small perturbations are shown to propagate in the continuous uniform media with the velocity defined by the formula

$$c = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s}$$

The pressure derivative by density at constant entropy is defined by EOS of medium. But in MCM, equations of state exist only for each component, and the mixture has no EOS. In order to overcome this challenge while defining the sound velocity of the mixture, different simplifying assumptions are made on equality of velocities and pressures of the components, on stable entropy of the mixture and its components, on stability of mass concentrations and some others. As the result, one obtains formulas relating the rate of small perturbations propagation in the mixture with sound velocities, concentrations, and other characteristics of components. The Loityansky formula is the most widely spread. The study analyzes various equations for the mixture's sound velocity, as well as proposes and substantiates the formula which requires minimum simplifying assumptions to be derived.

4-56

ПОСТРОЕНИЕ МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ЗАВИСИМОСТЯМ $D(U)$

В.Ф. Куропатенко, С.Ю. Филатов

Российский федеральный ядерный центр – ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

E-mail: oteldou@vniitf.ru

Предложен способ построения малопараметрических уравнений состояния с использованием экспериментальных зависимостей $D(U)$ для нескольких веществ и соединений. Подбор основных параметров уравнения состояния выполнен при помощи оригинальной версии симплекс метода. В качестве целевой функции выбрана сумма квадратичных разностей между расчетными и экспериментальными значениями функции $\ln(\rho)$. Проведено сравнение теоретической и экспериментальной ударных адиабат. Для ряда материалов получено удовлетворительное совпадение. Метод построения малопараметрических уравнений состояния можно распространить на другие вещества и соединения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №10-01-00032.

4-57

МЕЖДУНАРОДНАЯ БАЗА ДАННЫХ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

И.В. Ломоносов¹, К.В. Хищенко^{2,3}, П.Р. Левашов^{2,3}, Д.В. Минаков^{2,3}, А.С. Захаренков², Дж.Б. Айдуна⁴

¹Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

³Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

⁴Сандийские национальные лаборатории, Альбукерке, США

E-mail: pasha@ihed.ras.ru

В данной работе анонсируется новый проект: международная база данных ударно-волновых экспериментов (ISWdb). Ударно-волновые и другие данные по отклику материалов при нагружении нужны для калибровки, проверки и улучшения моделей различных свойств веществ в широкой области фазовой диаграммы. Как продолжение существующей базы данных, новая база данных будет включать примерно 20 000 экспериментальных точек по ударной сжимаемости, адиабатическому расширению, измерению скорости звука за фронтом ударной волны и профилей скорости свободной поверхности для более 650 веществ. Цели проекта следующие: (1) разработать базу данных по термодинамическим и механическим свойствам материалов в условиях ударно-волновых и других динамических воздействий, которая также будет включать некоторую дополнительную информацию по экспе-

риментальным методикам и моделям; (2) сделать базу данных доступной через Интернет для международного научного сообщества. Разработка и обслуживание базы данных будет производиться консультативным комитетом. База данных будет установлена на двух зеркалированных серверах, в России и в США. База данных будет обеспечивать доступ к оригинальным экспериментальным данным по ударному сжатию, безударному динамическому нагружению, изэнтропическому расширению, измерениям скорости звука на ударной адиабате и профилям скорости свободной поверхности образца или его границы с измерительным окном. Пользователи получат возможность поиска информации в базе данных и получения экспериментальных точек в табличном или текстовом форматах непосредственно через Интернет с использованием традиционных браузеров. Также будет обеспечено графическое представление экспериментальных данных для сравнения с различными аппроксимациями и результатами расчетов по уравнениям состояния. Пользователь также сможет представить результаты термодинамических расчетов в текстовом или графическом формате и сравнить их с любой экспериментальной информацией в базе данных. Международная база данных ударно-волновых экспериментов должна стать полезным инструментом для ударно-волнового сообщества. Работа поддержана контрактом с SNL #1143875.

INTERNATIONAL SHOCK-WAVE DATABASE

I.V. Lomonosov¹, K.V. Khishchenko^{2, 3}, P.R. Levashov^{2, 3},
D.V. Minakov^{2, 3}, A.S. Zakharenkov², J.B. Aidun⁴

¹Institute of Problems of Chemical Physics RAS,
Chernogolovka, Russia

²Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

³Moscow Institute of Physics and Technology,
Dolgoprudny, Russia

⁴Sandia National Laboratories, Albuquerque, USA

E-mail: pasha@ihed.ras.ru; strider@ihed.ras.ru

In this work, we announce the start of a new project: International Shock-Wave data base (ISWdb). Shock-wave and related dynamic material response data serve for calibrating, validating, and improving material models over very broad regions of the pressure-temperature-density phase space. As a follow-on to our current on-line database, the ISWdb will include approximately 20 000 experimental points on shock compression, adiabatic expansion, measurements of sound velocities behind the shock front and free-surface-velocity for more than 650 substances that we previously collected. The ISWdb project objectives are: (i) to develop a database on thermodynamic and mechanical properties of materials under conditions of shock-wave and other dynamic loadings, selected related quantities of interest, and the meta-data that describes the provenance of the measurements and material models; and (ii) to make this database available internationally through the Internet, in an interactive form. The development and operation of the ISWdb will be guided by an advisory committee. The database will be installed on two mirrored web-servers, one in Russia and the other in USA. The database will provide access to original experimental data on shock compres-

sion, non-shock dynamic loadings, isentropic expansion, measurements of sound speed in the Hugoniot state, and time-dependent free-surface or window-interface velocity profiles. Users will be able to search the information in the database and obtain the experimental points in tabular or plain text formats directly via the Internet using common browsers. It will also be possible to plot the experimental points for comparison with different approximations and results of equation-of-state calculations. The user will be able to present the results of calculations in text or graphical forms and compare them with any experimental data available in the database. Our goal is to make the ISWdb a useful tool for the shock-wave community. This work is supported by SNL contract #1143875.

4-58

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТЕРМОСТАТОВ БЕРЕНДСЕНА И НОЗЕ-ХУВЕРА В ЗАДАЧАХ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

В.С. Рыкованов, Г.В. Ионов

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Теоретическое моделирование невозможно без методов, адекватно описывающих процессы и соответствующие характеристики физических систем. Одной из ключевых термодинамических характеристик является температура. Поэтому, в молекулярно-динамических (МД) исследованиях, как и в реальных экспериментах, необходимым является инструмент, позволяющий управлять температурой системы. Он называется термостатом. Существует множество вариантов термостатов, но мы рассмотрим два наиболее распространенных.

В работе на примере кристаллического аргона детально исследовано влияние термостатов Берендсена и Нозе-Хувера на порядок точности разностной схемы Leapfrog в зависимости от величины шага по времени и изменение распределения энергии в образце с течением времени по частотам коллективных колебаний атомов (мод колебаний).

Получены следующие результаты:

1. При достаточно малых шагах по времени термостат Берендсена понижает порядок точности разностной схемы Leapfrog со второго до первого. В случае нулевого характерного времени (так называемый масштабирующий термостат) порядок точности метода Leapfrog будет равен 1 при любой величине шага. Кроме того, термостат Берендсена постепенно переводит всю энергию системы в область низкочастотных колебаний.

2. Термостат Нозе-Хувера не оказывает сколько-нибудь заметного влияния на порядок точности алгоритма Leapfrog. С течением времени термостат Нозе-Хувера не меняет распределения энергии системы по модам. Неотъемлемым свойством термостата Нозе-Хувера является порождение незатухающих колебаний температуры системы в случае, если начальные температуры термостата и системы отличаются.

На основе проведенного анализа сделаны выводы о целесообразности применения термостата Берендсена

в тех задачах, где температура системы меняется во время МД расчета, и термостата Нозе-Хувера для расчетов, в которых необходимо поддержание постоянной температуры на длительных временах.

INVESTIGATION INTO BERENDSEN AND NOSE-HOOVER THERMOSTAT PROPERTIES IN MOLECULAR DYNAMICS SIMULATIONS

V.S. Rykovanov, G.V. Ionov

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

Theoretical modeling is impossible without methods, properly describing processes and appropriate characteristics of physical systems. Temperature is one of the fundamental thermodynamic characteristics. That's why in molecular dynamics (MD) simulations as in real experiments a tool is necessary to control temperature. This instrument is named the thermostat. There are a lot of thermostats, but we studied two most used.

In present work with the use of crystalline argon sample the effect of Berendsen and Nose-Hoover thermostats on the order of the convergence of the Leapfrog difference scheme depending on the time step value was studied in detail. The evolution with time of energy distribution among frequencies of the collective vibrations of atoms (vibration modes) in the sample was investigated.

The results are:

1. Berendsen thermostat decreases the order of convergence of the Leapfrog difference scheme from second to first one if a time step is rather small. In the case when characteristic time is equal to zero (so-called scaling thermostat), the convergence of the Leapfrog method corresponds to first order for any time step value. Moreover, the Berendsen thermostat transfers step-by-step whole system energy to the low-frequency modes.

2. Nose-Hoover thermostat does not noticeably affect the order of convergence of the Leapfrog algorithm. Also it does not change the distribution of system energy among different vibration modes. The essential property of Nose-Hoover thermostat is the generation of the sustained oscillation of system temperature in the case when initial temperatures of the thermostat and the sample are not equal.

Basing on carried out analysis, the several conclusions were made: the Berendsen thermostat is suitable for the MD simulations of systems with changing temperatures; the Nose-Hoover thermostat is suitable for long time simulations of systems with constant temperatures.

4-59

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОЛЕКУЛ ОКСИДОВ ПЛУТОНИЯ ПРИ ПОМОЩИ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ТЕОРИИ ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ

С.С. Мальков¹, А.В. Зайцевский^{2, 3},
А.В. Титов³, Н.М. Киселев⁴

¹Московский государственный педагогический университет, Москва, Россия,

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³Петербургский институт ядерной физики, Гатчина, Россия

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия,

E-mail: sergmalkof@gmail.com; zaitsevskii@kintechlab.com; titov@pnpi.spb.ru; yu_m@mail.ru

Двухкомпонентная релятивистская модель электронной структуры, определяемая прецизионными согласованным по форме псевдопотенциалом малого атомного остова [1], в сочетании с релятивистской теорией функционала плотности как средства решения задачи о состоянии валентных и субвалентных электронных оболочек применена к описанию основных электронных состояний молекул оксидов и некоторых оксофторидов плутония. Расчеты проводились со специально разработанными наборами сгруппированных гауссовых базисных функций ([8s8p6d5f2g] для Pu), оптимизированными с учетом спин-орбитальных взаимодействий и позволившими практически исключить эффекты неполноты базиса (в частности, суперпозиционные ошибки). Проанализирована зависимость результатов расчетов от выбора приближения для обменно-корреляционного функционала и вклады зависящих от спина (магнитных) релятивистских взаимодействий в энергетические характеристики. Основное внимание уделено молекуле тетраоксида плутония и гипотезе о существовании ее симметричной тетраэдрической формы [2]. Показано, что расчет с наиболее распространенными обобщенными градиентными и гибридными обменно-корреляционными функционалами уверенно предсказывает квадратную (D4h) равновесную структуру этой системы, в то время как минимум энергии для тетраэдрической (Td) конфигурации ядер соответствует седловой точке потенциальной гиперповерхности с энергией около 2,5 эВ относительно равновесной конфигурации. Игнорирование зависящих от спина релятивистских эффектов, т. е. переход к скалярному релятивистскому приближению, не приводит к значительному изменению этого результата.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты 10-03-00727, 11-03-12155-офи-м и 12-03-00821).

Литература

1. Mosyagin N.S., Zaitsevskii A., Titov A.V. // *Int. Rev. At. Mol. Phys.*, 2010. V.1, no.1. P. 63–72.
2. Киселев М.Ю., Никонов В.М., Долженко В.Д. и др. // *Доклады РАН*. Т. 426, no. 1. С. 51–55.

RELATIVISTIC DENSITY FUNCTIONAL MODELING OF PLUTONIUM OXIDE MOLECULES

S.S. Mal'kov¹, A.V. Zaitsevsky^{2,3},
A.V. Titov³, Yu.M. Kiselev⁴

¹Moscow State Pedagogical University, Moscow, Russia

²NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

³Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, Russia

⁴M.V. Lomonosov Moscow State University, Russia

E-mail: sergmalkof@gmail.com; zaitsevskii@kintechlab.com;
titov@pnpi.spb.ru; yu_m@mail.ru

Two-component relativistic electronic structure model defined by accurate small-core shape-consistent relativistic pseudopotentials (RPP, [1]) combined with relativistic density functional theory as a tool for solving the many-electron valence / sub-valence problem is used to describe some plutonium oxide and fluoroxide molecules in their ground electronic states. The calculations were performed with specially designed contracted Gaussian bases ([8s8p6d5f2g] for Pu), optimized for spin-orbit-coupled case and enabling one to suppress the basis set incompleteness effects (in particular, superposition errors). The dependence of the results on the choice of approximate exchange-correlation functional and the contributions of relativistic spin-dependent interactions to energy properties are analyzed. We focus on the study of plutonium tetroxide molecule and check the hypothesis of its tetrahedral (Td) structure [2]. Calculations with different generalized-gradient and hybrid exchange-correlation functionals consistently predict the square (D4h) equilibrium structure of this system, whereas the energy minimum for Td configuration lies ca. 2.5 eV above the equilibrium. The neglect of spin-dependent relativistic interactions (i.e. passing to the scalar relativistic approximation) does not significantly affect this result.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Investigations (grants # 10-03-00727, 11-03-12155-ofi-m, and 12-03-00821)

References

1. Mosyagin N.S., Zaitsevskii A., Titov A.V. // *Int. Rev. At. Mol. Phys.*, 2010. V. 1, no.1. P. 63–72.
2. Kiselev Yu.M., Nikonov V.M., Dolzhenko V.D. et al. // *Doklady Chemistry*, 2009. V.426, no.1. P. 91–95

4-60

ОПТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗРЫВНОГО ВСКИПАНИЯ ПЕРЕГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ

А.Л. Гурашкин, А.Д. Ямпольский,
А.А. Старостин, П.В. Скрипов

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: nano-studio@yandex.ru

Перегретое состояние жидкости получают, нагревая образец выше температуры равновесия жидкость – пар при заданном давлении. Ее отличительной характеристикой является ограниченное время существова-

ния, что сильно осложняет измерение ее свойств [1]. Запасенное на стадии разогрева тепло обеспечивает большую скорость фазового перехода и превращается в механическую работу с эффектом «взрывного вскипания». Для исследований жидкости в перегретом состоянии используется «пузырьковая камера» [2]. Применение капилляра в качестве рабочей ячейки позволяет создать необходимые условия для перегрева жидкости в ограниченном объеме, но затрудняет исследование процесса вскипания обычными методами и приборами. Исследование процесса вскипания с помощью быстродействующей телекамеры позволило определить характер зарождения и динамику роста пузырьков на начальной стадии фазового перехода [3]. Вместе с тем, для более детального исследования необходимо иметь средство для исследования быстрых процессов в микросекундном диапазоне. Существенные преимущества для поставленной задачи дает метод косвенных измерений плотности перегретой жидкости через показатель преломления с помощью оптоволоконных датчиков [4]. Для одновременного исследования оптических и теплофизических свойств перегретой жидкости, а также явлений, сопровождающих вскипание, в состав установки включен оптоволоконный измерительный элемент. Как выяснено, этот элемент не инициирует более раннее вскипание жидкости. Применение оптоволоконного зонда позволяет оценить показатель преломления жидкости с погрешностью 10^{-3} – 10^{-4} практически до границы достижимого перегрева. Для проведения измерений собрана оптическая схема, включающая источники излучения, фотоприемник, сумматор, аттенуатор, разветвитель, оптоволоконный зонд. Высокоскоростная регистрация измеряемых процессов осуществляется с помощью быстродействующего преобразователя с субмикросекундным разрешением. Работа установки автоматизирована и может производиться в циклическом режиме для набора статистически значимого объема информации.

Показано, что начало процесса вскипания из метастабильного состояния перегретого n-гексана сопровождается изменением показателя преломления, соответствующему скачку плотности на величину около 1% за 5 – 10 мкс.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 10-08-00538-а.

Литература

1. Скрипов В.П. *Метастабильная жидкость*. М.: Наука, 1972. 312 с.
2. Ермаков Г.В. *Термодинамические свойства и кинетика вскипания перегретых жидкостей*. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 272 с.
3. Ermakov G.V., Lipnyagov E.V., Perminov S.A., Gurashkin A.L. Heterogeneous boiling-up of superheated liquid at achievable superheat threshold // *J. Chem. Phys.* 2009. Jul 21;131(3):031102.
4. Авдеев М.В., Баграташвили В.Н. и др. Двухканальная оптоволоконная рефлектометрия сверхкритических сред. // *Сверхкритические флюиды: теория и практика*, 2007, т. 2, № 1, с. 28–39.

OPTICAL INVESTIGATION OF SUPERHEATED LIQUID EXPLOSIVE BOILING

A.L. Gurashkin, A.D. Yampol'skiy,
A.A. Starostin, P.V. Skripov

Institute of Thermalphysics, Ural Branch of RAS,
Yekaterinburg, Russia

E-mail: nano-studio@yandex.ru

Superheated liquids are obtained by heating a sample over the temperature of liquid-gas equilibrium at given pressure. The limited lifetime is its distinguishing feature, which highly complicates the measurement of its properties [1]. The heat energy, accumulated during heating, provides higher speed of phase transition and transfers to mechanical work with the effect of «explosion boiling». For studying liquids in superheated state the «bubble chamber» (a capillary) is used [2]. Utilization of capillary as an experimental cell allows to create the desired conditions for superheating of liquid in a limited volume, but impedes a measurement of boiling process with conventional methods and instruments.

The measurement of process of boiling with a high-speed video camera allowed determining the character of bubble formation and dynamics of bubble growing in the beginning stage of the phase transition [3]. Together with that a mean of fast process investigation in microsecond scale is required. The method of indirect density measurement through a refractive index of superheated liquid with a fiber-optic sensor shows the main advantage for the present task [4]. The fiber-optic sensor is included into experimental apparatus for simultaneous analysis of optical and thermophysical properties of superheated liquid, as well as phenomena that accompany process of boiling.

As it turned out, this sensor does not trigger earlier boiling. The employment of fiber-optic sensor enables to estimate the refractive index with an error of 10^{-3} – 10^{-4} practically up to the boundary of attainable superheating. The optical scheme for the measurements was assembled, it includes beam sources, photodetector, summator, attenuator, splitter and fiber-optic probe. The high-speed registration of measured parameters is conducted with a quick-operating analog-to-digital converter with submicrosecond resolution. The operation of the apparatus is automated and can be performed in a cyclic mode to collect statistically significant amount of data.

It is shown that beginning of boiling of superheated n-hexane is accompanied by its refractive index change, which is equivalent to the 1 percent jump of density in 5 – 10 microseconds.

The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Project Nos. 10-08-00538)

References

1. Skripov V.P. *Metastable Liquids* (Halsted, New York, 1974).
2. Ermakov G.V. *Thermodynamic properties and kinetics of boiling of superheated liquids*. Yekaterinburg: Ural Branch of RAS, 2002. 272 c.
3. Ermakov G.V., Lipnyagov E.V., Perminov S.A., Gurashkin A.L. Heterogeneous boiling-up of superheated liquid at achievable superheat threshold // *J. Chem. Phys.* 2009. Jul 21;131(3):031102.
4. Avdeev M.V., Kononov A.N., Bagratashvili V.N., Popov V.K., Tsygina S.I., Sokolova M., Ke J. and Poliakoff M. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 6,1258(2004).

4-61

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПЕРЕОХЛАЖДЕННОЙ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

В.Г. Байдаков, А.О. Типеев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: baidakov@itp.uran.ru

Методом молекулярной динамики исследован процесс спонтанной кристаллизации переохлажденной жидкости. Расчеты проводились в NVE ансамбле при температуре тройной точки и при нулевом давлении в системах, содержащих от 2048 до 10^7 леннард-джонсовских частиц. В процессе интегрирования уравнений движения рассчитывались давление, температура, внутренняя энергия, и записывались координаты всех частиц в системе.

Через средние времена жизни метастабильной жидкости $\bar{\tau}$ рассчитана частота кристаллизации

$$J = (\bar{\tau}V)^{-1},$$

где V – объем моделируемой системы. Расчеты проведены в интервале $J = 10^{31} - 10^{35} \text{ c}^{-1}\text{M}^{-3}$. С использованием локального параметра порядка связи Q6 выделены кристаллические кластеры в переохлажденной жидкости. В рамках формализма среднего времени первого перехода определены фактор Зельдовича Z и размер критического кристаллического зародыша n_* . Анализ эволюций зародышей околокритического размера позволил вычислить коэффициент диффузии зародышей в пространстве их размеров $D(n_*)$.

Согласно классической теории гомогенной нуклеации частота образования кристаллического зародыша определяется формулой

$$J = \tau D(n_*) Z \exp(-W_* / k_B T), \quad (1)$$

где ρ , T – плотность и температура метастабильной жидкости; W_* – работа образования критического зародыша:

$$W_* = \frac{16\pi}{3} \frac{\gamma^3}{(p_{*s} - p)^2}, \quad (2)$$

где p_{*s} и p – давления критического кристаллического зародыша и метастабильной жидкости соответственно.

По полученным значениям величин J , Z , $D(n_*)$ из формулы (1) определена работа образования критического зародыша W_* . Из условия вещественного равновесия критического зародыша и метастабильной фазы рассчитано давление в критическом кристаллике. Это позволило из уравнения (2) вычислить значение эффективной поверхностной энергии γ и определить ее барическую и температурную зависимости.

Показано, что в исследованном интервале параметров состояния значение γ при $T = \text{const}$ примерно на 10% больше, чем на плоской межфазной границе γ_∞ . Если жидкость переохлаждается в изобарическом процессе, то поверхностная свободная энергия критических кристаллических зародышей $\gamma < \gamma_\infty$ и убывает по мере переохлаждения, достигая значения $\sim 0.8\gamma_\infty$ при $J = 10^{34} \text{ c}^{-1}\text{M}^{-3}$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы Президиума РАН № 2.

4-62

DETERMINATION OF CRYSTALLIZATION PARAMETERS OF A SUPERCOOLED LIQUID BY MOLECULAR DYNAMICS

V.G. Baidakov, A.O. Tipeev

Institute of Thermophysics of the Ural Branch of RAS,
Yekaterinburg, Russia

E-mail: baidakov@itp.uran.ru

The process of spontaneous crystallization of a supercooled liquid has been investigated by molecular dynamics simulation. Calculations were carried out in an NVE ensemble at the triple point and at zero pressure in systems containing from 2048 to 10^7 Lennard-Jones particles. In the process of integrating the equations of motion pressure, temperature, internal energy were calculated and the coordinates of all particles in the system were stored.

Through the mean lifetime of a metastable liquid $\bar{\tau}$ the crystallization rate $J = (\bar{\tau}V)^{-1}$ is calculated, where V is the volume of the system. Calculations have been made in a range $J = 10^{31} - 10^{35} \text{ s}^{-1}\text{m}^{-3}$. With the use of the bond local order parameter Q6 crystalline clusters in the supercooled liquid were defined. In the formalism of the method of the mean first passage time the Zeldovich factor Z and the size of the critical crystal nucleus n_* were computed. Analysis of the evolutions of near-critical nuclei allowed calculating the coefficient of the size diffusion of nuclei $D(n_*)$.

According to classical homogeneous nucleation theory the rate of formation of a crystal nucleus is given by

$$J = \rho D(n_*) Z \exp(-W_* / k_B T), \quad (1)$$

where ρ , T are the density and the temperature of a meta-stable liquid, W_* is the work of critical nucleus formation:

$$W_* = \frac{16\pi}{3} \frac{\gamma^3}{(p_{*s} - p)^2}, \quad (2)$$

where p_{*s} and p are the pressures of the critical crystal nucleus and the metastable liquid, respectively.

According to the obtained values of quantities J , Z , $D(n_*)$ the work of critical nucleus formation was determined by using (1). From the condition of the real balance of the critical nucleus and the metastable phase the pressure in critical crystals is calculated. This made it possible to calculate the value of the effective surface energy γ from Eq. (2) and determine its baric and temperature dependence.

It is shown that in the range of state parameters under investigation the surface free energy of crystal nuclei γ at $T = \text{const}$ is 10% larger than that at a flat interface γ_∞ . If the liquid is supercooled in an isobaric process, the surface free energy of critical crystal nuclei $\gamma < \gamma_\infty$ and decreases with supercooling, reaching a value of $\sim 0.8\gamma_\infty$ at $J = 10^{34} \text{ s}^{-1}\text{m}^{-3}$.

This work has been performed with a financial support of the Programme of the Presidium of the Russian Academy of Sciences № 2.

УСТОЙЧИВОСТЬ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ГИДРИДА ТИТАНА (TiH₂) ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ УДАРНОГО СЖАТИЯ

А.А. Гольшев, Д.В. Шахрай,
А.М. Молодец, В.Е. Фортгов

Институт проблем химической физики РАН,
Черноголовка, Россия

E-mail: golyshhev@icp.ac.ru

Изучение физико-химических свойств гидридов металлов при высоких давлениях стимулируется рядом важных задач, например, металлизация водорода в области давлений 100–200 ГПа за счет его так называемого «химического сжатия» или использованием этих соединений в качестве водородаккумулирующих материалов. В [1] было показано, что TiH₂ можно использовать в качестве катализатора для обратимого гидрирования комплексных гидридов. В этой связи исследования устойчивости кристаллической структуры гидрида титана при высоких давлениях и температурах актуальны.

В данной работе изучались изменения кристаллической структуры в гидриде титана TiH₂ после ступенчатого ударного сжатия и последующего сохранения образцов. Образцы помещались в вольфрамовые накопители [2], которые нагружались ступенчатыми ударными волнами до давлений ≈ 40 ГПа и температур до ≈ 700 К. Образцы после ударно-волнового эксперимента исследовали на рентгеновском дифрактометре.

Оценки температур ударного сжатия гидрида титана производили на основе специально разработанного уравнения состояния. Были также рассчитаны фазовые траектории (зависимости температуры от давления) ступенчатого ударного сжатия образцов. Профиль давления ударно-волнового нагружения регистрировали в специальных экспериментах с помощью манганинового датчика, а так же рассчитывались с помощью полумпирических УРС.

Показано, что ударное сжатие не приводит к измельчению частиц образца. Кроме этого, дифрактограммы сохраненного образца, сохраняют особенности дифракционных пиков рентгенограмм исходного TiH₂. Используемые методы диагностики, сохраненных после ударного сжатия образцов, свидетельствуют о том, что частицы TiH₂ сохраняют свою кристаллическую структуру при высоких давлениях и температурах ударного сжатия. Установлено, что в условиях высоких давлений (40 ГПа) и температур (700 К) не происходит декомпозиции исходного соединения на составные элементы титан и водород.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, грант № 10-02-01078.

Литература

1. Wang P., et al. // J.Phys.Chem. 2005. В109, 20131.
2. Молодец А.М., Шахрай Д.В., Савиных А.С. «Квази-изэнтропическое сжатие гидрида фуллерена и оценка его термодинамических свойств при высоком давлении // ФТТ, 2010. Т. 52, вып. 1. С. 191–195.

STABILITY OF CRYSTAL STRUCTURE OF TITANIUM HYDRIDE (TiH₂) AT HIGH PRESSURES OF SHOCK COMPRESSION

A.A. Golyshev, D.V. Shakhray,
A.M. Molodets, V.E. Fortov

Institute of Problems of Chemical Physics of RAS,
Chernogolovka, Russia
E-mail: golyshev@icp.ac.ru

Study of physico-chemical properties of metal hydrides at high pressures, stimulated by a number of important tasks, for example, metallization of hydrogen at pressures of 100–200 GPa at the expense of his so-called «chemical compression» or the use of these compounds as hydrogen storage materials. In work [1] it was shown that TiH₂ can be used as a catalyst for the reversible hydrogenation of complex hydrides. In this regard investigate of the stability of the crystal structure of titanium hydride at high pressures and temperatures are relevant.

In this work we studied the changes in the crystal structure of titanium hydride TiH₂ after stepwise shock compression with subsequent maintenance of the samples. The samples were placed in a tungsten anvils [2], which are were loaded stepwise shock waves up to pressures ≈40 GPa and temperatures up to ≈700 K. Samples after shock-wave experiment examined on the X-ray diffractometer.

Estimates of shock compression temperature of titanium hydride were carried out on the basis of a specially designed equation of state. Were also calculated the phase trajectories (the temperature dependence of the pressure) of stepwise shock compression of samples. Pressure profile of the shock-wave loading registered in special experiments with manganin gauge, as well as calculated using the semiempirical EOS.

It is shown that the shock compression does not lead to a refinement of the sample particles. In addition, the diffractogram of the stored sample, retain features of X-ray diffraction peaks of the original TiH₂. Used in this paper diagnostic methods of samples stored after shock compression, indicate that the particles of TiH₂ retain their crystal structure at high pressures and temperatures of shock compression. It is established that initial material is not decomposed into its constituent elements hydrogen and titanium at high pressures (≈40 GPa) and temperatures (≈700 K).

This work was partially financial support RFBR, grant № 10-02-01078.

References

1. Wang P., et al. // *J. Phys. Chem.* 2005. B109, 20131
2. Molodets A.M., Shakhray D.V., Savinykh A.S. Quasi-isentropic compression of C(60)H(36) hydrofullerene and the evaluation of its thermodynamic properties at high pressures // *PHYS. SOLID. ST.* 2010, V. 52 № 1, P. 206–211.

4-63

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СЖАТИЯ НА ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД В НИТРИДЕ КРЕМНИЯ

В.А. Кудаккина¹, В.В. Якушев²,
А.Н. Жуков², А.И. Рогачева²

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

²Институт проблем химической физики РАН,
Черноголовка, Россия

E-mail: vera257@list.ru

Проведено исследование превращения нитрида кремния в γ -фазу в условиях высокотемпературного ударного сжатия (метод ВТУС [1]) при давлении 36 ГПа с использованием в качестве добавок в образец солей KBr, KCl. Для сравнения проведены эксперименты с добавками медного порошка (см. также [2, 3]), и с образцом из чистого нитрида кремния без добавок. Рентгенографическим методом Ритвелда определен количественный фазовый состав нитрида кремния в сохраненных образцах и его структурные особенности. Произведены расчеты температур ударного сжатия образцов и температур их охлаждения в разгрузке. С помощью методики манганиновых датчиков показано, что в образцах, заключенных в ампулы сохранения, достигается максимальное давление, равное давлению в крышке ампулы в момент столкновения с ударником (36 ГПа). Установлено, что метод ВТУС обеспечивает более высокую степень превращения нитрида кремния в γ -фазу по сравнению с методикой, когда в качестве добавки в образец используется медный порошок.

Литература

1. Курдюмов А.В., Бритун В.Ф., Боримчук Н.К., Ярош В.В. Мартенситные и диффузионные превращения в углероде и нитриде бора при ударном сжатии. Киев: Куприянова О.О. – 2005. 192 с.
2. Sekine T., He Hongliang, Kobayashi T., Zhang Ming, and Xu Fangfan. Shock-induced transformation of Si₃N₄ to high-pressure cubic-spinel phase // *Appl. Phys. Letters*. 2000, v. 76, no. 25, p. 3706–3708.
3. Юношев А.С. Ударно-волновой синтез кубического нитрида кремния // *Физика горения и взрыва*. Т. 40. № 3. 2004. С.132–135.

THE INFLUENCE OF HIGH TEMPERATURE SHOCK COMPRESSION ON SILICON NITRIDE PHASE TRANSFORMATION

V.A. Kudakina¹, V.V. Yakushev²,
A.N. Zhukov², A.I. Rogacheva²

¹Lomonosov Moscow State University, Russia, Moscow,

²Institute of Problems of Chemical Physics RAS,
Chernogolovka, Russia

E-mail: vera257@list.ru

The research of silicon nitride transformation to its γ -phase under high temperature shock compression (HTSC method [1]) was conducted at a pressure of 36 GPa using alkali halides (KBr, KCl) as additives into the samples. The

same experiments were fulfilled with samples containing copper powder additives (see also [2, 3]), and those with pure silicon nitride for the comparison. Quantitative phase analysis and structure features of the recovered silicon nitride were carried out by X-ray Rietveld refinement. It was calculated samples' heating temperatures during the shock compression and their cooling in the release wave. The experiments with manganin gages confirmed that the pressure in samples, enclosed in recovery ampoules, achieves its maximum value of 36 GPa before coming of the release wave. It was showed that HTSC method provides higher transformation degree of silicon nitride to its γ -phase in comparison with that when copper powder additive is used.

References

1. Kurdyumov A.V., Britun V.F., Borimchuk N.I., Yarosh V.V. Martensitnie i diffusionnie prevrascheniya v ugleode I nitride bora pri udarnom sjatii. Kiev: Kupriyanova O.O. 2005. p. 192; Kurdyumov A.V., Britun V.F., Yarosh V.V. et al. Phase transformations of carbon-black in high-temperature shock compression // Journal of Superhard Materials 2009, v. 31, no. 5, p. 311–317.
2. Sekine T., He H., Kobayashi T., Zhang Ming, and Xu Fangfan. Shock-induced transformation of Si_3N_4 to high-pressure cubic-spinel phase // Appl. Phys. Letters. 2000, v. 76, no. 25, p. 3706–3708.
3. Yunoshev A.S. Shock Wave Synthesis of Cubic Silicon Nitride // Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2004, v. 40, no. 3, p. 370–373.

висящая от одного внешнего параметра – температуры графитизации. Численно решается задача о соударении двух пластин. Описывается весь процесс от момента возникновения ударной волны, в которой происходит прямой фазовый переход, до полной разгрузки вещества, при которой происходит обратный фазовый переход. Адекватность описания процесса фазового превращения и найденных критических параметров перехода проверяется и уточняется сравнением расчетных данных с экспериментальными [1]. Результаты сравнения позволяют сделать вывод о применимости модели. В области сосуществования двух фаз среда рассматривается как один континуум с уравнением состояния, параметры которого определяются через соответствующие параметры индивидуальных веществ и их массовые концентрации [2].

Литература

1. Morris D.G. An investigation of the shock-induced transformation of graphite to diamond // J. Appl. Phys. 1980. V. 51. No. 4. P. 2059–2065.
2. Бельхеева Р.К. Уравнение состояния пористой смеси конденсированных компонентов при динамических нагрузках // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Математика, механика, информатика. 2009. Т. 9, вып. 3. С. 23–32.

NUMERICAL INVESTIGATION OF POROSITY GRAPHITE ON DIAMOND YIELD BY SHOCK COMPRESSION

R.K. Belkheeva

Novosibirsk Military Academy of Internal Troops,
Novosibirsk, Russia

Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

E-mail: rimbel@academ.org, rumia@post.nsu.ru

4-64

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОРИСТОСТИ ГРАФИТА НА КОНЕЧНЫЙ ВЫХОД АЛМАЗА ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ

Р.К. Бельхеева

Новосибирский военный институт внутренних войск
им. генерала армии И.К. Яковлева МВД РФ,
Новосибирск, Россия

Новосибирский государственный университет,
Новосибирск, Россия

E-mail: rimbel@academ.org, rumia@post.nsu.ru

При получении искусственного алмаза методом ударно-волнового нагружения вступают в противодействие два противоречащих друг другу фактора: требование высокой температуры сжатия графита и низкой остаточной температуры алмаза. Для разрешения этого противоречия необходимо подобрать начальную пористость образца графита таким образом, чтобы обеспечить достаточное для прямого превращения давление при нагружении, но предельно низкую температуру. В данной работе численно изучается поведение образцов графита различной начальной пористости, подвергнутых ударному сжатию. Определяются критические параметры начала и завершения превращения. Проводится исследование зависимости критического давления начала фазового перехода от начальной пористости образца графита. Предлагаются уравнения для описания кинетики прямого фазового перехода. Учитывается, что при разгрузке получившийся алмаз претерпевает обратный фазовый переход, и предлагается модель кинетики обратного перехода, за-

Two opposing factors have place in the production of diamond by shock waves: the requirement of high temperature compression of graphite and low residual temperature of the diamond. To get rid of this contradiction it is necessary to choose the initial porosity of the graphite sample so as to provide sufficient pressure for the direct conversion during loading, but with a very low temperature. In this paper we numerically study the behavior of graphite samples of different initial porosities subjected to shock compression. Critical starting and final parameters of the transformation are determined. Investigation of the dependence of the critical pressure of the phase transition from the initial porosity of the graphite sample is carried out. The equations describing the kinetics of the direct phase transition are offered. It is taken into account that during unloading the resulting diamond undergoes a phase transition back and a model of the kinetics of the reverse transition is proposed, depending on one external parameter – the temperature of graphitization. Comparison with experimental data [1] is carried out. In the range of coexistence two phase medium is considered as one continuum with equation of state whose parameters are determined by the corresponding parameters of individual substances and their mass concentration [2].

References

1. Morris D.G. An investigation of the shock-induced transformation of graphite to diamond // *J. Appl. Phys.* 1980. V. 51. No. 4. P. 2059–2065.
2. Belheeva R.K. The equation of state of a porous mixture of condensed components under dynamic loading // *Vestnik, Quart. J. of Novosibirsk State Univ., Series: Math., mech., and informatics.* 2009. Vol. 9, No. 3. P. 23–32.

4-65

**ПРИМЕНЕНИЕ КONTИНУАЛЬНОЙ
ДИСЛОКАЦИОННОЙ МОДЕЛИ
ПЛАСТИЧНОСТИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ
УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ТОНКИХ
АЛЮМИНИЕВЫХ МИШЕНЯХ
ПРИ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ**

В.С. Красников¹, А.Е. Майер², А.П. Яловец¹

¹Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

²Челябинский государственный университет,
Челябинск, Россия

E-mail: vas.krasnikov@gmail.com

Развитие экспериментальных методик позволяет получать данные о поведении металлов при деформациях с экстремально высокими скоростями. Наиболее высокие скорости деформации (до 10^{10} с⁻¹) получены в исследованиях динамики мишеней толщиной несколько микрометров и менее, подвергнутых короткому лазерному воздействию [1–3]. Использование пикосекундной разрешающей методики при регистрации положения тыльной поверхности таких мишеней в работе [3] позволило зарегистрировать разделение упругой и пластических волн на микрометровых дистанциях.

В данной работе проведено исследование распространения ударной волны в тонкой алюминиевой мишени с помощью континуальной модели, основанной на дислокационных представлениях [4]. Для описания выделения энергии лазерного пучка в мишени использовалась двухтемпературная модель.

Исследована динамика волны на ранних стадиях распространения. Показано, что волнам достаточной большой амплитуды (до нескольких десятков ГПа) предшествует упругий предвестник, величина которого может достигать 10 ГПа.

Литература

1. Smith R.F., et al. *Phys. Rev. Lett.* 98, 065701 (2007).
2. Grigsby W., et al. *J. Appl. Phys.* 105, 093523 (2009).
3. Whitley V.H., et al. *J. Appl. Phys.* 109, 013505 (2011).
4. Krasnikov V.S., et al. *Int. J. Plasticity* 27, 1294–1308 (2011).

**APPLICATION OF DISLOCATION BASED
CONTINUAL MODEL TO CALCULATIONS
OF LASER DRIVEN SHOCK IN ULTRA THIN
ALUMINUM TARGET**

V.S. Krasnikov¹, A.E. Mayer², A.P. Yalovets¹

¹South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia

²Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: vas.krasnikov@gmail.com

Development of the experimental techniques allows to obtain data about the metal response on deformation at very high strain rate. Extremal strain rates (up to 10^{10} s⁻¹) are realized in studying of micrometers and less thickness target dynamics induced by short laser irradiation [1–3]. Usage of the picoseconds time resolving technique for measurement of the free surface position [3] led to registration of the elastic and plastic wave separation for the micrometer distances transited by the shock.

Research of shock wave propagation in ultra thin aluminum target with the dislocation based model [5] is carried out in this work. Release of laser beam energy is accounted with two-temperature model of heat conductivity.

Dynamics of shock wave at early stages is investigated. It is shown, that elastic precursor precedes even waves with sufficiently large amplitude (up to several tens GPa). The magnitude of this precursor can reach 10 GPa.

References

1. Smith R.F., et al. *Phys. Rev. Lett.* 98, 065701 (2007).
2. Grigsby W., et al. *J. Appl. Phys.* 105, 093523 (2009).
3. Whitley V.H., et al. *J. Appl. Phys.* 109, 013505 (2011).
4. Krasnikov V.S., et al. *Int. J. Plasticity* 27, 1294–1308 (2011).

4-66

**ПОЛИМЕРЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ
ИМПУЛЬСНОЙ НАГРУЗКИ**

М.А. Зохер

Лос-Аламосская национальная лаборатория, США

Быстрого перехода полимерных материалов в текучее состояние при воздействии импульсной нагрузки не происходит. Это объясняется отсутствием у полимеров таких механизмов текучести, какие имеются у металлов. Полимеру требуется время, чтобы потечь. Разработано математическое описание, которое позволяет численно определить течение полимерных материалов. Представлена численная валидация с использованием аналитического решения замкнутой формы. В докладе обсуждается применение построенной модели к импульсному нагружению.

POLYMERS SUBJECTED TO IMPULSE LOADING

M.A. Zocher

Los Alamos National Laboratory, USA

Polymeric materials do not readily flow when subjected to impulsive loading. This is because flow mechanisms such as those available in metals are simply

unavailable. Time is required for a polymer to flow. A mathematical formulation capable of predicting the flow of polymeric materials is developed. Numerical validation using closed form analytic solutions is presented. Application to impulsive loading is discussed.

4-67

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ
ПОВЕДЕНИЯ ГРУНТОВЫХ СРЕД
ПРИ УДАРЕ И ПРОНИКАНИИ**

В.В. Баландин, А.М. Брагов,
В.Л. Котов, В.В. Баландин

НИИ механики ННГУ им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия
E-mail: bragov@mech.unn.ru

Исследования процессов удара и проникания тел вращения в грунтовые среды имеют важное прикладное значение. Им посвящено достаточно много работ, большинство из которых основано на использовании гипотез о несжимаемости, идеальной пластичности и других упрощенных представлений о динамическом поведении грунта, справедливых для пластичных грунтовых сред. Экспериментов по импульсному нагружению сыпучих грунтов известно не так много, вследствие чего свойства подобных сред менее изучены. В данной работе проводится исследование закономерностей динамического деформирования сухого песка при ударе и проникании на основе сочетания прямых и обращенных экспериментов и численного моделирования этих процессов в рамках математической модели Григоряна.

Основные положения предложенной ранее методики определения деформационных и прочностных свойств грунтовых сред следующие. Входными данными служат экспериментальные зависимости максимальных и квазистационарных значений силы сопротивления внедрению ударников с плоским торцом и полусферическим оголовком от начальных скоростей удара. При этом в обращенных экспериментах определялся максимум силы, а в прямых экспериментах с использованием высокоскоростной киносъемки ее квазистационарное значение. Полученные зависимости силы сопротивления от времени позволяют использовать максимум силы для определения ударной адиабаты грунта, а квазистационарное значение – для идентификации сдвиговых характеристик грунтовой среды.

Приведены результаты экспериментов по определению силы сопротивления внедрению в песчаный грунт ударников с плоским торцом и полусферическим оголовком при скоростях удара 50–450 м/с. В результате совместного экспериментального и численного исследования получены параметры уравнения состояния – ударная адиабата и зависимости «давление – плотность», «предел текучести – давление» и коэффициент трения для сухого песчаного грунта естественного состава. Верификация полученных результатов проводится на сравнении данных экспериментов и расчетов проникания ударников с коническими и сфероконическими оголовками в прямой и обращенной постановках.

Показано, что полученные в обращенном эксперименте квазистационарные значения силы сопротивления в зависимости от скоростей удара могут быть применены к решению задач глубокого проникания тел в грунт с погрешностью, не превышающей ошибку измерений.

Работа выполнена при финансировании Российского фонда фундаментальных исследований (10-01-00585-а, 10-08-00376-а).

**EXPERIMENTALLY AND THEORETICALLY
INVESTIGATING THE BEHAVIOR OF SOILS
UNDER IMPACT AND PENETRATION**

V.V. Balandin, A.M. Bragov,
V.L. Kotov, V.V. Balandin

Research Institute of Mechanics, Nizhny Novgorod State
Lobachevsky University, Russia, Nizhny Novgorod
E-mail: bragov@mech.unn.ru

The investigation of impact and penetration processes of bodies of revolution into soils is of considerable practical importance. This issue has been addressed in numeral papers, most of which are based on using the hypotheses of incompressibility, ideal plasticity and other simplifications of the dynamic behavior of soils which hold for plastic soils. There have been only few experiments on pulsed loading of dry soils, thus the properties of such media are less studied. The present paper investigates the laws of dynamic deformation of dry sand under impact and penetration, based on using a combination of direct and inverse experiments together with numerically modeling these processes in the frame of Grigoryan's mathematical model.

The previously introduced methodology for determining the deformation and strength properties of soils used the following procedures. The experimentally determined dependences of maximum and quasistationary values of the force resisting the penetration of flat-ended and round-nosed strikers on the initial impact velocities were used as input data, the maximum force being determined in the reversed experiments, whereas its quasistationary value being determined in direct experiments using rapid photography. The obtained time-histories of the resistance force allow one to use the force maximum for determining the striking adiabat of a soil, and the quasistationary value to identify the shear characteristics of the soil.

The experimental results on determining the force resisting the penetration into dry soil of strikers with a flat end and a hemispherical nose for the impact velocities of 50–450 m/s are presented. The combined use of experimental and numerical investigations made it possible to obtain the parameters of the equation of state – the striking adiabat and the «pressure-density» and «yield strength-pressure» relations, as well as the friction coefficient for a dry sandy soil of natural composition. The results obtained are verified by comparing the experimental data and the numerical analyses of the penetration of strikers with conical and spherical-conical noses both in direct and inverse configurations. It is shown that the quasistationary values of the resistance force obtained in reverse experiments as a function of impact velocities are applicable to analyzing the problems of deep penetration of bodies into soils with an inaccuracy not exceeding the measurement inaccuracy.

The work was done with the financing from the Russian Fund of Fundamental Researches (10-01-00585-a, 10-08-00376-a).

4-68

РАСЧЕТНАЯ ИЕРАРХИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

А.Я. Учаев, В.Т. Пунин, С.С. Соколов,
Н.И. Сельченкова, Е.В. Кошелева, Л.В. Жабыка

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия
E-mail: uchaev@expd.vniief.ru

Ранее нами было показано, что в явлении динамического разрушения металлов их сопротивление внешнему воздействию оказывают развивающиеся диссипативные структуры, имеющие фрактальную природу на различных масштабно-временных уровнях. Причем каскад центров разрушения на пороге макроразрушения, меняющего связность тела, является перколяционным кластером [1].

Критические показатели перколяционной задачи так же, как и в теории критических явлений не зависят от симметрии решетки, на которой разыгрывается процесс, а зависят только от размерности пространства [2, 3]. В этом заключается универсальность описания критических явлений.

Установлены температурно-временные закономерности процесса динамического разрушения ряда металлов и динамический инвариант $I(E_{кр})$, который связывает энергию $E_{кр}$, идущую на разрушение, с энергетическими параметрами кристаллической решетки, имеющий близкие значения для всех изученных металлов, через который выражена скорость центрообразования J . Временная зависимость скорости центрообразования, определяющая временную границу, t_p – γ сохранения функциональных свойств, имеет степенной вид $J(t) \sim (t - t_p)$ – долговечность, которая зависит от амплитуды внешнего давления [4].

Единый механизм процесса динамического разрушения – потеря связности тела путем кластеризации каскада центров разрушения, – единый параметр порядка (конечная плотность N центров разрушения) и одинаковая размерность пространства, в котором протекает процесс, определяет возможность построения адекватной расчетной модели процесса динамического разрушения и определяет возможность прогнозирования поведения металлов в экстремальных условиях.

Функциональные соотношения для I, J введены в 2D математические расчетные коды, что позволило описать взрывные опыты по разрушению урана [5] и опыты по воздействию импульсов релятивистских электронных пучков на тонкие фольги ряда металлов.

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 свой-

ствами диссипативных структур каскада центров разрушения // ДАН, 2003, том 393, № 3. – С. 326–331.

2. Анисимов М.А. Критические явления в жидкостях и жидких кристаллах. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 272 с.

3. Займан Дж. Модели беспорядков. Теоретическая физика однородно неупорядоченных систем: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 592 с.

4. Ильяев Р.И., Пунин В.Т., Учаев А.Я., Сельченкова Н.И., Платонова Л.А., Кошелева Е.В., Конкин А.С. Физическая природа долговечности металлов в явлении динамического разрушения // Ядерная физика и инжиниринг. 2010, том 1, № 2, с. 99–103.

5. Козлов Е.А., Панкратов Д.Г., Таржанов В.И., Какшина Е.В., Морев Ю.С. Зарождающиеся и развитые откольные повреждения клиновых образцов из сплава U-1,5% Мо при их нагружении скользящей и нормальной детонацией зарядов ВВ различной мощности и толщины // ДАН, 2009, том 425, № 1, с. 34–39.

CALCULATION HIERARCHY MODEL OF DYNAMIC METALS FAILURE PROCESS

A.Ya. Uchaev, S.S. Sokolov, N.I. Sel'chenkova,
E.V. Kosheleva, L.V. Zhabyka

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

Earlier we demonstrated that in dynamic metals failure phenomenon the developing dissipative structures having a fractal nature on different time-scale levels resisted to external action. At that failure centers cascade on the threshold of macro-failure changing the body continuity is a percolation cluster [1].

Critical indices of percolation problem, as well as in the critical phenomenon theory, do not depend on lattice symmetry where the process flows, but depend only on space dimension [2, 3]. Therein lies the universality of critical phenomena description.

There have been specified time-temperature regularities of the dynamic failure process of a number of metals and a dynamic invariant, which bonds the energy E_{cr} , spent for failure, with energy parameters of crystal lattice. The dynamic invariant has close values for all studied metals, in terms of this invariant the centers formation rate J is expressed. The time dependence of centers formation rate, specifying the time bound of preserving functional properties, has an exponential form $J(t) \sim (t - t_p - longevity)$, which depends on the external pressure amplitude $t_p - \gamma$ [4].

The unique mechanism of dynamic failure process – loss of body continuity through clustering of failure centers cascade, – unique order parameter (final density N of failure centers), and unique dimension of space, where the process goes, specifies the possibility of building an adequate calculation model of dynamic failure process as well as the possibility of forecasting metals behavior under extreme conditions.

Functional correlations for I, J were input for 2D mathematical calculation codes, what allowed description of explosion experience on uranium failure [5] and experiences on action of pulses of relativistic electron beams to the thin foils of a number of metals.

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

- laws of dynamic metal failure conditioned by hierarchic properties of dissipative structures – failure center cascades. // *Academy of Sciences reports (DAN)*, 2003, vol. 393, N 3. – P. 326–331.
2. Anisimov M.A. Critical phenomena in liquids and liquid lattices. – M.: Nauka. Chief editor of phys. and math. lit., 1987. – P. 272.
3. Zayman G. Models of clutters. Theoretical physics of homogeneously disordered systems: Transl. from Engl. – M.: Mir, 1982. – P. 592.
4. П'каев R.I., Punin V.T., Uchaev A.Ya., Sel'chenkova N.I., Platonova L.A., Kosheleva E.V., Konkin A.S. Physical nature of metals longevity in the phenomenon of dynamic failure // *Nucl. Phys. and Eng.* 2010, Vol. 1, № 2, p. 99–103.
5. Kozlov E.A., Pankratov D.G., Tarzhanov V.I., Kakshina E.V., Morev Yu.S. Incipient and developed slabbing damages of wedge samples of U-1,5% Mo alloy when loaded by sliding and normal detonation of explosive charges with different power and thickness // *Academy of Sciences Reports*, 2009, vol. 425, № 1, p. 34–39.

4-69

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОБИВАНИИ ОБРАЗЦОВ ИЗ АЛЮМИНИЯ 6061

В.В. Чудинов, М.А. Соковиков,
О.А. Плехов, С.В. Уваров, Е.А. Ляпунова,
Ю.В. Баяндин, О.Б. Наймарк
Институт механики сплошных сред УрО РАН,
Пермь, Россия

E-mail: chudinov@icmm.ru

Работа посвящена экспериментальному изучению деформационного поведения материалов при динамическом нагружении.

Проведены эксперименты по пробиванию преграды в виде формирования и выноса пробки при скоростях 101–260 м/с с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M и системы измерения скорости VISAR. На оригинальной баллистической установке по изучению пробивания исследованы образцы из сплава алюминия марки 6061, для которых были реализованы различные режимы импульсного нагружения, сопровождающиеся неустойчивостью пластического течения и выносом пробки.

Исследования процесса пробивания преград с помощью инфракрасной камеры в режиме реального времени показали, что значения температур в областях локализации пластической деформации не превышают $\sim 100^\circ\text{C}$.

С применением доплеровской интерферометрии получены скорости движения тыльной поверхности в различные моменты времени в процессе выноса пробки.

Сохраненные после эксперимента образцы подвергались микроструктурному анализу с помощью оптического интерферометра-профилометра и сканирующего электронного микроскопа с последующей обработкой данных деформационного рельефа. Это позволило получить распределение пластической деформации в различные моменты времени при формировании и выносе пробки.

Обнаружено, что для зоны первоначального проникновения ударника в образец, имеющей гладкую зеркальную поверхность разрушения, характерно относительно

равномерное распределение деформации, тогда как при формировании и выносе пробки это распределение становится существенно неоднородным по радиусу образца. Имеет место локализация пластической деформации в узкой области по образующей пробки.

Теоретические расчеты процессов высокоскоростной пластической деформации, основанные на ранее разработанной структурно-кинетической модели среды с микросдвигами, находятся в соответствии с полученными экспериментальными данными.

Данные теоретических и экспериментальных исследований позволяют предположить, что один из механизмов неустойчивости пластического сдвига и локализации пластической деформации при высокоскоростном пробивании обусловлен структурно-кинетическими переходами в ансамблях микросдвигов.

Работа выполнена при частичной поддержке Программ Президиума РАН 09-П-1-1010; 09-П-1-1011; 09-Т-1-1005, грантов РФФИ 09-01-92005-ННС_a, 11-01-00712_a, 11-01-00153_a, 11-01-96005-р_урал_a.

INVESTIGATION OF PLASTIC STRAIN INSTABILITY AND LOCALIZATION IN Al-6061 ALLOY SAMPLES SUBJECTED TO PERFORATION

V.V. Chudinov, M.A. Sokovikov, O.A. Plekhov,
S.V. Uvarov, E.A. Lyapunova, Yu.V. Bayandin,
O.B. Naimark

Institute of Continuous Media Mechanics Russian Academy
of Sciences, Perm, Russia

The present work focuses on the experimental study of the deformation behavior of materials under dynamic loading conditions.

The process of perforation of a target involving plug formation and ejection at impact velocities of 101–260 m/s was investigated using a high-speed infra-red camera and a VISAR velocity interferometer system. The original ballistic set-up for studying perforation was used to test the Al-6061 alloy samples in different impulse loading regimes followed by plastic flow instability and plug ejection.

The study of the process of perforation of targets in real time using the high-speed infra-red camera showed that the values of temperature in the areas of plastic strain localization did not exceed $\sim 100^\circ\text{C}$.

Application of Doppler interferometry techniques made it possible to determine the velocity of a rear surface at different time of plug ejection.

The microstructure analysis of the recovered samples was performed using an optical interferometer-profilometer and a scanning electron microscope. Based on the obtained results, estimates of plastic strain distribution were obtained at different time of plug formation and ejection.

It is shown that the distribution of strain is relatively uniform in the initial penetration region with a smooth mirror-like fracture surface, whereas in the plug formation and ejection regions it becomes essentially non-uniform along the radius of the sample. The localization of plastic strain occurs in a thin region providing the plug formation.

Theoretical calculations of high-speed plastic deformation processes were carried out in terms of a recently developed

structural-kinetic model of a medium with microshears. The calculated and experimental data agree fairly well.

The simulation and experimental results suggest that one of the mechanisms responsible for plastic shear instability and plastic strain localization in the samples subjected to high-speed impact loading (perforation) is caused by structural-kinetic transitions in microshear ensembles.

This work was supported by grants within the research programs of the Presidium of RAS (09-П-1-1010; 09-П-1-1011; 09-Т-1-1005) and by the RFBR grant (09-01-920005-ННС_a , 11-01-00712_a, 11-01-00153_a, 11-01-96005-r_ural_a).

4-70

ОТКОЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 12Х18Н10Е В ТЕМПЕРАТУРНОМ ИНТЕРВАЛЕ 24–450°С

А.В. Павленко, А.Н. Григорьев, Е.И. Карнаузов,
Д.Н. Казаков, В.В. Бычков

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

В работе представлены результаты измерений откольной прочности (на основе зарегистрированных с помощью интерферометра VISAR профилей скорости свободной поверхности) аустенитной стали 12Х18Н10Т при ее ударном нагружении. Нагружение проводилось на легкогазовой пушке при температурах образца 24–450°С. Полученные результаты свидетельствуют о снижении откольной прочности стали 12Х18Н10Т с ростом температуры вплоть до температур ~250 °С.

SPALL STRENGTH OF AUSTENITE STEEL 12KH18N10E IN TEMPERATURE RANGE 24–450°С

A.V. Pavlenko, A.N. Grigoriev, E.I. Karnaykhov,
D.N. Kazakov, V.V. Bychkov

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

Spall strength of the austenitic 12Kh18N10T steel (based on the free-surface velocity profiles recorded by the VISAR interferometer) under its shock loading was measured and measurement results are presented. The loading was performed using the light-gas gun with the sample temperature varying within 24–450°С. The obtained results indicate reduction in spall strength of the 12Kh18N10T steel with temperature increase up to temperatures of ~ 250 °С.

4-71

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ОТКОЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МАГНИЕВОГО СПЛАВА МА14Т1

А.В. Павленко, С.Н. Малюгина,
Д.Н. Казаков, В.В. Бычков

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: avpavlenko@vniitf.ru

Реалистичное прогнозирование поведения материалов с использованием современных моделей упруго-вязко-пластического деформирования [1] требует экспериментального обоснования. Магний и сплавы на его основе широко применяются на практике, вследствие чего детально изучается их поведение при высокоскоростном деформировании. Экспериментальные по симметричному соударению дисков из магниевого сплава МА14Т1 проводили на одноступенчатой легкогазовой пушке калибра 44 мм с измерением профилей волн напряжений интерферометром VISAR. Диапазон скоростей соударения от 218 до 1625 м/с. Температурную зависимость ~350 м/с откольной прочности определяли при скорости соударения порядка . Получена температурная зависимость откольной прочности магниевого сплава МА14Т1 в диапазоне температур от –163 до 480°С, а также данные о изменении формы и амплитуды упругого предвестника.

Литература

1. Задорожный Г.А., Коваленко Г.В., Петровцев А.В. Моделирование полиморфных превращений в железе в широком диапазоне состояний // В трудах VII Забабахинских научных чтений, Снежинск, 2003.
2. Pavlenko A.V., Malyugina S.N., Kazakov D.N., and Bychkov V.V. Temperature dependence of magnesium alloy spall strength in the range of 90...750 K // In Proc. 17th SCCM Conference, Chicago, 26 June–01 July 2011.

TEMPERATURE DEPENDENCE OF MA14T1 MAGNESIUM ALLOY SPALL STRENGTH

A.V. Pavlenko, S.N. Malyugina,
D.N. Kazakov, V.V. Bychkov

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

E-mail: avpavlenko@vniitf.ru

Realistic forecasting of materials behavior using up-to-date models of elastic-viscous-plastic deformation [1] requires experimental justification. Magnesium itself and magnesium-based alloys are widely used in practice and this conditions the on-going detailed study of their behavior under the high strain rate deformation. Experiments on symmetrical impact of the magnesium MA14T1 alloy disks were performed with the help of the single-stage light-gas gun having 44-mm caliber. Stress wave profiles were measured by VISAR interferometer. Impact velocities ranged from 218 up to 1625 m/s.

Temperature dependence of magnesium alloy spall strength was determined for the impact velocity of about ~350 m/s.

Temperature dependence of the magnesium MA14T1 alloy spall strength within the temperature range of –163 up to 480°C was obtained. Changes in shape and amplitude of elastic precursor were measured.

References

1. Zadorozhny G.A., Kovalenko G.V., Petrovtsev A.V. Simulation of Polymorphic Transitions in Iron in a Wide Range of States // In Proc. of VII Zababakhin Scientific Talks, Snezhinsk, 2003.
2. Pavlenko A.V., Malyugina S.N., Kazakov D.N., Bychkov V.V. Temperature Dependence of Magnesium Alloy Spall Strength in the Range of 90...750 K // In Proc. of 17th SCCM Conference, Chicago, June 26 – July 01, 2011.

4-72

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРАМИ HET-PDV И VISAR ПРОФИЛЕЙ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ЛЕГКОГАЗОВОЙ ПУШКЕ

А.В. Павленко, А.А. Тяктев, С.Н. Малюгина,
С.С. Мокрушин, И.Л. Бугаенко, А.В. Дулов,
С.И. Балабин, О.Е. Козелков

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: dep5@vniitf.ru, avpavlenko@vniitf.ru

Развитие современных моделей динамического поведения материалов требует получения более полных данных о механизме разрушения конструкционных и активных материалов. Увеличение объема экспериментальной информации, повышение точности измерения параметров, получения более полной информации о кинетике разрушения материалов требует существенного ускорения процесса исследований.

Лабораторный комплекс РФЯЦ – ВНИИТФ, на котором проводятся экспериментальные исследования динамических свойств конструкционных материалов, оснащен легкогазовой пушкой (ЛГП) и интерферометром по схеме VISAR. Подготовленный к экспериментальным исследованиям гетеродинный измеритель скорости HET-PDV позволил выполнить методические эксперименты, обусловленные необходимостью получения высококачественной лазерно-интерферометрической информации о профилях волн напряжений в конструкционных материалах. Актуальным является необходимость ответа на вопрос о сопоставимости интерферометрических данных, полученных интерферометрами по схемам VISAR и HET-PDV.

Для выполнения поставленных задач были проведены эксперименты с одновременным измерением интерферометрами VISAR и HET-PDV профилей скорости свободной поверхности образцов, нагружаемых по методу удара на легкогазовой пушке.

4-73

ПОСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТА ПО РЕГИСТРАЦИИ МНОЖЕСТВЕННЫХ ОТКОЛЬНЫХ РАЗРУШЕНИЙ В ПЛАСТИНЕ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т С РЕГИСТРАЦИЕЙ ПРОФИЛЕЙ ПРОДОЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРЕГРАДЕ ИЗ МРАМОРА ПО МНОГОКАНАЛЬНОЙ МЕТОДИКЕ МАНГАНИНОВЫХ ДАТЧИКОВ

А.О. Борщевский, Е.А. Козлов,
А.В. Петровцев, Д.Т. Юсупов

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Представлены постановка и результаты контрольного взрывного эксперимента с одновременной регистрацией сигналов от четырех низкоомных манганиновых датчиков.

Цель работы – экспериментальная, выполненная в режиме взрывного нагружения, проверка расчетного прогноза и качества регистрации четырьмя низкоомными манганиновыми датчиками волновых профилей $\sigma_{xx}(t)$ в преграде – мишени из мрамора – при последовательном воздействии на нее составного ударника из стали 12Х18Н10Т.

Задача – в дополнение к выполненному расчету получить экспериментальные результаты измерений $\sigma_{xx}(t)$ в реальном физическом процессе с реализацией двойного искусственного откола.

Дано описание плосковолнового нагружающего устройства, приведен состав используемого механического узла (материал и количество ударников, их плотности и толщины, путь полета, материал, плотность и толщины деталей мишени), показана схема питания/регистрации.

Стальная (12Х18Н10Т) пластина-ударник состояла из трех прижатых друг к другу слоев, толщиной (в порядке соударения с мишенью) соответственно 1 мм, 1 мм и 4 мм, имитирующих первый и второй естественные отколы в пластине с исходной толщиной 6 мм.

Представлены зарегистрированные в эксперименте сигналы от четырех манганиновых датчиков в координатах $U(t)$ и $\sigma_{xx}(t)$ и реализована, предсказанная расчетом, трехволновая конфигурация в мраморной преграде.

Длительность каждого импульса $\sigma_{xx}(t)$, полученного в эксперименте, от момента подъема до начала спада, характеризует толщину ударника (двух искусственных отколов и основной части пластины).

Экспериментальные профили $\sigma_{xx}(t)$, зарегистрированные по каждому из каналов, близки между собой и в деталях совпадают с расчетным прогнозом.

SETUP AND RESULTS OF EXPERIMENT AIMED TO REGISTER MULTIPLE SPALL FRACTURES IN THE AUSTENITIC 12CR18N10T STEEL PLATE WITH REGISTRATION OF LONGITUDINAL STRESS PROFILES IN THE MARBLE BARRIER USING MULTICHANNEL MANGANITE-GAUGES TECHNIQUE

A.O. Borschevsky, E.A. Kozlov,
A.V. Petrovtsev, D.T. Yusupov

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

Consideration is given to setup and results of test explosive experiment with simultaneous registration of signals coming from four low-resistance manganite gauges.

This work is aimed to experimentally verify, in explosive loading mode, the calculation predictions and the quality of registration of wave profiles $\sigma_{xx}(t)$ in the barrier, namely in the marble target, using four low-resistivity manganite gauges when this target is sequentially affected by a composite impactor made of 12Cr18N10T steel.

The task is to supplement performed calculations with experimental data on $\sigma_{xx}(t)$ measured in the actual physical process with realization of double artificial spall.

The description of plane-wave loading device is presented, the structure of mechanical unit being used (namely material and quantity of impactors, their density and thickness, flight path, as well as material, density, and thickness of target) is given; the power/registration circuit diagram is shown.

The impacting 12Cr18N10T steel plate consisted of three layers with the thickness of 1 mm, 1 mm, and 4 mm, respectively (in the order of their impact with target), that were pressed against each other and simulated the first and the second natural spall in the plate having initial thickness of 6 mm.

Experimentally registered signals coming from four manganite gauges were presented in the $U(t)$ and $\sigma_{xx}(t)$ coordinates. Three-wave configuration predicted by our calculations was realized in the marble barrier.

The thickness of the impactor, i. e. two artificial spalls and main part of the plate, is characterized by the length of each experimentally obtained pulse $\sigma_{xx}(t)$ from the moment of pulse rise to the onset of pulse droop.

Experimental profiles $\sigma_{xx}(t)$ registered in each channel are alike and agree with calculation predictions in details.

ложенной Ю.С. Вахрамеевым. В методике используется оригинальная установка объемного нагружения образцов разрушенной горной породы, которая позволяет строить поле нагрузочных и разгрузочных кривых, используемых в упомянутой модели. Для экспериментов использовался гранитный щебень одинакового гранулометрического состава с различной начальной плотностью от 1600 до 2500 кг/м³. Использование системы трубопроводов, вентиля и герметичных объемов позволило измерять изменение объемов образцов при их нагружении или разгрузке по количеству вытесняемого из них воздуха или поступающего в них. Математическая обработка результатов позволила найти аналитические зависимости в полулогарифмических координатах между воспроизводимым на образец давлением и его плотностью. В графическом виде они носят линейный характер.

Работа выполнена в рамках проекта Международного научно-технического центра № 1124, руководителем которого был д.ф.м.н Ю.С. Вахрамеев. В экспериментальных работах, кроме авторов доклада, принимали участие сотрудники РФЯЦ – ВНИИТФ А.П. Антонов, А.П. Иванеев. Чертежи на образцы выполнил В.Н. Толочек. Изложенные в докладе результаты обработки экспериментальных данных получены авторами доклада.

EXPERIMENTAL STUDY OF ALL-ROUND COMPRESSION OF DESTRUCTED MEDIUM

S.N. Kosorukov, A.A. Shakhov

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

Presentation describes the technique of determination of some characteristics of destructed medium in the frames of their potential use in a rock model proposed by Yu.S. Vakhrameev. The technique uses original facility of volume loading of destructed rock samples, which permits to build field of loading and unloading curves that are used in mentioned model. In experiments, granite crushed rock was used with similar granulometric composition and different initial density from 1600 up to 2500 kg/m³. Using system of pipelines, valves and tight contents permitted to measure volume change of samples under their loading or unloading by the amount of air extruded from them or coming in them. Mathematical processing of the results permitted to find analytical dependences in semi logarithmic coordinates between reproduced pressure on the sample and its density. In graphic form, they have linear character.

The work was performed in the frames of the ISTC project # 1124; its manager was doctor Yu.S. Vakhrameev. Besides authors of this presentation, RFNC–VNIITF specialists A.P. Antonov and A.P. Ivaneev participated in experimental activities. Drawings for the samples were made by V.N. Tolochek. The results of experimental data described in the presentation were obtained by the authors of this paper.

4-74

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВСЕСТОРОННЕГО СЖАТИЯ РАЗРУШЕННОЙ СРЕДЫ

С.Н. Косоруков, А.А. Шахов

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

В докладе изложена методика определения некоторых характеристик разрушенной среды в рамках их возможного использования в модели горной породы, пред-

4-75

**ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОМ ПОЗИТРОННОЙ
АННИГИЛЯЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ
КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД
С САМОИЗЛУЧЕНИЕМ**

В.И. Графутин, Е.П. Прокопьев

Институт теоретической и экспериментальной физики,
Москва, Россия

При облучении позитронами конденсированных сред с самоизлучением (например, радиоактивные вещества и т. д.) создаются отрицательно заряженные и нейтральные точечные или протяженные дефекты с размерами в ангстремном и нанометровом диапазонах, которые могут служить центрами захвата позитронов и атома позитрония [1]. Это обстоятельство, как показывают экспериментальные данные и проведенные нами расчеты, серьезным образом сказывается на изменениях основных характеристик позитронных аннигиляционных спектров, позволяющими детектировать эти нанодфекты в экспериментах и изучать их влияние на свойства конденсированных сред с самоизлучением [2, 3].

Известно, что позитроны эффективно зондируют свободные объемы нанообъектов с размерами в ангстремном и нанометровом диапазонах как в металлах и сплавах, так и в полупроводниках. Особую важность представляет возможность определения размеров нанообъектов в конденсированных средах (материалах) с самооблучением и материалах, облученных протонами, нейтронами и α -частицами. Для этого необходимо проведение комплексных исследований дефектной структуры в этих материалах, содержащих полости нанометровых и ангстремных размеров (вакансии, вакансионные кластеры, поры) с использованием различных методов позитронной аннигиляционной спектроскопии. Это позволяет установить связи между экспериментально измеряемыми параметрами аннигиляционных спектров и характеристиками нанодфектов (типом, размером, концентрацией) в этих материалах. При этом поведение радиационных нанодфектов оказывается весьма важным. Выполнение такого рода исследований будет способствовать накоплению фундаментальных знаний о радиационных повреждениях в данных материалах, развитию теоретических моделей, описывающих свойства и поведение этих дефектов. Показано, что одним из эффективных методов определения средних размеров цилиндрических и сферических нанообъектов \bar{R} (свободных объемов пор, полостей, пустот и т.д.), их средних значений концентрации \bar{N} и химического состава в месте аннигиляции позитрона в дефектных материалах (металлах и сплавах) является метод позитронной аннигиляционной спектроскопии <http://www.portalus.ru/modules/science/data/files/prokopiev/Prokopev-pos-Report.doc>. Это позволяет определять средние значения доли свободного пространства $\bar{V}_{rad} = (4/3)\pi\bar{R}^3\bar{N}$ образующегося в этих средах в процессе их эксплуатации. Обсуждается идея поиска корреляции между значениями \bar{R} , \bar{N} и механическими и другими свойствами таких сред (например, прочностью и хрупкостью металлов и сплавов, облученных нейтронами, протонами и α -частицами).

Литература

1. Графутин В.И., Мешков И.Н., Прокопьев Е.П. и др. // Микроэлектроника. 2011. Т. 40. № 6. С. 428–435.
2. Графутин В.И., Прокопьев Е.П. и др. // Ядерная физика. 2011, Т. 74. № 2. С. 195–206.
3. Милосердин В.Ю., Графутин В.И., Прокопьев Е.П. и др. // Ядерная физика и инжиниринг. 2010. Т. 1. № 3. С. 220–240.

**RESEARCH BY METHOD POSITRON
ANNIHILATION SPECTROSCOPY
OF CONDENSED MATTER WITH
ITS OWN RADIATION**

V.I. Grafutin, E.P. Prokopev

FSBU SSC RF Institute of Theoretical and Experimental Physics,
Moscow, Russia

The irradiation of condensed matter with its own radiation by positrons (eg, radioactive substances, etc.) are negatively charged and neutral point or extended defects with sizes in the angstrom and nanometer range, which may serve as trapping centers of positrons and positronium atom [1]. This fact, as shown by experimental data and calculations are carried out by us, a profound impact on changes in the basic characteristics of positron annihilation spectra, allowing detection of these nanodfects in experiments and to study their influence on the properties of condensed matter with its own radiation [2, 3]. It is known that positrons effectively probe the free volume of nano-objects with dimensions in the angstrom and nanometer ranges in metals and alloys, as well as in semiconductors. Of particular importance is the possibility of determining the size of nano-objects in condensed matter (materials) with samooblucheniem and materials irradiated with protons, neutrons, and α -particles. This requires comprehensive studies of the defect structure in these materials containing nanometer and angstrom cavity sizes (vacancies, vacancy clusters, pores) using different methods of positron annihilation spectroscopy. This allows us to establish links between the experimentally measured parameters and characteristics of the annihilation spectra nanodfects (type, size \bar{R} , density \bar{N}) in these materials. The behavior of radiation nanodfects is very important. Performing such studies will contribute to the accumulation of fundamental knowledge of radiation damage in these materials, the development of theoretical models describing the properties and behavior of these defects. It is shown that one of the most effective methods for determining the average size of cylindrical and spherical nano-objects (the free volume of pores, cavities, voids, etc.), their average values \bar{R} , \bar{N} of concentration and chemical composition at the site of positron annihilation in defective materials (metals and alloys) is the method of positron annihilation spectroscopy <http://www.portalus.ru/modules/science/data/files/prokopiev/Prokopev-pos-Report.doc>. This allows us to determine the average percentage of free space is formed in these environments during their operation. We discuss the idea of searching for correlations between the values $\bar{V}_{rad} = (4/3)\pi\bar{R}^3\bar{N}$ and mechanical and other properties of such media (eg, strength and brittleness of metals and alloys irradiated by neutrons, protons, and α -particles).

References

1. Grafutin V.I., Meshkov I.N., E.P. Prokopen, etc. // *Microelectronics*. 2011. Vol. 40. № 6. P. 428–435.
2. Grafutin V.I., Prokopen E.P., etc. // *Nucl. Phys.* 2011, Vol. 74. №2. P. 195–206.
3. Miloserdin V.I., Grafutin V.I., Prokopen E.P., etc. // *Nucl. Phys. and Engineering*. 2010. Vol. №3. P. 220–240.

4-76

**ВЗРЫВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ
В ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ПОСТАНОВКЕ
В ИНТЕРЕСАХ ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ
СДВИГОВОЙ И ОТКОЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ
МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ.
ПАМЯТИ В.А. БЫЧЕНКОВА**

Е.А. Козлов, А.Т. Сапожников, Н.С. Жилева,
Л.В. Хардина, Л.П. Брезгина, А.А. Дегтярев,
О.А. Никитин, Е.О. Ковалев, П.С. Базаров

Российский федеральный ядерный центр – ВНИИ
технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: e.a.kozlov@vniitf.ru

Двумерные расчеты осесимметричных взрывных систем существенно менее трудоемки по сравнению с 3D-расчетами взрывных систем с многоточечным инициированием [1, 2]. Для верификации современных кинетических многоуровневых прочностных моделей, адекватно воспроизводящих особенности не только высокоскоростной, но и сильной пластической деформации, представляют интерес взрывные эксперименты в осесимметричной постановке.

В данной работе представлены постановки и результаты четырех серий взрывных экспериментов по нагружению сферических стальных оболочек детонацией слоя ВВ при его инициировании в одной или двух точках, лежащих на оси симметрии исследуемой системы. В первой и второй сериях экспериментов условия взрывного нагружения (тип и толщина слоя ВВ при фиксированном внутреннем радиусе ВВ, равном 35 мм, фиксированных начальном наружном радиусе оболочки из 12X18H10T и ее толщины) были выбраны таким образом, чтобы обеспечить сохранение обжимаемых стальных оболочек и исключить в первой серии и обеспечить во второй – формирование в оболочках откольных разрушений при высокоскоростном высокоинтенсивном деформировании. До осевой разрезки и проведения металлографической аттестации прошедших взрывное обжатие и сохраненных оболочек осуществлялось их многоракурсное рентгеновское томографирование с последующим пространственным восстановлением положения наружной и внутренней границ оболочек и образовавшихся поверхностей разрушений для сопоставления с результатами 2D-расчетного прогнозирования по программе СПРУТ [3]. Использовалась методика интегральной малоракурсной томографии (ИМРТ), подробно изложенная в [4].

В третьей и четвертой сериях экспериментов при высокоинтенсивном взрывном нагружении, при кото-

ром сохранить обжимаемые оболочки затруднительно, – использовалось импульсное трехракурсное рентгенографирование и последующее восстановление положений границ оболочки и возникших разрушений методом УМРТ, описанным [2, 4].

Эффективность реализованного подхода проиллюстрирована на примере изучения поведения сферических оболочек из стали 12X18H10T при их взрывном обжатии в режиме одно- и двухточечного инициирования.

Литература

1. Kozlov E.A. 2D- and 3D-explosive experiments for verification of spall and shear strengths models for some steels, *Bull. Am. Phys. Soc.*, 2011, V. 56, No 6, P. 23, In: 17th Biennial International Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter, June 26-July 1, 2011, Chicago, Illinois, USA
2. Kozlov E.A., Brichikov S.A., Zhilyayeva N.S., Khardina L.V., Brezgina L.P., Povyshev V.N., Dobromyslov A.V., Taluts N.I. Deterministic Perturbations Developing on Steel Shells under Quasispherical Explosive Loading. Investigation Results using Laser Interferometry and Gamma-Tomography. In: Russian-US Conference on Materials Properties in Extremal Conditions, 6LAB Conference Engineering & Materials at Extreme Conditions, 23-28 October, 2011, Barcelona, Spain.
3. Быченков В.А., Гаджиева В.В. Метод СПРУТ расчета двумерных неустановившихся течений разрушаемых сред, ВАНТ. Сер. «Методики и программы численного решения задач математической физики», 1978, вып. 2 (2).
4. Брезгина Л.П., Козлов Е.А., Пovyшев В.Н. Сравнение возможностей ультрамалоракурсной томографии и интегральной малоракурсной томографии для регистрации откольных и сдвиговых разрушений в оболочках из железа и стали при взрывном нагружении, *Дефектоскопия*, 2010, т. 46, № 12, с. 3–22 [Russian Journal of Nondestructive Testing (Engl transl.), 2010, Vol. 46, No. 12, pp. 867–883].

**EXPLOSIVE EXPERIMENTS IN AXISYMMETRIC
SETUP TO VERIFY MODELS OF SHEAR AND
SPALL STRENGTH OF METALS AND ALLOYS –
IN MEMORY OF V.A. BYCHENKOV**

E.A. Kozlov, A.T. Sapozhnikov, N.S. Zhilyayeva,
L.V. Khardina, L.P. Brezgina, A.A. Degtyaryov,
O.A. Nikitin, E.O. Kovalyov, P.S. Bazarov

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

E-mail: e.a.kozlov@vniitf.ru

2D calculations of axisymmetric explosive systems are significantly less laborious than 3D calculations of explosive systems with multi-point initiation [1, 2]. To verify recent kinetic multi-scale strength models that adequately reproduce peculiarities not only of high-rate strain, but also of strong plastic strain, explosive experiments in axisymmetric setup appear to be of high interest.

This paper presents the setup and the results of four sets of explosive experiments on loading of spherical steel shells by the HE layer detonation at its initiation in one or two points lying on the symmetry axis of the studied system. In the first and the second sets of experiments, the loading conditions (HE layer type and thickness at a given constant external radius of 12Kh18N10T shell and its thickness) were selected so as to ensure the recovery of compressed steel shells and to avoid in the first set of experiments and to ensure in the second one the formation of spall fracture

at high-rate high-intensity strain. Prior to axial cutting and metallographic assessment of shells after explosive compression and recovery, the shells were investigated by small-directions X-ray tomography, followed by spatial reconstruction of the position of the external and internal boundaries of shells and surface damages for comparison with the results of 2D-numerical simulations using the SPRUT code [3]. The integral small-directions tomography method (ISDT), described in detail in [4], was used.

In the third and the fourth sets of experiments at high-rate explosive deformation, at which it is difficult to recover the compressed shells, the pulsed three-directions X-ray technique was used, followed by restoration of shell boundaries and resulting fracture surfaces by the ultrasmall-directions tomography method described in [2, 4].

The efficiency of the realized approach is illustrated by the examples of steel shells 12Kh18N10T studied at their explosive compression in the one- and two-point initiation mode.

References

1. Kozlov E.A., 2D- and 3D-explosive experiments for verification of spall and shear strengths models for some steels, Bull. Am. Phys. Soc., 2011, V. 56, No 6, P. 23, 17th Biennial International Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter, June 26-July 1, 2011, Chicago, Illinois, USA.
1. Kozlov E.A., Brichikov S.A., Zhilyaeva N.S., Khardina L.V., Brezgina L.P., Povyshev V.N., Dobromyslov A.V., Taluts N.I. Deterministic Perturbations Developing on Steel Shells under Quasi-spherical Explosive Loading. Investigation Results using Laser Interferometry and Gamma-Tomography, Russian-US Conference on Materials Properties in Extremal Conditions, 6LAB Conference Engineering & Materials at Extreme Conditions, 23–28 October, 2011, Barcelona, Spain.
3. Bychenkov V.A., Gadzhieva V.V., SPRUT-method to calculate 2D unsteady flows of media being destructed. VANT, Series «Numerical solution techniques and programs for mathematical physics problems», 1978, issue 2 (2).
4. Brezgina L.P., Kozlov E.A., and Povyshev V.N. Comparison of the Potentials of Ultrasmall-Angle Tomography and Integral Small-Angle Tomography for Recording Spall and Shear Fractures in Iron and Steel Shells under Explosive Loading, Russian Journal of Nondestructive Testing (Engl. transl.), 2010, Vol. 46, No. 12, pp. 867–883.

Дефектность реальных наноматериалов значительно превышает дефектность равновесных кристаллов, что проявляется в особенностях электронной структуры. Однако электронная структура наноксидов практически не изучалась. Это затрудняет интерпретацию физических свойств оксидных наноматериалов и, в целом, понимание природы наносостояния. В настоящей работе мы представляем результаты оптических исследований в широком спектральном диапазоне высокоплотных наноструктурированных образцов Cu_2O и CuO , полученных методом кручения под давлением. Посредством эллипсометрических измерений получены оптические функции в диапазоне 1–5 эВ, также измерены ИК спектры поглощения в области 0,1–0,6 эВ. Для выяснения особенностей электронной структуры, связанных с переходом в наносостояние, основное внимание уделялось сравнению спектров наноксидов и монокристаллов. С целью определения характера дефектности и валентности катионов проведены рентгеноспектральные исследования наноксидов. Установлено присутствие высокой концентрации ионов Cu_{2+} в Cu_2O и Cu^+ в CuO . Были также выполнены расчеты электронной структуры дефектного наноксида Cu_2O методами приближения локальной плотности LDA и LDA+U. В ИК спектрах поглощения выявлены полосы, связанные с дефектами стехиометрии. Дисперсия действительной и мнимой частей диэлектрической функции наноксидов значительно отличается от зависимостей, полученных для монокристаллов. Оптическая спектральная плотность в наноксидах перераспределена из области выше края фундаментального поглощения в низкоэнергетическую область по сравнению с монокристаллами. При этом энергетическое положение всех фундаментальных полос сохраняется. Мы полагаем, что эти особенности связаны с природой наносостояния наноксидов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты 11-02-00252, 11-02-00166 и Программы Отделения физических наук Российской академии наук «Физика новых материалов и структур».

OPTICAL SPECTRA AND ELECTRONIC STRUCTURE OF NANOSTRUCTURED COPPER OXIDES PREPARED BY METHODS OF SEVERE PLASTIC DEFORMATIONS

B.A. Gizhevsky, L.V. Nomerovannaya,
A.A. Makhnev, E.V. Mostoshchikova,
V.R. Galakhov, A.I. Poterayev, S.V. Naumov
Institute of Metal Physics, Ural Division, Russian
Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia
E-mail: gizhevskii@imp.uran.ru

Physical and chemical properties of materials change drastically as crystallite size goes down to nanometer range. The real nanocrystalline materials are strongly defective with defect concentration considerably higher than in equilibrium crystals. Investigation of features of the electronic structure of nanooxides are almost absent. This circumstance complicates interpretation of the physical properties of oxide nanomaterials and, on whole, understanding the nature of nanostate. In this work we

4-77

ОПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ И ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ОКСИДОВ МЕДИ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ ИНТЕНСИВНЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Б.А. Гижевский, Л.В. Номерованная,
А.А. Махнев, Е.И. Мостовщикова, В.Р. Галахов,
А. И. Потеряев, С.И. Наумов

Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия
E-mail: gizhevskii@imp.uran.ru

Физико-химические свойства материалов испытывают значительные изменения при уменьшении размеров кристаллитов до наноразмерного масштаба.

present results of optical study in broad spectral range 0.1–5 eV high density nanostructured samples of Cu_2O and CuO prepared by high pressure torsion method. We investigate optical functions by spectroscopic ellipsometry in the 1–5 eV photon energy range and measured IR (0.1–0.6 eV) absorption spectra. To elucidate specific features of the transformation of the electronic structure onto the transition in nanostate, attention was focused on comparison of features of the optical spectra of nanostructured samples with those for the single crystal samples. Electronic band structure calculations of defective nanostructured Cu_2O were performed by local density approximation (LDA) and LDA+U methods. We revealed absorption bands in the IR spectra of nanostructured samples of copper oxides associated with defects of stoichiometry. Dispersion of the components of the dielectric function in the nanostructured samples is significantly different from that for the single crystals. The optical spectral density of the nanooxides is redistributed from the energy region above the fundamental absorption edge to the region below the edge, although all main electronic transitions observed in the single crystals remain in the nanostructured samples. We believe that these features associate with the nature of nanocrystalline state of oxides.

The work was supported by the RFBR projects 11-02-00252, 11-02-00166 and Program of the Department of Physical Sciences of the Russian Academy of Sciences «Physics of New Materials and Structures».

4-78

ЗАРЯДОВЫЕ СОСТОЯНИЯ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА В НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ И FeBO_3

В.В. Месилов¹, В.Р. Галахов¹, Б.А. Гижевский¹,
Н.А. Овечкина¹, Н.И. Лобачевская²

¹Институт физики металлов УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

²Институт химии твердого тела УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

E-mail: mesilov@imp.uran.ru

В работе представлены данные по исследованию зарядовых состояний ионов железа в наноструктурированных образцах железо-иттриевого граната $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ и бората железа FeBO_3 на основе измерений рентгеновских абсорбционных Fe 2p-спектров и расчета мультиплетов для Fe^{2+} , Fe^{3+} -ионов.

Наноструктурированные образцы $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ и FeBO_3 получены размолом исходных порошков с помощью метода квазистатических деформаций (сдвиг под давлением). Деформация сдвига осуществлялась путем вращения одной из двух наковален Бриджмена, между которыми был зажат исходный порошок. Рентгеновские абсорбционные Fe 2p-спектры наноструктурированных $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ и FeBO_3 измерены на российско-германской линии синхротрона BESSY (Берлин). Расчеты мультиплетов для Fe^{2+} , Fe^{3+} -ионов в кислородном октаэдрическом (Oh) и тетраэдрическом окружениях (Td) выполнены для различных значений параметра расщепления кристаллическим полем.

Анализ экспериментальных рентгеновских абсорбционных спектров и результатов расчетов мультиплетов показывает, что ионы железа в наноструктурированном $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ находятся в электронных конфигурациях $3d_5$ и $3d_6$. Установлено изменение величины параметра расщепления кристаллическим полем в результате перехода $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ в наноструктурированное состояние. Предполагается, что часть ионов железа при пластической деформации переходят на позиции иттрия, изменяя свое кислородное окружение с тетраэдрического на додекаэдрическое, в результате чего изменяются внутрикристаллическое поле образца и зарядовое состояние ионов железа. Результаты эксперимента и расчета показывают, что в наноструктурированном FeBO_3 ионы железа находятся в двух- и трехвалентном состоянии. Увеличение сдвиговой деформации FeBO_3 приводит к превращению части ионов Fe^{3+} в Fe^{2+} . Найденные закономерности влияния пластической деформации на зарядовые состояния ионов железа в $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ и FeBO_3 могут быть использованы для управления технологическими процессами получения наноструктурированных образцов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 11-02-00166 и 11-02-00252).

VALENCE STATES OF IRON IONS IN NANOSTRUCTURED $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ AND FeBO_3

V.V. Mesilov¹, V.R. Galakhov¹, B.A. Gizhevsky¹,
N.A. Ovechkina¹, N.I. Lobachevskaya²

¹Institute of Metal Physics, Ural Branch of RAS,
Yekaterinburg, Russia

²Institute of Solid State Chemistry, Ural Branch of RAS,
Yekaterinburg, Russia

E-mail: mesilov@imp.uran.ru

We present new data concerning the studies of the valence state of ions in nanostructured samples of yttrium iron garnet $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ and ferric borate FeBO_3 on the basis of our measurements of X-ray absorption Fe 2p spectra and multiple calculations of Fe-ions.

Nanostructured samples of $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ and FeBO_3 are obtained from grinding initial powders by means of the method of quasistatic deformations (shift under pressure). Shift deformation was carried out by rotation of one of the two Bridgman's anvils between which the initial powder was clamped. X-ray absorption Fe 2p spectra of nanostructured $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ and FeBO_3 were measured at Russian-German beamline at BESSY (Berlin). Multiple scattering calculations for Fe, Fe ions in oxygen octahedral (Oh) and tetrahedral environments (Td) were carried out for various values of the crystal-field parameter $10Dq$.

The analysis of the experimental X-ray absorption spectra and results of the multiple scattering calculations shows that iron ions in nanostructured $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ are in the Fe^{3+} and Fe^{2+} valence states ($3d_5$ and $3d_6$ electronic configurations, respectively). Change of the crystal-field parameter as a result of transition $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ in nano condition is established. We suppose that at plastic deformation, part of iron ions undergoes to the yttrium positions, changing the oxygen environment from tetrahedral to the dodecahedral one. Therefore, the crystal field in the sample and valence

states of iron ions are changes. Results of our experiments and calculations show that in nanostructured FeBO_3 , iron ions, as in the case of yttrium iron garnet, are the Fe^{3+} and Fe^{2+} valence states. The increase of the shift-deformation value of FeBO_3 leads to transformation of part of Fe^{3+} ions to Fe^{2+} ions. The found laws of influence of plastic deformation on the valence states of iron ions in $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ and FeBO_3 can be used for management of technological processes of fabrications of nanostructured samples.

The work is partly supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grants № 11-02-00166 and 11-02-00252) and by the bilateral Program «Russian-German Laboratory at BESSY».

4-79

**ВЛИЯНИЕ МАСШТАБА ЗАГОТОВКИ
НА ПАРАМЕТРЫ СТРУКТУРЫ
АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМЦ
ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ КАНАЛЬНО-
УГЛОВЫМ ПРЕССОВАНИИ**

А.Н. Петрова¹, И.Г. Ширинкина¹, В.В. Астафьев¹,
Т.И. Яблонских¹, И.Г. Бродова¹, П.А. Насонов²,
Е.В. Шорохов², И.В. Минаев²

¹Институт физики металлов УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

²Российский федеральный ядерный центр – ВНИИ
технической физики им. академ. Е.И. Забахина,
Снежинск, Россия

E-mail: petrovanastya@yahoo.com; e.v.shorokhov@vniitf.ru

В данной работе исследовалась микроструктура цилиндрических образцов разного размера из промышленного алюминиевого сплава АМц после интенсивной пластической деформации (скорость деформации 10^3 – 10^5 с⁻¹) методом динамического канально-углового прессования (ДКУП). Методом конечных элементов проведено моделирование движения цилиндрических образцов (диаметром 14 и 125 мм) по пересекающимся каналам в процессе ДКУП. Результаты расчетов сдвиговых напряжений в образцах разного размера показывают, что напряженно-деформационное состояние материала в фиксированные моменты времени по сечению неоднородно, однако распределение сдвиговых напряжений в образцах практически не зависит от масштаба заготовки. Изучено влияние условий нагружения (начальной скорости движения образца через два пересекающихся канала, числа проходов, геометрии матрицы) на однородность структуры по сечению и механические характеристики образцов. Методом просвечивающей электронной микроскопии установлено, что в образцах разного размера после одного прохода ДКУП, образуется преимущественно смешанная ультра микроструктурная структура с большеугловыми и малоугловыми границами, характеризующаяся высокой плотностью дислокаций. Средний размер структурных фрагментов, в крупногабаритном образце в два раза больше и равен 500 нм. Формирование такой структуры оказывает положительное влияние на механические свойства сплава.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта ориентированных фундаментальных исследований УрО РАН №11-2-11ЯЦ и гранта РФФИ (проект № 11-03-00047).

**THE EFFECT OF THE BILLET SIZE
ON STRUCTURAL PARAMETERS
OF ALUMINUM ALLOY A3003 UPON DYNAMIC
CHANNEL ANGULAR PRESSING**

A.N. Petrova¹, I.G. Shirinkina¹, V.V. Astafiev¹,
T.I. Yablonskikh¹, I.G. Brodova¹, P.A. Nasonov²,
E.V. Shorokhov², I.V. Minaev²

¹Institute of Metal Physics, Ural Branch of RAS,
Yekaterinburg, Russia

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

E-mail: petrovanastya@yahoo.com;
e.v.shorokhov@vniitf.ru

Present work provides results on microstructure investigations of industry Al-based alloy AMts (A3003) after severe plastic deformation (SPD). The SPD was carried out on the cylindrical samples with different size by dynamic equal channel pressing (DCAP) with strain rate of 10^3 – 10^5 s⁻¹.

Finite elements method was used to simulate the motion of the samples having different diameters (14 and 125 mm) through the die during pressing. Shear stress calculation results have shown that stress-strain state of the material on longitudinal section is not homogeneous at the instance, shear stress distribution in the samples slightly changes with increasing of billet's size.

The effect of loading condition such as initial velocity of the samples motion through the channels, number of DCAP passes, the geometry of the die on the homogeneity of the structure formed during deformation and mechanical characteristics of the samples was estimated.

Transmission electron microscope investigations of the two samples (with diameter of 14 mm, length of 65 mm and with diameter of 30 mm, length of 120 mm) produced by one pass of DCAP have shown that mixed structure with high-angle and low-angle boundaries, high dislocation density is formed in both samples. The average structural fragments size in the big bulk sample was estimated as 500 nm. The ultrafinegrained samples after DCAP have increased hardness and strength.

4-80

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ
НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ МЕДИ
И БРОНЗЫ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ
ДИНАМИЧЕСКОГО КАНАЛЬНО-УГЛОВОГО
ПРЕССОВАНИЯ**

И.В. Хомская¹, В.И. Зельдович¹, Е.В. Шорохов²
Н.Ю. Фролова¹, А.Э. Хейфец¹, П.А. Насонов²

¹Институт физики металлов УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

²Российский федеральный ядерный центр – ВНИИ
технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: khomsкая@imp.uran.ru

Исследованы закономерности деформационного поведения, структурные изменения и физико-механические свойства объемных образцов меди и сплавов на ее основе, подвергнутых динамическому канално-угловому прессованию (ДКУП). Метод ДКУП, разработанный в РФЯЦ – ВНИИТФ (патент РФ, 2006 г), представляет собой высокоскоростной ($\sim 10^5$ с⁻¹) вариант РКУП. Образцы разгоняли с помощью пушки до скоростей 100–250 м/с и направляли в матрицу, содержащую два канала, пересекающиеся под углом 90°. Проводили 1–4 цикла прессования, длительность одного цикла ~ 500 мкс. При ДКУП на образец действует высокоскоростная деформация сдвига и ударно-волновая деформация сжатия (равномерная и локализованная), что создает добавочный источник деформационного наклепа.

Установлено, что наилучшие результаты прессования достигаются при использовании матрицы без закругления внутреннего угла каналов. При нулевом значении радиуса происходит наиболее частая релаксация накапливаемых напряжений при деформировании, что способствует получению однородной и дисперсной структуры. На примере латунного образца изучена картина гидродинамического течения материала при ДКУП и определено, что величина сдвига вдоль поперечного сечения образцов составляет 1,8–2,0.

Показано, что формирование неравновесного наноструктурированного состояния в меди при ДКУП происходит в результате высокоскоростных циклических процессов фрагментации, динамической полигонизации и динамической рекристаллизации. Установлено, что твердость, удельная контактная твердость и величина упругого восстановления наноструктурированной меди, полученной при 4-х циклах ДКУП, возрастает 1,4–1,5 раза. Еще более значительный рост этих характеристик достигается в бронзе Cu-0,1Zr-0,1Cr после 1–3 циклов ДКУП. При этом увеличение числа циклов от 1 до 3 сопровождается повышением величины твердости и значения сопротивления материала упругим деформациям в 1,9–2,8 раза, а также приводит к росту контактного модуля упругости на 21–27%.

Работа выполнена по плану РАН тема «Структура» (№ г.р.01201064335) и при частичной поддержке

проектов Президиума РАН (№12-П-2-1030), УрО РАН (№11-2-11-ЯЦ и) и гранта РФФИ (№11-03-00047).

**STUDY OF STRUCTURE AND PROPERTIES
OF NANOSTRUCTURED COPPER
AND BRONZE, OBTAINED BY DYNAMIC
CHANNEL-ANGULAR PRESSING**

I.V. Khomsкая¹, V.I. Zeldovich¹, E.V. Shorokhov²,
N.Yu. Frolova¹, A.E. Kheifets¹, P.A. Nasonov²

¹Institute of Metal Physics, Ural Branch of RAS,
Yekaterinburg, Russia

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

E-mail: khomsкая@imp.uran.ru

The regularities of the deformation behavior, structural changes, physical and mechanical properties of bulk samples of copper and alloys on its basis, subjected to dynamic channel-angular pressing (DCAP) have been studied. The DCAP method, developed in VNIITF (RF Patent, 2006), is a high-speed ($\sim 10^5$ s⁻¹) version of the ECAP. The samples were accelerated by means of a gun up to velocities of 100–250 m/s and direct to a die that contains two channels intersecting at an angle of 90 degrees. 1–4 passes of compression were spent, the duration of one pass was of ~ 500 mks. At DCAP the high-speed deformation of shear and shock wave compression deformation (uniform and localized) act to the sample, which creates an additional source of strain hardening.

It is established that the best results are achieved with compression by the die without curvature of the inner corner of channels. At radius of zero the more small-scale relaxation of stress accumulated during deformation take place, which helps to ensure a homogeneous and disperse structure. On the example of a brass sample the hydrodynamic flow pattern of the material at DCAP was studied and that the value of shear of 1.8–2.0 along the cross-section of the samples was determined. It is established that the formation of nonequilibrium states in nanostructured copper at DCAP occurs as a result of high-speed cyclic processes of fragmentation, dynamic polygonization and dynamic recrystallization.

It is shown that the hardness, contact hardness and value of elastic recovery of nanostructured copper, obtained by 4 passes of DCAP are increased 1.4–1.5 times. Even more significant growth of these characteristics is achieved in bronze Cu-0,1Zr-0,1Cr after the 1–3 pass of DCAP. The increase in the number of passes from 1 to 3 accompanied by an increase values of hardness and resistance values of the material to elastic deformations in 1.9–2.8 times, and also increases the contact module of elasticity at 21–27%.

This work was supported by RAS theme «Structure» (g.r.01201064335) and partially supported by projects of Presidium of RAS (2-P-2-1030), Ural Division of RAS (11-2-11-NC) and a grant RFBR (11-03-00047).

Секция 5

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ
ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ
И РАДИАЦИОННОЙ МЕДИЦИНЫ**

Section 5

**SCIENTIFIC BASES
OF NUCLEAR POWER ENGINEERING
AND NUCLEAR MEDICINE**

АНАЛИЗ ПРОЕКТОВ ГИБРИДНЫХ РЕАКТОРОВ НА БАЗЕ МАГНИТНОГО УТС ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ОЯТ

Э.А. Азизов, Г.Г. Гладуш

ГНЦ РФ «Троицкий институт инновационных
и термоядерных исследований», Троицк, Россия

E-mail: Gladush@triniti.ru

Термоядерная энергетика обладает неограниченными запасами топлива, отсутствует ОЯТ, невозможен неконтролируемый разгон реактора, высокая интенсивность потока быстрых нейтронов. В последнее десятилетие в термоядерном сообществе складывается мнение, что наиболее быстрый путь реализации УТС это использование его для решения проблем ядерной энергетики. Одной из наиболее важных проблем является эффективная утилизация отработанного ядерного топлива. Использование гибридных реакторов-трансмутаторов для утилизации отработавшего ядерного топлива имеет не только экономический, но общественно-политический характер, связанный в последнее время с настороженным отношением общества к развитию ядерной энергетики. В силу этого разработка и создание термоядерного источника нейтронов (ТИН) для утилизации долгоживущих нуклидов, в первую очередь, актиноидов, возможно, наиболее актуальны.

Термоядерные нейтроны можно генерировать в ответственно разработанных токамаках и открытых магнитных ловушках. К настоящему времени это наиболее технологически продвинутые направления, хотя стеллараторные, ускорительные и лазерные проекты так же активно развиваются.

Внимание к гибридным реакторам синтез деления было первоначально (1977 г.) обусловлено вопросом обеспечения топливом растущего парка тепловых реакторов. Эта проблема актуальна и в наше время, так как развитие необходимых быстрых реакторов существенно не продвинулось и к настоящему времени. Идея и конструкция токамака-гибрида в общем подобна современным проектам, в частности ИТЭР. Поскольку размеры такого токамака близки к ИТЭР, то его стоимость будет превышать стоимость ИТЭР, что делает этот проект приемлемым лишь в рамках широкого международного сотрудничества.

Проект ТИН на основе газодинамической ловушки, со сверхпроводящими катушками детально разрабатывается в Институте ядерной физики СО РАН предполагает довести мощности нейтронного потока до $P_f = 4$ МВт (при $PNBI = 114$ МВт) и подкритичного реактора до 1 ГВт.

Наиболее разработанным проектом реактора-трансмутатора на базе компактного тороида является проект токамака JUST-T с $A = 2$. Выбор умеренной величины аспектного отношения A обусловлен: возможностью использовать на первом этапе теплую ЭМС. Численные расчеты показали, что использование такого токамака-реактора позволяет трансмутировать минорные актиниды с 10–15 реакторов типа ВВЭР-1000. В сферических токамаках с $A \sim 1,5$ высокие параметры достигаются

при умеренных ресурсах и финансовых затратах. Поэтому, начиная, с конца прошлого века во многих странах начались эти разработки (в Китае, США и Англии). В малогабаритных сферических токамаках ($R = 0,48$ м, $r = 0,28$ м) с магнитным полем до 2 Тл довольно высокие потоки быстрых нейтронов $>7 \cdot 10^{13}$ н/см² с могут быть достигнуты даже с медными катушками, охлаждаемыми водой. Жидкосолевым бланкет для этого ТИН состоит из 4 автономных модулей, окружающих вакуумную камеру. Проведено сравнение эффективности генерации нейтронов в различных проектах.

ANALYSIS OF PROJECTS OF HYBRID REACTOR BASED ON CONTROLLED MAGNETIC FUSION FOR WASTE MANAGEMENT

E.A. Azizov, G.G. Gladush

FSUE SRC RF Troitsk Institute for Innovation and Fusion
Research, Troitsk, Russia

E-mail: gladush@triniti.ru

Fusion energy has unlimited supplies of fuel. It leaves no waste, has no reactor runaway, and provides a high intensity fast neutron flux. During the last decade, the fusion community developed the impression that the fastest way to implement thermonuclear fusion is to use it to solve the problems of the nuclear power generation. One of the most important problems is the efficient disposal of spent nuclear fuel. The use of hybrid reactors transmutator for recycling the fuel is not only of economic but as well of social and political nature. It has recently been associated with the wariness of the society towards the development of nuclear energy. In the view of this development and creation of fusion neutron source (FNS) for the disposal of long-lived nuclides in the first place, actinides, are perhaps the most relevant.

Fusion neutrons can be generated in appropriately designed tokamaks and open magnetic traps. To this date, this is the most technologically advanced area, although the stelarator, accelerator and laser projects are also actively developing.

Attention to the fusion-fission hybrid reactor was originally (1977) due to fuel supply issue for the growing park of thermal reactors. This is a problem of our time as the development of the necessary fast reactors has not shown substantial progress. The idea and design of this hybrid tokamak are generally similar to modern designs, including ITER. Because of the size of such a tokamak is close to the ITER tokamak, its cost will exceed the cost of ITER. Due to this fact this project may be realized only within the framework of broad international cooperation.

The project of FNS-based gas-dynamic trap with superconducting coils is developed in the Institute of Nuclear Physics SB RAS. It involves the power to bring the neutron flux up to 4MW (at $PNBI = 114$ MW) and subcritical reactor to 1 GW.

The most developed transmutator reactor on the basis of a compact toroid is the project of JUST-T tokamak with $A = 2$. The choice of a moderate aspect ratio A is due to the ability to use the warm EMC in the first stage. Numerical calculations showed that the use of a tokamak reactor can transmute minor actinides from 10–15

VVER-1000 reactors. In spherical tokamaks with $A \sim 1.5$ high parameters are achieved with moderate resources and of financial costs. Therefore, starting from the end of the last century, many countries have begun this development (in China, the USA and England). In small spherical tokamak ($R = 0.48$ m, $r = 0.28$ m) with a magnetic field of 2 T quite high fluxes of fast neutrons $> 7 \cdot 10^{13}$ n/cm² can be achieved even with copper coils, cooled by water. Molten blanket for the FNS consists of four independent modules, surrounding the vacuum chamber. A comparison of the efficiency of generation of neutrons in various projects has been carried out.

5-2

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ЖИДКОСОЛЕВОГО РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

Г.П. Швейкин¹, В.А. Симоненко², С.П. Распопин³,
Н.Н. Алексеенко³, Н.М. Барышева², А.Р. Бекетов³,
Б.Д. Васин³, Ю.С. Долгирев³, Ю.П. Зайков⁴,
П.Г. Зыков³, Е.В. Поляков¹

¹Институт химии твердого тела УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

²Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

³Физико-технологический институт УрФУ,
Екатеринбург, Россия

⁴Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

E-mail: bam@ihim.uran.ru; n.m.barysheva@vniitf.ru;
beketovar@dpt.ustu.ru; dir@ihite.uran.ru

В докладе приводится обоснование не обходимости практической реализации концепции реактора на быстрых нейтронах с мобильной активной зоной (АЗ) в виде расплава хлоридов щелочных металлов, урана, тория. Подобный реактор обладает рядом очевидных преимуществ, в частности:

- АЗ не содержит твердотельных ТВЭЛов и позволяет без остановки реактора оптимизировать изотопный и массовый состав АЗ.
- Накапливающиеся в хлоридном расплаве элементы-РНД в нейтронных потоках могут трансмутироваться в стабильные или короткоживущие изотопы.
- Переработка солевого расплава АЗ возможна сразу после запуска реактора, объединенного с безводной технологией ЯТЦ, поэтому отпадает нужда в перевозках ОЯТ. Единый топливный цикл может обслуживать 5–6 реакторов большой мощности.
- В полной мере решается проблема перераспределения делящихся материалов.

В связи с наличием в Уральском регионе мощного конгломерата организаций из предприятий Росатома, ВУЗов по подготовке специалистов для него, УрО РАН, возобновление работ по созданию жидкосолевого реактора на быстрых нейтронах (ЖСРБН) на территории УрФо является своевременным и оправданным. Имею-

щийся в научных организациях Урала задел позволяет в течение ближайших 2–3 лет подготовить ТЭО для проектирования опытно-демонстрационного ЖСРБН мощностью ~ 10 –20 МВт.

Предлагается реактор с активной зоной в виде расплава на основе хлоридов щелочных металлов, содержащего хлориды урана, плутония, тория. Выбор хлоридных систем определяется рядом факторов, в частности:

- Хлоридные среды менее агрессивны по отношению к функциональным и конструкционным материалам, чем фторидные среды.
- Хлоридные системы являются продуктом безводной технологии переработки монацитовых концентратов.
- Возможность создания любых концентраций топливных компонентов в активной зоне.
- Более простыми операциями отделения твердой фазы от солевого расплава.
- Реактор на быстрых нейтронах является наиболее приемлемым для хлоридных систем.

Рассматриваются некоторые свойства таких расплавов при использовании их в ядерной энергетике в качестве размножающих сред.

Обсуждаются физико-химические проблемы создания ЖСРБН.

THE STATE OF THE ART AND PROBLEMS IN THE DEVELOPEMNT OF THE MOLTEN-SALT FAST REACTOR

G.P. Shveykin¹, V.A. Simonenko², S.P. Raspopin³,
N.N. Alexeyenko³, N.M. Barysheva², A.R. Beketov³,
B.D. Vasin³, Y.S. Lolgirev³, Y.P. Saykov⁴, P.G. Zykov³,
E.V. Polyakov¹

¹Institute of Soli-State Chemistry, Ural Branch
of RAS, Yekaterinburg, Russia

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

³Engineering Physics Institute of Ural Federal University,
Yekaterinburg, Russia

⁴Institute of High-Temperature Electrochemistry,
Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia

E-mail: bam@ihim.uran.ru; n.m.barysheva@vniitf.ru;
beketovar@dpt.ustu.ru; dir@ihite.uran.ru

The paper provides a justification why it is necessary to implement a fast reactor with a mobile core of melt alkali chlorides, uranium and thorium. The reactor has obvious advantages, specifically

- No solid fuel elements in the core which allows its isotopic and mass composition to be optimized with no need to shutdown the reactor;
- Radioactive nuclides which accumulate in the chloride melt can transmute into stable or long-lived isotopes in neutron fluxes;
- No spent fuel transportation because molten salt can be processed right after the reactor integrated with dry nuclear fuel cycle technology starts up; a single fuel cycle can serve 5–6 high-power reactors; and
- The problem of fissile material redistribution is completely resolved.

The Ural Region hosts lots of ROSATOM's organizations, higher education institutions which prepare specialists for them, and the Ural Branch of Russia Academy of Sciences, and therefore it would seem timely and relevant to revive the construction of a molten-salt fast reactor in the area. With what have earlier been done by Ural research institutes it is possible within the next 2–3 years to accomplish a technical and economic assessment for projecting a demonstrational molten-salt fast reactor of power about 10–20 MW.

The reactor will have a core of molten alkali chlorides with uranium, plutonium and thorium chlorides. The choice of chloride systems is governed by a number of factors including the following:

- Chlorides are less aggressive to functional and structural materials than fluorides;
- Chlorides are products of dry processing of monazite concentrates;
- Any concentrations of fuel components in the core are attainable;
- Operations to separate solid phases from molten salt are simpler; and
- The fast reactor fits the chloride systems best.

Some properties of these melts used as breeding media are considered.

Physical and chemical problems in the development of the reactor are discussed.

5-3

ВЫДЕЛЕНИЕ ТОРИЙСОДЕРЖАЩИХ ПРОДУКТОВ ИЗ СМЕСИ ОКСИДОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

В.Г. Бамбуров¹, Ю.П. Зайков², В.А. Хохлов²

¹Институт химии твердого тела УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: bam@ihim.uran.ru; dir@ihite.uran.ru

Традиционные гидрометаллургические методы переработки торийсодержащего природного или техногенного сырья не обеспечивают проведение совокупности технологических операций на современном уровне радиологической безопасности, сопровождаются неоправданным ростом потребления воды как дефицитного природного ресурса. Разработка альтернативных «безводных» способов комплексной переработки торийсодержащего сырья в рамках концепции замкнутого ядерного топливного цикла становится актуальной задачей, позволяя устранить или, по крайней мере, радикально снизить наносимый природе ущерб. Уход от принципов гидрометаллургии не только устраняет источник загрязнений природной среды жидкими радиоактивными отходами, но обещает существенно повысить ресурсо- и энергоэкономичность альтернативных технологических процессов переработки ториевого сырья.

Наиболее важным и перспективным звеном в предлагаемой технологической цепочке комплексной переработки торийсодержащего сырья на ее заключительной стадии является использование принципа элект-

рохимического разложения тетрахлорида тория или прямого восстановления оксида тория и его смесей с оксидами редкоземельных элементов в галогенидных расплавах; целью электрохимической переработки является получение тория в виде чистого металла или соответствующих сплавов. Работами ученых Уральского отделения РАН и Уральского федерального университета заложены физико-химические основы этих технологических процессов. Они экспериментально проверены в маломасштабных лабораторных условиях.

Результаты выполненных к настоящему времени на Урале исследований по высокотемпературной физической химии и электрохимии солевых расплавов и, в частности, галогенидных и галогенидно-оксидных композиций, содержащих торий и редкоземельные металлы, требуют развития и конкретизации в связи с поставленной задачей переработки «уральского» монацитового концентрата, возрастанием на международном уровне интереса к ядерным реакторам с жидкосолевым топливом на основе соединений тория.

EXTRACTION OF THORIUM AND ITS RARE-EARTH ALLOYS FROM THEIR OXIDES BY HALOGENIDE MELT ELECTROLYSIS

V.G. Bamburov¹, Y.P. Zaykov², V.A. Khohlov²

¹Institute of Solid State Chemistry, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia

²Institute of High-Temperature Electrochemistry, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia

E-mail: bam@ihim.uran.ru; dir@ihite.uran.ru

The traditional hydrometallurgy methods which are used to process natural and technogenic thorium-bearing raw material do not meet current requirements for environmental protection and demand too much water – the resource which is getting increasingly scarce in the world. It is therefore the order of the day to develop alternatives – dry methods of thorium-bearing material processing incorporated in the closed nuclear fuel cycle systems. This will help eliminate or at least significantly reduce damage to the environment. Abandoning hydrometallurgy principles not only removes the source of environmental contamination with liquid radioactive waste, but also promises to make thorium raw processing much more resource and energy saving.

Electrochemical treatment is a very important and promising final stage of technology proposed for integrated thorium-bearing material processing. It includes decomposition of thorium tetrachloride or direct reduction of thorium oxide and its mixtures with rare-earth oxides in halogenide melts with the purpose to produce pure thorium metal or its alloy. Physical and chemical foundations of these processes were laid and tested in small-scale laboratory experiments by scientists from the Ural Branch of Russian Academy of Sciences and Ural Federal University.

What have been done in the Ural Region in the area of high-temperature physical chemistry and electrochemistry of molten salts and, particularly, thorium and rare-earth bearing halogenide and halogenide-oxide compositions need extension and specification to address the stated problem of processing the Ural monazite concentrate and in

connection with growing interest to nuclear reactors with thorium-based molten-salt fuel.

5-4

ВОДОРОДНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ АЭС С ВВЭР

В.А. Симоненко

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: v.a.simonenko@vniitf.ru

Одним из основных факторов опасности современных ядерных энергоблоков является возможность появления больших количеств водорода при различных сценариях развития аварий на АЭС. Потенциальная опасность обусловлена наличием воды либо как теплоносителя в канальных реакторах типа РБМК, Candu, либо как замедлителя и теплоносителя в корпусных реакторах, типа ВВЭР, PWR, BWR. Водород в таких системах образуется даже при номинальных режимах работы энергоблоков в результате радиолитического распада воды. Применительно к таким режимам разработаны и регулярно используются на АЭС технологии безопасного удаления водорода из воды и компонентов оборудования.

Опасность появления больших количеств водорода возникает при тяжелых авариях (ТА) с потерей теплоносителя в первом контуре. Мировая ядерная энергетика уже столкнулась с жестокими уроками протекания ТА и формирования тяжелых последствий их. Таковыми являются события на втором энергоблоке АЭС Три-Майл Айленд (США, 1979 г.), на четвертом энергоблоке Чернобыльской АЭС (Украина, 1986 г.), на четырех энергоблоках АЭС Фукусима Дайичи (Япония, 2011 г.). Причинами таких аварий могут быть ошибки персонала, несовершенства конструкций энергоблоков и упущения в определении допустимых регламентов работ. На современных АЭС для безопасного удаления водорода в ходе аварий предусматриваются технические средства, технологические операции и организационные меры.

В докладе обсуждаются причины и механизмы возникновения водородной опасности, различные сценарии возможного развития ТА применительно к энергоблокам с реакторами ВВЭР, способы предотвращения опасных процессов и необходимые для этого технические средства. Обсуждается методология работ по обеспечению водородной безопасности. Она включает в себя расчетно-теоретический анализ опасных сценариев; экспериментальную проверку физико-химических моделей определяющих процессов и математических кодов, используемых для численного моделирования; разработку и внедрение (при сооружении энергоблоков) технических средств, предназначенных для ослабления опасных сценариев развития ТА; использование средств контроля концентрации водорода в помещении ЗО и средств удаления его при образовании; использование средств регулирования давления, температуры и состава газовой среды при протекании ТА; комплекс организационных мероприятий по предотвращению аварий и ослаблению их неблагоприятного развития. Сопоставляются отечественные и зарубежные подходы

и возможности при решении проблем обеспечения водородной безопасности.

Освещаются вопросы полноты технических средств и организационных мер для предотвращения развития опасных сценариев ТА на АЭС с реакторами ВВЭР. Подчеркивается, что в силу больших сроков эксплуатации ядерных энергоблоков (проектируемое время эксплуатации составляет 60 лет) необходимо осуществлять периодический пересмотр требований и средств обеспечения водородной безопасности, приводить их в соответствие с уровнем понимания и техническими возможностями фактического времени.

HYDROGEN SAFETY OF NPP WITH WWER

V.A. Simonenko

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

E-mail: v.a.simonenko@vniitf.ru

One of the main sources of threat for operating NPP is the opportunity to appear of large amount of hydrogen for various scenarios of severe accidents. The potential threat is caused by use of water as cooling material for channel type reactors as RBMK and Candu, or as a cooling and moderating material for vessel type reactors, as WWER, PWR and BWR. For all these systems hydrogen appears even under nominal operation due to radiolysis of water. There are developed and implemented technologies to remove safely hydrogen from water and engineering systems of NPP for normal operation.

A danger of origin of large amounts of hydrogen can appear in the course of severe accidents (SA) with loss of coolant in the primary-coolant system. World nuclear power has faced hard lessons of such accidents development and formation of their severe consequences. The accidents occurred on the second reactor unit at Three-Mile Island NPP, USA (1979), on the fourth reactor at Chernobyl NPP, Ukraine (1986), and on four reactors of Fukushima Daiichi, Japan (2011). The reasons of such accidents can be mistakes of personnel, imperfections of power units design and faults in allowed routine maintenance procedures.

There are discussed in the presentation reasons, sources and mechanisms of origin of hydrogen, various scenarios of possible development of SA in the case of WWER reactors, means to prevent evolution of hazardous processes and needed engineering features. The general methodology of activity to provide hydrogen safety described. It includes physical and chemical models and mathematical codes and simulations; experimental verification of models and codes; development and implementation during construction and assembling stages of engineering features to prevent and decrease development of hazardous scenarios of severe accidents; use the instruments to measure the hydrogen and other perilous gases concentrations in the compartment of the containment and means to remove them to provide benign composition of gas mixture; a system of procedures for SA management and training of personnel to prevent severe accidents and to decrease their negative consequences. It is also made a comparison of domestic and foreign approaches and opportunities to provide benign solution to problems of hydrogen danger.

There are discussed the fullness of implemented engineering features and managerial procedures to prevent development of hazardous scenarios of severe accidents on NPP with WWER. It is emphasized that due to prolonged operational life of commercial nuclear reactors (project life about 60 years) it is necessary to revise periodically demands and means needed to provide hydrogen safety, to upraise them to the level of concurrent understanding and engineering opportunities.

5-5

О МЕХАНИЗМЕ ДЕФЛАГРАЦИИ И ДЕТОНАЦИИ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ ПАРО-ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

О.В. Шульц, В.А. Симоненко

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

В работе рассматривается механизм формирования воспламенения и возможные режимы горения водорода в составе водородсодержащих парогазовых смесей в однородной и неоднородной средах. Рассматривается возможность инициирования цепного и цепно-теплого взрыва водорода в условиях тяжелой аварии на АЭС с реактором типа ВВЭР. На основе литературных данных о механизме и кинетике элементарных стадий окисления водорода составлена модель для описания химической кинетики этого процесса с учетом диффузии и тепловыделения.

Также по данным о механизме и химической кинетике элементарных стадий процесса окисления водорода был составлен стационарный критерий возможности лавинообразного протекания реакции цепного окисления водорода. В соответствии с этим критерием рассчитывались пределы воспламенения водорода. Данные о пределах цепного окисления обобщаются для случая изменения давления, температуры и состава смеси. Расчетные данные сопоставляются с доступными результатами экспериментов.

Проведены одномерные газодинамические расчеты с помощью программного комплекса «волна» для оценки параметров системы при струйных процессах, которые могут возникнуть в условиях тяжелой аварии на АЭС с реактором типа ВВЭР. Полученные в результате газодинамических расчетов параметры были проверены в соответствии со статическим критерием и, в зависимости от их соответствия или несоответствия критерию, делался вывод, возможно ли инициирование взрыва водородсодержащей парогазовой смеси данного состава по цепному механизму в условиях, создаваемых струйным процессом.

В работе также обсуждаются процессы, происходящие в ячейке воспламенения и вопрос возможного перехода горения водорода в детонацию. Рассматриваются приведенные в литературе критерии ускорения пламени и перехода горения в детонацию. Рассматриваются процессы перехода горения от ячейки к ячейке с целью выявления режима ускорения пламени.

Для дальнейших исследований были сформулированы требования и выбраны ситуации, которые необходимо смоделировать на экспериментальных стендах. Составлена задача для расчета химических превращений в нестационарных условиях на программном комплексе «ЭРА».

ABOUT DEFLAGRATION AND DETONATION MECHANISM OF HYDROGEN-AIR-VAPOR MIXTURES

O.V. Shultz, V.A. Simonenko

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

In this work mechanism of ignition formation and possible modes of combustion of hydrogen-air-vapor mixtures in homogeneous and non-homogeneous conditions was observed. Possibility of initiation of chain and chain-thermal explosion of hydrogen in the conditions of severe accidents in nuclear power plants with a VVER-reactor was considered. Based on data of mechanism and kinetics of elementary stages of hydrogen oxidation reaction the model for the description chemical kinetics was made. This model takes into account molecular diffusion and thermal emission.

Also by data about the mechanism and chemical kinetics of elementary stages of hydrogen oxidation process the steady criterion of possibility of avalanche course of chain hydrogen oxidation reaction was made. According to this criterion hydrogen ignition limits was calculated. Data about limits of hydrogen chain oxidation was generalized for a case of change of pressure, temperature and mixture composition. Rated data was compared with available experiments results.

For an estimation of parameters of system at jet processes which can arise in the conditions of severe accidents in nuclear power plants one-dimensional gas-dynamic calculations by means of a program complex «Volna» was spent. Data received as a result of gas-dynamic calculations was checked up according to steady criterion and, depending on their conformity or discrepancy to the criterion, conclusion became, whether chain explosion initiation of hydrogen-air-vapor mixtures given composition in the conditions created by jet process is possible.

In this work the processes occurring in ignition cell and possibility of hydrogen deflagration to detonation transition was also discussed. The flame acceleration criteria and deflagration to detonation transition criteria referenced in literature was considered. For the purpose of flame acceleration revealing processes of cell to cell combustion transition was considered.

For the further researches requirements was formulated and situations which are necessary for simulating at experimental stands was chosen. The sum for chemical reactions calculations in non-steady conditions on a program complex of «Era» was made.

5-6

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСШИРЕННОГО РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ С ПОМОЩЬЮ КОМПЛЕКСА АТЭК

И.Р. Макеева, И.А. Доровских

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: i.r.makeyeva@vniitf.ru

В настоящее время рассматриваются различные программы развития ядерной энергетики (ЯЭ), что обусловлено целым рядом факторов: приближающимся исчерпанием запасов нефти и газа [1], а также вредным воздействием продуктов сгорания на экологию. Однако, экстенсивный способ развития ЯЭ, основанный на реакторах на тепловых нейтронах, использующих ^{235}U , приблизится к исчерпанию своих ресурсов примерно в те же сроки, что и энергетика на нефти и газе. Долгосрочное развитие ядерной энергетики возможно при включении в энергопроизводство более обильных «сырьевых, воспроизводящих» ядер урана – ^{238}U и/или ^{232}Th и использовании их в реакторах на быстрых нейтронах, что требует решения ряда технологических проблем. Все они направлены на разработку новых технологий и создание новых производств. Условно эти технологии можно разделить на две части – обеспечение программы развития и решение проблем, накопленных на предыдущих этапах развития ядерной энергетики, в первую очередь, это касается переработки накопленного отработавшего топлива с целью извлечения содержащихся в нем делящихся материалов (регенерированного урана и плутония). При этом обязательным является переходный период, в течение которого ввод и начальная стадия эксплуатации РБН будет обеспечиваться плутонием, рециклированным при переработке ОЯТ тепловых реакторов. На стадии переходного периода необходимо согласование темпов ввода тепловых и быстрых реакторов, мощностей по переработке ОЯТ и фабрикации топлива, выбор наиболее оптимальных технологических решений. В течение этого времени должны быть созданы и доведены до промышленного уровня технологии переработки «горячего» ОЯТ и изготовления ядерного топлива из высокоактивных рециклированных материалов. Это требует привлечения громадных материальных и экономических ресурсов, проведения многоплановых исследований, выполнения длительных трудоемких работ. При этом цена возможных ошибок оказывается высокой. Выбор наилучших путей развития, оптимальных технологических и организационных решений должен осуществляться с использованием многоплановых критериев.

Наиболее надежные возможности для таких оценок предоставляют средства математического моделирования. В РФЯЦ–ВНИИТФ в кооперации со специалистами десяти центров отрасли с 2008 г. разрабатывается программный комплекс (ПК) АТЭК (АТомный Энерго-промышленный Комплекс).

В докладе рассматриваются возможные сценарии развития ЯЭ на переходном этапе и анализируются

результаты моделирования различных вариантов организации топливного цикла с точки зрения обеспечения необходимыми ресурсами, технологиями и интегральными экономическими показателями.

Литература

1. Велихов Е.П., Гагаринский А.Ю., Субботин С.А. Цибульский, В.Ф. Эволюция энергетики в XXI веке. – М.: ИздАТ, 2008.

STUDY OF EXPANDED DEVELOPMENT OF NUCLEAR POWER ENGINEERING USING ATEK CODE

I.R. Makeyeva, I.A. Dorovskikh

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

E-mail: i.r.makeyeva@vniitf.ru

Different programs of nuclear power engineering (NPE) development are currently considered that caused by the whole number of factors: closing oil and gas exhausting and harmful effects of combustion materials on environment. However extensive way of NPE development based on thermal reactors using ^{235}U will approach to resources exhausting in the same time as oil and gas power engineering. Long-term NPE development is possible if more rich «reproducing» – ^{238}U and/or ^{232}Th – nuclei are involved to energy production and are used in fast reactors. And a number of technological problems are to be solved. Those all are aimed to new technology development and new plant creation. These technologies could be referred to two parts: the development program ensuring and solving the deferred problems that was cumulated during the previous stages of NPE development, firstly the problem of spent fuel recycling in order to extract fissile materials (uranium and plutonium). At that the transition period should be when fast reactor putting into operation and the starting period of operation would be supplied by plutonium obtained from thermal reactor spent fuel. At the transition stage it is necessary to co-ordinate the input rate of thermal and fast reactors, productivity of recycling and fuel production plants and maximally optimal technological solutions. During this period the technologies of «hot» spent fuel recycling and nuclear fuel production using high active recycled materials should be developed up to industrial level. These problems require a huge amount of material and economic resources, multipronged investigations, long-term and high-efforts works. The price of possible errors is very high. The choice of the best ways of development, optimal technological and organizational solution should be done using multipronged criteria.

The most reliable opportunity for such assessments is to use the possibilities of mathematical simulation. After 2008 RFNC–VNIITF co-operating with the experts from ten scientific centers of the nuclear branch develops the code ATEK for such type of simulations.

The probable scenarios of NPE development during the transition stage are considered in the paper, the results of various types of nuclear cycle simulation are analyzed from the point of resource, technology ensuring and integral economic characteristics.

References

1. Velikhov E.P., Gagarinsky A.Yu., Subbotin S.A., Tsubul'sky V.F. Evolution of Energy Production during XXIth Century. – M.: Izdat, 2008.

requirements enhance. The paper describes the state of the art in the field and some calculations which were done to test interaction between different components of the package under development.

5-7

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАСЧЕТА КАМПАНИИ РЕАКТОРА

Д.Г. Модестов

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: d.g.modestov@vniitf.ru

Одной из задач, возникающих во время проектирования энергетического реактора, является моделирование кампании последнего. Решение этой задачи требует рассмотрения различных факторов, таких например как учет выгорания топлива и шлакования реактора, определения нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик в каждый момент времени, работы органов регулирования, осуществления частичных перегрузок топлива. Соответственно математическая модель, предназначенная для решения рассматриваемой задачи, должна включать самосогласованный учет всех этих факторов.

В настоящее время, во ВНИИТФ, ведутся работы по созданию программного комплекса, в качестве одной из функций которого предполагается расчет реакторной кампании. При этом упор делается на возможность проведения прецизионных расчетов, необходимость в которых возрастает с уменьшением экспериментальной составляющей при проектировании и увеличением требований безопасности. В докладе представлено современное состояние работ, а также результаты некоторых расчетов, предназначенных для тестирования взаимодействия различных компонент комплекса.

DEVELOPMENT OF A CODE PACKAGE FOR REACTOR CAMPAIGN CALCULATIONS

D.G. Modestov

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

E-mail: d.g.modestov@vniitf.ru

Power reactor design includes such a problem as reactor campaign simulation which requires consideration of many different factors, e.g. fuel burnout and reactor slugging, criticality and thermo-hydraulic characteristics at every instant of time, control system operation, or partial reloading. Accordingly, the mathematical model to be used for the problem needs to account for these factors in a self-consistent manner.

VNIITF scientists are developing a code package for reactor calculations and campaign simulation will be one of its functions. Special emphasis is put on precision calculations which get increasingly important as experimental work in reactor design shrinks and safety

5-8

РАЗРАБОТКА БЕТА-ЭМИССИОННЫХ ДАТЧИКОВ ПАРСОДЕРЖАНИЯ, ПЛОТНОСТИ, УРОВНЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ДЛЯ ЯЭУ

С.И. Александров, А.А. Большов,
А.В. Корниенко, И.В. Новиков, В.В. Постников,
Г.В. Юркин, В.А. Ямпольский

ОАО «НИКИЭТ им. Н.А. Доллежаля», Москва, Россия

В докладе рассматриваются бета-эмиссионные датчик паросодержания, плотности (ДПС), уровня теплоносителя (ДУ). ДПС и ДУ основаны на регистрации ослабления бета-излучения, проходящего через слой теплоносителя. В качестве эмиттера бета-излучения используется материал, содержащий стронций-90, а в качестве детектора – кабель с магнезиальной изоляцией (MgO).

На макетах ДУ и ДПС были получены зависимости сигналов ДПС от средней плотности воды и воздуха (пара). При испытаниях ДУ на теплотехническом стенде с параметрами рабочего тела, характерными для ядерной энергетической установки (ЯЭУ) были получены линейные зависимости сигналов от уровня воды.

Отмечается, что одним из основных достоинств ДПС и ДУ является их безынерционность и малые габариты. ДУ может работать в любой точке корпуса или контура ЯЭУ, а его сигнал может использоваться в аварийной защите ЯЭУ.

DEVELOPMENT OF BETA-EMISSION DETECTORS FOR MEASURING COOLANT VOID FRACTION, DENSITY AND LEVEL IN NUCLEAR POWER FACILITY

S.I. Alexandrov, A.A. Bolshov,
A.V. Kornienko, I.V. Novikov, V.V. Postnikov,
G.V. Yurkin, V.A. Yampolsky

N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power
Engineering (NIKIET)

The paper considers beta-emission detectors for measuring coolant void fraction (to be referred hereinafter as VFD) and level (to be referred hereinafter as CLD). The mechanism of these detectors operation is to record attenuation of beta-radiation which goes through a layer of coolant. A material containing ^{90}Sr is used as beta-emitter, magnesia-insulated cable (MgO) is used as detector.

VFD current signal vs average air-water mixture (steam) density relations were obtained on VFD mockups using pellet-shaped and cylinder-shaped beta-emitters. Density of air-water mixture was changed by supplying air into VFD sensitive volume, which had originally been filled with water.

Signal-water level relations were obtained in testing of CLD mockups on thermal engineering test bed. Working fluid had parameters characteristic of those of nuclear power facility (i.e. pressure above 15 MPa, and temperature above 300 °C). It has been demonstrated that CLD signal was changed in a near-linear fashion with changing coolant level.

For VFD, if air-water mixture densities are less than 1g/cm^3 than experimental relation of VFD signals and air-water mixture density is between two curves, where one curve is linear and the other one was calculated for homogeneous steam-water mixture.

Lack of inertia and small dimensions are considered to be one of VFD and CLD advantages. In addition, CLD can operate in any point of vessel or circuit of the nuclear power facility, and its signal can be used by scram system of the facility.

It has been noted that use of developed CLD and VFD will additionally allow:

- reliable information on changes in coolant level and density to be obtained in transient and emergency conditions of facility operation;
- thermal hydraulic computation codes, which will be used for analyzing safety of nuclear power facility, to be verified;
- CLD and VFD based on other physical principles to be re-calibrated in alternative way.

5-9

НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ВЫГОРАНИЯ ОТВС РЕАКТОРОВ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ

О.В. Анфалова¹, В.Г. Казеев¹, В.С. Краев¹,
С.И. Стрельцов¹, Д.В. Хмельницкий¹,
А.В. Терёхин², Ю.И. Чернухин²

¹Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²Снежинский физико-технический институт – НИЯУ МИФИ,
Снежинск, Россия

Целью работы является расчетное обоснование технического предложения на разработку нейтронно-активационного метода приборного контроля фактического выгорания ОЯТ реакторов ВВЭР-1000 и содержания в нем изотопов плутония. Предлагаемая методика основана на активации водного раствора сернокислого марганца под воздействием нейтронного излучения ОТВС при размещении их в специализированном, тонкостенном, диагностическом контейнере (ДК), позволяющем проводить нейтронные измерения с ОТВС непосредственно в бассейнах их выдержки (БВ) на АЭС, и последующем гамма-спектрометрическом анализе активированного раствора [1].

Проведенные расчеты показали, что предлагаемая постановка измерений характеризуется слабой зависимостью результатов от температуры окружающей среды, от концентрации борной кислоты в БВ, от уровня выгорания ОЯТ и его пространственного распределе-

ния в активной зоне ОТВС: при изменении указанных характеристик в широком эксплуатационном диапазоне чувствительность методики изменяется в довольно узких пределах $\sim(2-3)\%$, а ее абсолютное значение гарантирует достижение высокой точности измерений интенсивности нейтронного излучения ОТВС при выгорании топлива $\sim(15-70)$ МВт·сут/кг U.

С учетом этих факторов, рассмотренной в работе возможности проведения процедур калибровки основных характеристик измерительной установки, а также практически полного отсутствия чувствительности их к сильному гамма-фону ОТВС ожидаемая погрешность измерений интенсивности нейтронного излучения ОТВС в БВ нейтронно-активационным методом оценивается величиной $\sigma_n \sim (3-4)\%$, что существенно лучше, чем у применяемых в настоящее время других нейтронных методик контроля выгорания ОЯТ.

Полученная оценка σ_n делает предлагаемую методику перспективной для решения одной из важных задач обеспечения гарантий МАГАТЭ по нераспространению ядерных материалов – задачи раздельного дистанционного определения содержания изотопов плутония $^{239-242}\text{Pu}$ в ОТВС с точностью $\sigma_{\text{Pu}} \approx 1\%$.

Литература

1. Чернухин Ю.И., Терехин В.А. и др. Нейтронный метод контроля содержания изотопов плутония в ОТВС энергетических реакторов. Препринт № 171. Снежинск: изд-во ВНИИТФ, 2000.

NEUTRON-ACTIVATION METHOD TO CONTROL BURNUP OF THERMAL REACTOR FUEL ASSEMBLIES

O.V. Anfalova¹, V.G. Kazeev¹, V.S. Kraev¹, S.I. Streltsov¹,
D.V. Khmel'nitsky¹, A.V. Terekhin², Yu.I. Chernukhin²

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

²Physics Engineering Institute – Research Nuclear University
«MEPhI», Snezhinsk, Russia

This effort goal is numerical validation of the technical proposal to develop the neutron-activation method that ensures instrumental control both over actual burn-up of spent fuel from VVER-1000 reactors and over the plutonium isotopes content in this spent fuel. The proposed technique is based on the activation of the manganic sulphate water solution subjected to neutron irradiation from fuel assemblies when they are located in a special thin-walled diagnostic container that allows both neutron measurements with fuel assemblies directly in their cooling ponds at APP and the follow-on gamma-spectrometric analysis of the activated solution [1].

Our calculations demonstrated the proposed arrangement of measurements to ensure weak dependence of measurement results on ambient temperature, boric acid concentration in cooling ponds, as well as on the level of spent fuel burn-up and its spatial distribution in the fuel assembly core: variation of the above characteristics in a wide operational range makes the technique sensitivity change within a narrow limit $\sim(2-3)\%$ and the absolute value of this sensitivity guarantees high-accuracy measurements of neutron

radiation intensity from fuel assemblies when fuel burn-up is $\sim(15-70)$ MW·24 hours/kg U.

Considering the above factors and the described capability to perform calibration of the measurement system principal characteristics, as well as seriously high insensitivity of this system to strong gamma-background of fuel assemblies, the expected error of the neutron-activation method used to measure intensity of neutron radiation of fuel assemblies in cooling ponds is estimated to be $\sigma_n \sim (3-4)\%$. This turns to be seriously better compared to other neutron techniques currently used to monitor spent fuel burn-up.

Our estimate σ_n makes the proposed technique promising for achieving the very critical objective of nuclear materials nonproliferation IAEA safeguards, i. e. independent (separate) stand-off determination of $^{239-242}\text{Pu}$ isotopes content in fuel assemblies with accuracy $\sigma_n \text{Pu} \approx 1\%$.

Reference

1. Yu.I. Chernukhin, V.A. Terekhin et al. Neutron method to monitor plutonium isotopes content in fuel assemblies of power reactors. Preprint No.171. Snezhinsk: published by VNIITF, 2000.

5-10

ВЫГОДНАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ОКСИДОВ ОБЕДНЕННОГО УРАНА

Т.В. Казаковская, В.И. Шаповалов, С.Г. Ермичев,
В.З. Матвеев, Э.Ю. Горячев, А.М. Горелов

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

Введение

Выполнение программ, связанных с получением обогащенного урана, для применения ядерной энергии в военных и коммерческих целях привело к накоплению в мире огромного количества обедненного урана с содержанием 0,25–0,35 % масс. ^{235}U . Так, например, при прохождении одного топливного цикла в реакторе, работающем на легкой воде, наблюдаются два вида отходов: отработанное ядерное топливо (ОЯТ) и обедненный уран (ОУ). В качестве топлива в реакторах используют низкообогащенный уран с содержанием ^{235}U в ^{238}U от 3 до 5 %. Естественный уран (0,7% ^{235}U в ^{238}U) разделяется на низкообогащенный уран (3–5% ^{235}U), который используют в качестве ядерного топлива и обедненный уран (ОУ), который содержит от 0,2 до 0,4 масс.% ^{235}U . При производстве 1 тонны низкообогащенного ядерного топлива для реактора образуется от 5 до 7 тонн низкообогащенного урана.

Обедненный уран находится в основном в виде высокотоксичного гексафторида (DUF_6), хранящегося в стальных емкостях на поверхности земли. Очевидна целесообразность перевода DUF_6 в более стабильные соединения, например, оксиды. Во всем мире в настоящее время накоплено около $1,2 \cdot 10^6$ тонн оксидов ОУ, основные запасы которого находятся в США и России.

Пути разработки способов утилизации этих отходов следующие:

– Безопасное размещение. ОУ является долгоживущим, химически токсичным радиоактивным

(300–500 нКи/г) материалом. Размещение ОУ в хранилищах достаточно безопасно. ОУ может храниться вместе с отработанным ядерным топливом, т. к. геохимическое поведение всех изотопов урана идентично;

– Хранилища с улучшенными характеристиками. Использование ОУ в геологических хранилищах может улучшить характеристики хранилища [3], уменьшая вероятность высвобождения радионуклидов из ОЯТ в упаковках;

– Долговременная стратегия. В настоящее время ресурсы урана достаточны, чтобы удовлетворить все потребности. Однако в будущем, возможно, возникнет необходимость перерабатывать ОЯТ и ОУ для получения ядерного топлива. Применение обедненного урана в упаковках для отходов ОЯТ даст возможность безопасно сохранить оба материала для будущих поколений до нужного периода времени, когда потребуется их извлечение и переработка.

Пути выгодного использования обедненного урана

Важной проблемой является поиск путей выгодного использования (утилизации) оксидов обедненного урана.

Один из таких путей – использование диоксида ОУ в качестве материала для создания защитного техногенно-геохимического барьера при размещении РАО и ОЯТ в геологических горизонтах. Планируется использовать диоксид обедненного урана в качестве компонента радиационной защиты и природного поглотителя-сорбента радиоактивных продуктов, которые могут выделяться из контейнеров с ОЯТ при хранении их в подземных хранилищах в течение сотен тысяч лет (Проект Yucca Mountain [1]). При захоронении контейнеров с ОЯТ и диоксидом ОУ, заполняющим технологические пустоты контейнеров, основным природным фактором, определяющим разгерметизацию контейнеров и миграцию радиоактивных продуктов ОЯТ, является взаимодействие материала контейнера, ОЯТ и диоксида обедненного урана с подземными водами. Потенциально одним из важнейших видов использования обедненного урана является то, что диоксид обедненного урана представляет собой дополнительный барьер в подземном хранилище. Если оксиды ОУ существенно замедляют перенос радионуклидов и продуктов распада, особенно ^{237}Np и ^{99}Tc , в биосферу, это значительно повысит безопасность хранилища [2].

Кроме того, многообещающим является путь изготовления упаковок для отходов для ОЯТ на основе обедненного диоксида урана. Это позволит:

1. снизить утечку радионуклидов из упаковки;
2. уменьшить вероятность аварийных ситуаций в ядерных хранилищах;
3. обеспечить радиационную защиту;
4. разработать способ полноценного использования обедненного урана.

Диоксид ОУ включают в состав упаковки в качестве:

- сыпучего связующего для заполнения пор внутри упаковки;
 - компонента металлокерамики диоксид ОУ-сталь, которая заменяет стальные составляющие упаковки.
- В зависимости от конструкции, количество диоксида

ОУ в упаковке в 3–8 раз больше, чем количество его количество в ОЯТ. Большинство радионуклидов в ОЯТ продолжают находиться в связанном состоянии до тех пор, пока не исчезнет кристаллическая структура диоксида ОУ. Дополнительный диоксид ОУ, окружающий ОЯТ, замедляет расщепление диоксида ОУ, находящегося внутри. В этом случае механизм процесса напоминает механизм замедления расщепления руды естественного урана, которая также содержит диоксид ОУ.

Для размещения ОУ в пространстве около хранилища предпочтительнее использование именно диоксида ОУ, т. к. именно в этом виде обедненный уран находится в ОЯТ.

Диоксид ОУ может быть использован для заполнения свободного порового пространства в упаковке, включая охлаждающие каналы для использованного ядерного топлива[3].

Еще одной идеей решения важной экологической задачи по утилизации диоксида ОУ является использование его в качестве заполнителя специального бетона. Этот специальный бетон может использоваться как конструкционный и защитный материал в металлобетонных контейнерах для транспортирования и хранения ОЯТ и высоко радиоактивных отходов[3].

Новый вид бетона состоит из керамики на основе диоксида ОУ (DUAGG), которая заменяет традиционный заполнитель, применяемый в стандартном бетоне. Затем DUAGG смешивается вместе с поргланцементом, песком и водой в таких же пропорциях, как и обычного бетона. Данная матрица, называемая DUCRETE, содержит как вещества, состоящие из тяжелых элементов (для ослабления γ -излучения), так и вещества с малым атомным номером, для ослабления нейтронов.

DUAGG имеет очень высокую плотность ($\rho \sim 10$ г/см³). По этой причине ожидаемая теоретическая плотность DUCRETE может превысить 7 г/см³. Это на ~70% больше реально достигнутой плотности специальных бетонов, применяемых в металлобетонных контейнерах.

Более эффективные защитные характеристики нового материала дают возможность использовать меньшую толщину защиты в контейнерах для ОЯТ, что приведет к уменьшению габаритов (в ~1,5 раза) и массы (на ~35 тонн). Уменьшение размеров и снижение массы позволит перевозить контейнеры нового поколения железнодорожным транспортом. Контейнеры на основе DUCRETE имеют более высокую теплоемкость нагрузки из-за уменьшенной толщины стенки.

Заключение

После событий 11 сентября 2001 года существует необходимость в более прочных контейнерах для предотвращения террористических актов и снижения угроз распространения на ядерных предприятиях, на которых осуществляется переход от хранения в бассейне к сухому хранению. Например, потеря воды в резервуаре вызовет уменьшение охлаждения ОЯТ, что в некоторых случаях может привести к катастрофе. В идеале, все ОЯТ, находящееся на хранении в резервуарах, для большей безопасности должно храниться в контейнерах для сухого хранения ОЯТ. Кроме того, что касается ядерного распространения, осуществлять мониторинг

32 ОЯТ сборок в одном контейнере проще и безопаснее, чем мониторинг каждой сборки в отдельности.

Рынок контейнеров для сухого хранения ОЯТ возрастет до 150 контейнеров в год только в США, мировой же рынок превысит данный показатель в три раза. России требуется 220 контейнеров для перевозки и 2500 для хранения. Использование диоксида ОУ в качестве заполнителя бетона позволит практически полностью потребить весь запас избыточного обедненного урана, накопленного в США и России.

Таким образом, применение накопленного диоксида урана для вышеуказанных целей позволит выгодно утилизировать накопленные огромные запасы обедненного урана и существенно повысить безопасность хранения ядерных отходов.

Литература

1. Scientific and Technical Priorities at Yucca Mountain, EPRI Report No. 1003335, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, December 2003.
2. T. V. Kazakovskaya et al., «Sorption of Long-Lived Radioisotopes in Geological Repository Underground Waters by Depleted Uranium Oxides», 10th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, Glasgow, Scotli, September 4–8, 2005.
3. Background, Status, and Issues Related to the Regulation of SNF Facilities. ACNW&M White Paper. Advisory Committee on Nuclear Waste and Materials. June 2008.

BENEFICIAL UTILIZATION OF DEPLETED URANIUM OXIDES

T.V. Kazakovskaya, V.I. Shapovalov, S.G. Ermichev,
V.Z. Matveev, E.Yu. Goryachev, A.M. Gorelov

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

Introduction

The execution of the programs dealing with uranium enrichment for military and commercial purposes has led to the formation of enormous quantities of the depleted uranium (with ²³⁵U content equal to 0.25–0.35 wt%). For example one fuel cycle in light-water reactor (LWR) gives two kinds of wastes: spent nuclear fuel (SNF) and depleted uranium (DU). Natural uranium (0.7% ²³⁵U in ²³⁸U) is separated to low-enriched (depleted) uranium (3–5% ²³⁵U), which is used as reactor fuel and DU, containing 0.2–0.4 wt% of ²³⁵U. Fabrication of 1 ton of low-enriched nuclear fuel provides 5–7 tons of depleted uranium.

As a rule, depleted uranium is accumulated in the form of high-toxic uranium hexafluoride (UF₆), which is stored in steel cylinders near power stations. It is expedient to convert the UF₆ to stable compounds, such as uranium oxides. Currently more than $1.2 \cdot 10^6$ tons of DU oxides are accumulated in the world, the main DU stocks are situated in the USA and Russia.

At present the following ways of waste utilization are being developed:

- Safety disposal. DU is a long-lived chemically toxic radioactive (300–500 nC/g) material. Nevertheless the DU disposal in the repositories is considerably safe. DU could be stored with SNF because geochemical behavior of all uranium isotopes is identical.

- Repositories with improved characteristics. DU use in design of the geological repositories could significantly improve the repository characteristics, decreasing the possibility of radionuclides release from SNF packages.
- Long-term strategy. At present time uranium resources are sufficient to meet all the needs. Nevertheless at some future day a necessity of SNF and DU conversion (to get nuclear fuel) could arise. The use of DU in SNF waste packages will give an opportunity for safe preservation of the both materials for future generations, when recovery and conversion of these products need.

Ways of beneficial use of depleted uranium

The ways of the beneficial use of depleted uranium oxides are the key problem.

One of these ways is the use of DU dioxide as a material for protective geochemical barrier when radioactive wastes are disposed in geological horizons. The DU oxides can be used both as a component of radiation shielding and as a natural absorbent of radioactive products which can release from SNF casks at their storage in underground repository during hundreds of thousand years (for example, Yucca Mountain Project [1]). Interaction of cask material, SNF and depleted uranium dioxide with underground waters is the main natural factor, defining failure of cask and migration of radioactive products of SNF while burial of casks with SNF and DUO_2 which fills up technological void spaces in casks.

A potentially important use of DU oxides is to provide an additional engineered chemical barrier in the underground repository. If the DU oxides can be shown to substantially inhibit transport of important actinide elements and fission products, especially ^{237}Np and ^{99}Tc , out of the repository, then that would be a significant contribution to the repository safety [2].

Besides the very promising way of beneficial DU use is the producing of SNF waste casks using material based on depleted uranium. It allows to

1. decrease the radionuclide release from casks;
2. put down the possibility of emergencies in nuclear repositories;
3. provide radiation shielding;
4. develop methods of complete use of depleted uranium.

DU oxides can be used in the waste packages as

- a granular binding to fill pores inside the package;
- a component of cermet (DU dioxide-steel), that replaces steel elements in waste package

Subject to package design the quantity of DU oxide in waste package is 3–8 higher than in SNF. The major radionuclides in SNF are bound-stated till crystalline structure of DUO_2 exists. The additional granular DU dioxide surrounding SNF decrease fission of inside DUO_2 . In this case the process is similar to the delay mechanism of natural uranium ore that contains DU dioxide too.

Just dioxide of DU is preferable to use for placing near repositories because SNF contains DU in the form of dioxide.

DUO_2 could be used to fill free space in a waste package, including cooling channels for SNF [3].

One more promising idea of DU utilization is to use DUO_2 as an aggregate of special concrete. Such special concrete may serve as construction and shielding material

in casks for transportation and storage of SNF and high level wastes (HLW).

The new kind of concrete consists from ceramics based on DU dioxide (DUAGG), which replaces traditional aggregate of standard concrete. Then DUAGG is mixed with Portland cement, sand and water as during fabrication of ordinary concrete. Such matrix named DUCRETE includes compositions both with heavy elements (to attenuate γ -radiation), and with light elements to decrease neutron radiation.

DUAGG density is considerably high ($\rho \sim 10 \text{ g/sm}^3$). That is why the theoretical density of DUCRETE could exceed 7 g/sm^3 . It is ~ 1.7 higher than density of special concretes used at present for cask production.

More effective shielding characteristics allow using thinner shielding layer in SNF casks. It must lead to decrease of cask dimensions (more than 1.5 times) and cask weight (up to 35 tons). Minimizing of cask dimensions and weight allow transportation of new generation casks by railways. Moreover thermal capacity of casks built of DUCRETE is higher because of a thinner wall.

Conclusion

After accidents on September 11, 2001 the need in more reliable and durable SNF casks arose to prevent acts of terrorism and proliferation of nuclear threats at nuclear plants where SNF wet storage in pools is converted to dry mode. It is clear that lack of water in reservoir may cause heating of SNF that is very dangerous. The case when all SNF stored in pools are placed into additional cask for dry storage is an ideal one. Besides the monitoring process of 32 SNF assemblies is more simple and safe than the monitoring of every assembly apart.

The US market of casks for SNF dry storage will increase to 150 casks per year, the world market will 3 times exceed this quantity). Russia needs 220 transport casks and 2500 storage casks.

So, the use of depleted uranium in materials of cask design and geochemical barrier leads to DU beneficial utilizing and consumption of practically all depleted uranium stocks accumulated in the USA and Russia and raise the repositories safety.

References

1. Scientific and Technical Priorities at Yucca Mountain, EPRI Report No. 1003335, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, December 2003.
2. Kazakovskaya T.V. et al., Sorption of Long-Lived Radioisotopes in Geological Repository Underground Waters by Depleted Uranium Oxides, 10th International Conference on Environmental Remediation и Radioactive Waste Management, Glasgow, Scotland, September 4–8, 2005.
3. Background, Status, and Issues Related to the Regulation O SNF Facilities. ACNW&M White Paper. Advisory Committee on Nuclear Waste and Materials. June 2008.

5-11

О ЯДЕРНОМ ТОПЛИВНОМ ЦИКЛЕ РЕАКТОРОВ ТИПА БРЕСТ

И.А. Волков, В.А. Симоненко

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Перспективы развития быстрых реакторов, в том числе и реакторов типа БРЕСТ, зависят от реализации замыкания топливного цикла. Особенность реакторов типа БРЕСТ, в первую очередь, связана с тем, что при небольшом коэффициенте воспроизводства, предлагаемом авторами проекта, уже на начальной стадии реализации проекта предлагается, параллельно с исследованием физики реактора, осуществить экспериментальную проверку технологии переработки ОЯТ и технологии производства топлива из продуктов переработки в непосредственной близости к реактору, т. е. организовать пристанционный ядерный топливный цикл. Для исследования этой возможности выполняется комплекс работ по описанию процессов выгорания топлива в активной зоне реактора, эволюции состава при выдержке выгруженных ТВС, моделированию технологий переработки ОЯТ и производства топлива из регенерированного сырья. Основной целью было создание представительного, и в тоже время простого описания процессов в активной зоне реактора, которое позволяет оценивать составы делящихся материалов, включая изотопы минорных актинидов, а также различных изотопов продуктов деления, которые могут попасть в состав свежеизготавливаемого ядерного топлива. В настоящее время разрабатываются отдельные звенья моделей, описывающих представленные технологии. В докладе представлены результаты работы по моделированию изготовления свежего топлива из горячих продуктов переработки ОЯТ, расчетов выгорания топлива в тепловыделяющей сборке и их анализ, анализ выхода топливного цикла реактора БРЕСТ на стационарный режим.

ON THE NUCLEAR FUEL CYCLE OF BREST REACTORS

I.A. Volkov, V.A. Simonenko

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

Closed fuel cycle is a precondition for further development of fast reactors and particularly BREST reactors. Specific feature of BREST reactors is that despite a low conversion ratio, the authors of this project propose already at the initial stage to study the reactor physics and also to experimentally test both the technology for spent fuel reprocessing and the technology that uses products of this reprocessing for nuclear fuel production in the close vicinity of a reactor, i.e. to organize the near-station nuclear fuel cycle. The scope of research effort intended to study the above feasibility includes: description of the fuel burn-up processes in the reactor core; description of composition evolution during cooling of the unloaded fuel assemblies;

simulation of both the spent fuel reprocessing technology and the technology that uses the regenerated material for nuclear fuel production. The main objective was to have a representative though simple description of processes in the reactor core, which allows estimation of both the composition of fissile materials including isotopes of minor actinides, and the composition of different fission isotopes that can be found in the fresh nuclear fuel. Developing certain elements of models that describe the above technologies is currently underway. Fresh fuel production out of hot spent-fuel-reprocessing products was simulated, fuel burn-up in the fuel assembly was calculated and analyzed, as well as conditions for the fuel cycle of the BREST reactor to attain the steady-state operation mode were analyzed. Results of these investigations are presented.

5-12

ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЗАМЫКАНИЯ ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА РЕАКТОРОВ ТИПА БН

Н.Д. Дырда, Д.Г. Модестов

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: n.d.dyrda@vniitf.ru

Приведены результаты работы по исследованию потока нуклидов при различных режимах топливной кампании быстрых реакторов. В работе рассматривается расчет кампании реактора БН-600.

С помощью программных комплексов ПРИЗМА и РИСК, разработанных в РФЯЦ-ВНИИТФ, рассчитаны параметры реакторной установки БН-600 с использованием различных приближений при моделировании активной зоны.

Приведены результаты расчета кампании реактора в выделенной ячейке активной зоны, в гомогенном приближении активной зоны и трехмерный расчет нейтронно-физических характеристик реактора.

Рассчитана эволюция нуклидного состава в топливной ячейке с заданным нейтронным потоком. Аналогичный расчет выполнен в приближении гомогенной активной зоны с учетом различного обогащения топлива по активной зоне

Трехмерный расчет параметров реакторной установки БН-600 включает в себя расчет плотности нейтронного потока и КЭФФ для свежей активной зоны и расчет эволюции нуклидного состава топлива в активной зоне.

Проведен анализ влияния различных постановок задачи на полученные результаты. Полученные результаты хорошо согласуются с расчетами, проведенными по программному комплексу ГЕФЕСТ, разработанному в ИБРАЭ РАН. Результаты расчета используются в качестве начальных данных для моделирования замыкания топливного цикла быстрых реакторов.

APPROACHES TO MODELING OF CLOTHING THE FUEL CYCLE OF THE BN REACTORS

N.D. Dyrda, D.G. Modestov

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

E-mail: n.d.dyrda@vniitf.ru

In this paper the results of research work on the flow of nuclides in different modes of fuel campaign mode of fast reactors are given. The calculation of the campaign of the BN-600 reactor is considered.

With the help of the PRISMA and RISK software systems, developed by VNIITF, the parameters of the BN-600 reactor are calculated with the help of various approximations in modeling the core. The results of calculation of the campaign in the selected cell of the reactor core, in a homogeneous approximation of the core, and three-dimensional calculations of neutron-physical characteristics of the reactor are given.

Evolution of the nuclide composition of the fuel cell with a neutron flux given is calculated. A similar calculation is made in the approximation of the homogeneous core in view of fuel enrichment of different kind in the core.

The three-dimensional calculation of the parameters of the BN-600 reactor includes the calculation of the neutron flux and the KEFF for the new loaded core and the calculation of the evolution of the nuclide composition of the fuel in the core.

The effect of different formulation of the problem on the results is obtained. These results are in good agreement with the calculations carried out by the GEFEST software systems developed by IBRAE RAS. The calculation results are used as the initial data for simulation closure of fuel cycle of fast reactors.

В комплексе реализованы информационные модели объектов ядерной отрасли. Основным объектом моделирования является технологический процесс, который описывается типовым набором характеристик (параметров объекта). Технологические процессы реализуются на типовых производствах, которые имеют свои проектные характеристики, описывающие эксплуатационные свойства, сроки строительства, эксплуатации и вывода из эксплуатации, капитальные затраты на обеспечение производства, кадровое обеспечение и т. п. Комплекс АТЭК позволяет моделировать задачи атомной отрасли с различной степенью детализации от укрупнённого описания всей последовательности технологических переделов (или всего производства, предприятия) до поаппаратного описания работы выделенной технологии.

В расчете могут участвовать как реально существующие предприятия, так и виртуальные предприятия, добавляемые в расчетную схему в случае выявления недостающих производственных мощностей.

Среди всех параметров объектов выделяется некоторое подмножество, значения которых могут быть изменены в зависимости от варианта сценария исследуемой задачи в предметной области. Варьирование этих параметров позволяет произвести выбор оптимальных технико-экономических показателей ключевых объектов, обеспечивающих безопасное и эффективное развитие ядерной энергетики.

Эффективность моделирования, помимо заложенных алгоритмов, в значительной степени определяется полнотой и качеством данных, используемых в расчетах. В комплексе АТЭК используется большое количество разнообразных и разнородных данных, которые хранятся в специально разработанных структурированных базах данных (СБД). Информация об объектах поступает из разных источников, часть из них носит справочный или исторический характер, другие непосредственно используются в программном комплексе при моделировании.

В докладе представлены организация данных комплекса, его информационное наполнение, в зависимости от типа решаемых задач, технико-экономические характеристики объектов атомной энергетики рассматриваемых в комплексе.

REPRESENTATION OF A NUCLEAR POWER COMPLEX OBJECTS IN INFORMATION MODELS OF SOFTWARE CODE ATEK

O.V. Verbitskaya, L.N. Darina, I.A. Dorovskikh,
V.G. Dubosarskiy, I.R. Makeeva, S.V. Pchelintseva,
I.J. Silantjeva, V.A. Simonenko, V.P. Sokolov

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

E-mail: o.v.verbitskaya@vniitf.ru

Software code ATEK created in RFNC–VNIITF is designed for solving of a various number of different tasks in the field of nuclear fuel cycle modeling (NFC). It allows to track optimal technological solutions, calculate mass flows and suits of economical characteristics for objects on all NFC technological stages, research different variants of spent fuel management in view of safety requirements.

5-13

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА В ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЯХ КОМПЛЕКСА АТЭК

О.В. Вербицкая, Л.Н. Дарина, И.А. Доровских,
В.Г. Дубосарский, И.Р. Макеева, С.В. Пчелинцева,
И.Ю. Силантьева, В.А. Симоненко, В.П. Соколов

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забахина,
Снежинск, Россия

E-mail: o.v.verbitskaya@vniitf.ru

Создаваемый в РФЯЦ–ВНИИТФ программный комплекс АТЭК предназначен для решения большого числа разнообразных задач в области моделирования технологий ядерного топливного цикла (ЯТЦ). Комплекс позволяет: находить оптимальные технологические решения, рассчитывать материальные потоки и набор экономических характеристик для объектов на всех технологических этапах ЯТЦ, исследовать различные варианты обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) с учетом требований безопасности.

Information models of objects of nuclear industry are implemented in software code. The basic modeling object is a technological process, which is described by a typical set of characteristics (objects parameters). Technological processes are implemented on the basis of typical manufactures, which have their own project characteristics, describing operational properties, period of building and dismantling, capital outlays for technological and personnel support. Software code АТЕК allows to solve problems of nuclear industry with different degree of specification, beginning from integral description of technological stage sequence to particular technology in detail.

Calculation scheme can consist of real-life and virtual enterprises. Virtual enterprises can be added in case of production capacity lack.

Among all modeling parameters a particular subset can be selected, which values can be changed depending on task scenario in object domain. By varying these parameters user can select optimal technical and economical factors of primary objects, supplying safe and effective nuclear industry development.

Modeling effectiveness, in spite of embedded algorithms, is substantially defined by completeness and quality of data used in calculations. A vast amount of various and miscellaneous data is stored in purposely developed databases and used in calculation code. Information on different objects is received from many sources, part of which is related to informative or historical type, whereas other part is directly used in modeling.

In presented report one can find data organization principles, its informative content, depending on the task type, technical and economical characteristics of NFC objects.

низмов. Оценка эффективности принимаемых технологических решений возможна только на основе критериев экономической выгоды, как в текущий момент времени, так и в долгосрочной перспективе. Описание экономических механизмов зависит от поставленной задачи, поэтому при решении конкретных задач применяются различные алгоритмы расчета основных экономических параметров. Так, в задачах моделирования ядерного топливного цикла основным показателем является стоимость реализуемой продукции АЭС и расходы, связанные с производством и реализацией продукции (ядерного топлива и энергии), а в задачах моделирования обращения с ОЯТ – оценка тарифа полного цикла обращения с ОЯТ.

В докладе рассматриваются различные экономические модели, реализованные в комплексе АТЭК, исходные и расчетные экономические параметры для различных типов задач, а также алгоритмы расчета этих параметров.

При решении практических задач среди всех рассматриваемых экономических показателей объектов моделируемой среды выделяются наиболее актуальные группы параметров:

- стоимость реализуемой продукции АЭС;
- инвестиции в строительство, модернизацию, техническое перевооружение, реконструкцию, продление ресурсного срока эксплуатации и на работы по выводу из эксплуатации АЭС и производств ЯТЦ;
- расходы, связанные с производством и реализацией продукции (ядерного топлива и энергии);
- себестоимость (цена) производимой энергии.

Применяемые экономические методики иллюстрируются примерами расчетов, проведенных по комплексу АТЭК.

5-14

ЭКОНОМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ АТЭК

С.В. Пчелинцева, О.В. Вербицкая,
Л.Н. Дарина, И.А. Доровских, И.Р. Макеева,
И.Ю. Силантьева, В.П. Соколов

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Росси

E-mail: s.v.pchelintseva@vniitf.ru

Вопросы экономики являются важной составной частью при моделировании технологических процессов ЯТЦ и отдельных производств ядерного энергетического комплекса (ЯЭК). Для их решения в комплексе АТЭК реализуются экономические модели, основанные на критериях эффективности. Методики, используемые в моделях, а также базовые и расчетные характеристики зависят от типов решаемых задач.

Ядерный энергетический комплекс (ЯЭК) является подсистемой экономики страны, поэтому полноценное описание его работы и работы его компонент с необходимостью должно учитывать не только природу и взаимосвязь технологических процессов, но и влияние экономических факторов, работу экономических меха-

ECONOMIC MODELING IN SOFTWARE CODE АТЕК

S.V. Pchelintseva, O.V. Verbitskaya, L.N. Darina,
I.A. Dorovskikh, I.R. Makeeva,
I.J. Silantieva, V.P. Sokolov

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

E-mail: s.v.pchelintseva@vniitf.ru

Economic problems research is the important component at modeling of technological processes in NFC and concrete facilities of a nuclear power system (NPS). For their solution the economic models based on criteria of efficiency are created in software code АТЕК. Basic and calculated characteristics as well as methods which are used in models depend on solving problems types.

The NPS is a subsystem of national economics, so for full description of its work we can take into account not only the entity and correlation of technological processes but also an influence of economic forces, work of economic mechanisms. An estimation of accepted technological decisions efficiency is possible only on the basis of criteria of an economic profit, both in current point of time, and in long-term outlook. The description of economic mechanisms depends on a problem put by; therefore at the decision of specific targets various algorithms of calculation

of the basic economic characteristics are applied. Thus in problems of modeling of a nuclear fuel cycle the basic factor is the cost of nuclear power plant production and the expenses during output and sales of products (nuclear fuel and energy), but in problems of SF management modeling an SF management full cycle tariff estimation is a fundamental factor.

In the report the various economic models implemented in software code АТЕК, initial and calculated economic parameters for various types of problems as well as algorithms for calculation of these parameters are considered.

Among total calculated economic characteristics the following are the most actual in practical problem solving:

- cost of nuclear power plant production;
- investments in building, modernization, technical equipment, reconstruction, prolongation of operation life and mothballing of the nuclear power-plant and NFC facilities;
- costs related to output and sales of products (nuclear fuel and energy);
- produced energy price.

Applied economic methods are illustrated by examples of the calculations.

5-15

ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ЗАВЕРШАЮЩЕЙ СТАДИИ ЯДЕРНО-ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

В.П. Соколов, О.В. Вербицкая, Л.Н. Дарина,
И.А. Доровских, В.Г. Дубосарский, И.Р. Макеева,
С.В. Пчелинцева, И.Ю. Силантьева, В.А. Симоненко

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: v.p.sokolov@vniitf.ru

Современные проблемы развития ядерной энергетики (ЯЭ) связаны с решением ряда задач. Это планы по расширенному развитию ЯЭ на базе быстрых реакторов (БР), замыкание ядерного цикла БР, включающего перерабатывающее производство и изготовление новых тепловыделяющих сборок (ТВС) из регенерированных ядерных материалов, развитие технологий переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), создание промышленной инфраструктуры окончательной изоляции (захоронения) образующихся при переработке радиоактивных отходов, а также отработку отложенных решений, связанных проблемой ядерного наследия. Любое решение, принимаемое по этим вопросам, должно приближаться к оптимальному, с соответствующим обоснованием, в том числе, и с учетом экономических факторов.

Разрабатываемый в РФЯЦ–ВНИИТФ моделирующий программный комплекс ориентирован на решение всего спектра перечисленных выше задач. Область моделирования комплекса рассматривается как очень емкая и сложная информационная система с разнородными многопараметрическими данными.

Последними разработками в комплексе АТЭК стал модуль с условным названием «ТТС», построенный на основании динамического подхода и предназначенный для создания сценариев технологических процессов, описываемых древовидными структурами. С помощью созданных средств удалось решить следующие задачи:

- сравнительный анализ экономики ЯТЦ для ТТС с переработкой и ТТС с окончательной изоляцией ОЯТ РБМК при различных сценарных вариантах с учетом принятых технических решений;
- расчет экономики переработки некондиционного ОЯТ РБМК-1000 при различных сценариях развития ТТС;
- расчет наработки и потребления урановых и плутониевых продуктов переработки ОЯТ на ОДЦ ГХК для расчета различных сценариев переработки и построения ЯТЦ.

Гибкие возможности создания модели обеспечиваются за счет использования

- динамического построения расчетной схемы;
- динамических структур данных;
- динамической генерации кода;
- динамического пользовательского интерфейса;
- интеграции с комплексом АТЭК и использования его БД.

В докладе описаны подходы, общие принципы и средства, обеспечивающие динамическое моделирование технологических процессов на завершающей стадии ядерно-топливного цикла.

DYNAMIC SIMULATION OF TECHNOLOGIES ATNUCLEAR FUEL CYCLE TERMINAL STAGE

V.P. Sokolov, O.V. Verbitskaya, L.N. Darina,
I.A. Dorovskikh, V.G. Dubosarsky, I.R. Makeeva,
S.V. Pchelintseva, I.Yu. Silantiyeva, V.A. Simonenko

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

E-mail: v.p.sokolov@vniitf.ru

Modern problems of nuclear power engineering (NPE) development are connected with solving a number of tasks. These tasks are the following: plans on expanded NPE development on the basis of fast reactors (FR), closure of FR nuclear cycle including new recycling and manufacturing fuel assemblies (FA) out of the recycled spent nuclear fuel (SNF), development of recycling technologies for SNF, creation of industrial infrastructure of terminal isolation (burial) of radioactive waste generated while recycling, and also analysis of delayed decisions connected with the problem of nuclear heritage. Any solution of these issues must approximate to optimum on corresponding basis including economic factor.

A Numerical Simulation Complex АТЕК (NSC АТЕК) was created at RFNC–VNIITF to solve the whole spectrum of the tasks listed above. The simulation area is considered as capacious and compound informational system with heterogeneous multiparametric data.

The latest development of NSC АТЕК is the package TTS built on the basis of dynamic approach and intended to create technologies scenarios described by tree-type structures. The following issues have been solved by means of this package:

- Comparative analysis of NFS economics for TTS including recycling and TTS including terminal isolation of RBMK spent nuclear fuel using different scenarios considering accepted technical solutions;
- Computation of economics of processing sub-standard SNF of RBMK-1000 using different scenarios of TTS development;
- Computation of both output and consumption of uranium and plutonium materials after processing SNF at ODC GHK for subsequent computation of different scenarios of reprocessing and NFC construction.

Flexible potentialities for model creating are provided due to

- dynamic construction of analytical model;
- dynamic data structure;
- dynamic code generation;
- dynamic user interface;
- integration with АТЕК complex and use of its database.

The report describes methods, general principles and means providing dynamic simulation of technologies at NFC terminal stage.

5-16

АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ В КОМПЛЕКСЕ АТЭК ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЗАДАЧ ТОПЛИВНЫХ ЦИКЛОВ

Н.Ю. Романова, И.Р. Макеева

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: n.yu.romanova@vniitf.ru

При исследовании сценариев развития ядерной энергетики возникает большое количество неопределенностей, связанных с будущим временем (неопределенность технологических решений, жизненного цикла и производственных мощностей предприятий и т. п.) и, собственно, с технологическими процессами в ядерном топливном цикле (ЯТЦ), в первую очередь, с неопределенностями в нуклидных потоках. Все эти неопределенности существенно влияют на развитие ядерной энергетики и, следовательно, должны учитываться при моделировании. В докладе описывается подход к анализу неопределенностей в ЯТЦ, развивающийся в комплексе АТЭК. Приводятся результаты расчетов с учетом неопределенностей в сроках ввода в эксплуатацию перерабатывающих заводов, типах перерабатываемого отработавшего топлива и производственных мощностей.

UNCERTAINTY ANALYSIS IN COMPLEX АТЕК AT RESEARCH OF PROBLEMS OF FUEL CYCLES

N. Yu. Romanova, I.R. Makeeva

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

E-mail: n.yu.romanova@vniitf.ru

When studying scenarios of nuclear power engineering

development there is a number of uncertainty caused by the future time (uncertainty of technological decisions, life cycle and plant capacities of the enterprises, etc.) and, actually, with technological processes in a nuclear fuel cycle (NFC), first of all, with uncertainty in nuclide flows. All these of uncertainty essentially influence on development of nuclear power and, hence, should be considered at modeling. In the paper the approach to the uncertainty analysis in NFC developing in code АТЕК is described. Re-sults of calculations take into consideration uncertainty in terms of commissioning of processing factories, types of the reprocessing spent fuel and capacities are resulted.

5-17

ИНФОРМАЦИОННАЯ СРЕДА ПОДДЕРЖКИ РАБОТ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ АЭПК И ТЕХНОЛОГИЙ ЯТЦ

Л.Н. Дарина, Н.Г. Жерноклева, Е.В. Козырева,
Л.М. Пономарева, С.Н. Романовская

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: l.n.darina@vniitf.ru

Уже несколько лет РФЯЦ–ВНИИТФ ведет работы в области моделирования технологий ядерного топливного цикла (ЯТЦ) а также поиска оптимальных технологических решений и эффективной организации работы атомно-энергетического промышленного комплекса (АЭПК). Решением этих задач занимается созданный в РФЯЦ–ВНИИТФ комплекс АТЭК. Обширность, разнообразность и в тоже время специфичность поставленных задач потребовали обеспечения разработчиков и пользователей справочной информацией по тематике выполняемых исследований. Была проведена большая работа по поиску, подбору и систематизации информационных материалов, продуманы и организованы возможности доступа к этой информации для разработчиков и пользователей.

Одним из компонентов созданного комплекса, обеспечивающим информационную поддержку работ, является информационно-справочная система ИС АТЭК. ИС АТЭК представляет собой подборку литературы (книги, журналы, материалы конференций) в электронном виде по ядерной тематике, организованную в удобном для просмотра виде.

Другим компонентом информационной среды является БД «ROSA» комплекса, основной объем информации которой составляют данные по объектам производства. Часть этих данных используется в расчетах, другие не используются, но все они могут представлять самостоятельный интерес для специалистов отрасли и рассматриваться как информационно-справочные данные по объектам производства ЯЭК. Для просмотра этих данных в комплексе организованы страницы доступа к БД.

Следующим компонентом, обеспечивающим информационную поддержку работ, стало WEB-приложение «Научная библиотека АТЭК». Данная система предна-

значена для ввода, хранения и поиска книг, журнальных статей, докладов, отчетов и т. п. Работа с публикациями осуществляется с помощью WEB-приложения, размещенного на сетевом сервере института. Это позволяет работать с библиотекой любому пользователю, подключенному к соответствующей сети. Особенность данной системы в том, что каждый владелец имеет возможность группировать для себя из выбранных в базе документов подборки по нужной ему теме. Для этого создается категория подборки, внутри каждой категории определяется тема подборки, а затем для каждой подборки группируются статьи. Для поиска требуемой информации в базе данных созданы широкие возможности.

Необходимым компонентом обеспечения взаимодействия и координации усилий разработчиков и пользователей различных научных групп явилось создание глоссария, который состоит из словаря определений и описания специальных терминов, используемых в работах.

INFORMATION ENVIRONMENT FOR SUPPORT OF WORKS ON MODELING NEIC AND NFC TECHNOLOGIES

L.N. Darina, N.G. Zhernokleva, E.V. Kozyreva,
L.M. Ponomareva, S.N. Romanovskaya

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

E-mail: l.n.darina@vniitf.ru

For some years RFNC–VNIITF has been working in the field of modeling technologies of nuclear fuel cycle (NFC) and also in the field of searching of optimal technological solutions and the effective organization of work of nuclear-energetic industry complex (NEIC). Created in RFNC–VNIITF soft-ware code ATEK solves these problems. Due to width, variety and at the same time the specificity of problems it was necessary to provide developers and users the help information on subjects of carried out researches. The large work on search, selection and ordering of information materials has been carried out, an access to this information for developers and users was thought over and organized.

One of code ATEK components for information support of works is the information and retrieval system IS ATEK. It is the selection of the literature (books, magazines, materials of conferences) on the nuclear themes in an electronic type, conveniently organized for viewing.

Other component of the ATEK information environment is the database «ROSA», mainly containing the data on facilities objects. The part of these data is used in calculations, others are not used, but all of them can be of independent interest for experts in atomic industry and can be considered as the I&R data on facilities objects of NEIC. For viewing these data the pages for access to a database are organized in code ATEK.

WEB-application «Scientific library ATEK» was the following component providing information support of works. This system is intended for input, storage and search of books, journal articles, reports, etc. Work with publications is carried out with the help of the WEB-application placed on a network server of institute. It allows any user connected to corresponding network to work with library.

Special feature of this system is that each user has an opportunity to group for itself a selection from the chosen documents on the necessary theme. For this purpose the category of a selection is created and the theme of a selection is determined inside each category. After that the articles are grouped for each selection. Wide variety of methods for searching of the required information in the database was created.

Glossary was created as the necessary component for interaction and coordination of efforts of developers and users of various scientific groups. Glossary consists of the dictionary of definitions and the description of the special terms used in work.

5-18

ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ НА ПРИМЕРЕ ОБРАЩЕНИЯ С НЕКОНДИЦИОННЫМ ОЯТ РБМК-1000

В.Г. Дубосарский, О.В. Вербицкая,
С.В. Пчелинцева, В.П. Соколов

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Одними из важнейших задач моделирования ЯТЦ являются задачи моделирования обращения с ОЯТ реакторов РБМК, включая некондиционный, начиная с момента выгрузки ОЯТ из реактора и заканчивая захоронением радиоактивных отходов, полученных из ОЯТ. Такие задачи описываются с помощью транспортно-технологических схем (ТТС). Структурно ТТС легко представить в виде дерева объектов, где каждый объект – конкретный этап ТТС. Центральное место в решении таких задач занимает анализ экономической эффективности того или иного выбираемого решения по обращению с ОЯТ. С его помощью можно дать обоснование целесообразности переработки или захоронения ОЯТ, в том числе и некондиционного. Для решения задач подобного типа был создан программный продукт АТЭК–ТТС. Он представляет собой динамическую среду программирования и набор сценариев, обеспечивающих решение заданного набора задач.

Сценарий состоит из расчетной схемы, узлами которой являются отдельные переделы ТТС, совокупности данных, характеризующих передел, и алгоритмов расчета. Все выше перечисленные элементы сценария в АТЭК–ТТС создаются динамически.

В процессе подготовки сценария АТЭК–ТТС формирует древовидную структуру, являющуюся одним из способов представления иерархически организованных данных. Внутренней формой представления этих структур является XML – файл. Внешним представлением данных в АТЭК–ТТС является пользовательский интерфейс, в котором эти древовидные структуры могут отображаться разными способами: в виде иерархических списков или вложенных множеств.

Каждый узел схемы в АТЭК–ТТС представляет собой вычислительный блок, который содержит набор

входных параметров и алгоритм для расчета определенного набора выходных параметров (материальных и экономических характеристик).

Работая в интерактивной программной среде, пользователь имеет возможность:

- представить алгоритм расчета ТТС аналитически (в виде формул);
- редактировать алгоритм расчета ТТС;
- вводить новые параметры в модель и алгоритм расчета;
- изменять значения входных параметров.

Являясь системой с динамической моделью данных и динамическим интерфейсом, модуль АТЭК–ТТС позволяет изменить конкретную схему расчета и решить другой тип задачи.

В докладе приводится описание принципов динамического программирования задач ТТС, и иллюстрация построения сценария для обращения с некондиционным ОЯТ РБМК-1000.

**DYNAMIC SIMULATION SOFTWARE TOOLS
FOR MODELING TRANSPORTATION-
TECHNOLOGICAL SCHEMES ON THE EXAMPLE
OF UNCONDITIONED RBMK-1000 SPENT FUEL
TREATMENT TASK**

V.G. Dubosarskiy, O.V. Verbitskaya,
S.V. Pchelintzeva, V.P. Sokolov

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

The task of modeling RBMK spent fuel treatment, including unconditioned spent fuel, beginning from unloading stage and ending with waste disposal stage, remains one of the major tasks in modeling nuclear fuel cycles. It is a common practice to describe such task tasks in the terms of transportation-technological schemes (TTS). Structurally any TTS can be represented in the form of an object tree, where each object is a particular scheme stage. The central place in solving such tasks occupies the subproblem of economical cost-effectiveness analysis of these of that particular solution. With its help it is possible to give substantiation of spent fuel reprocessing or disposal. For solving task of such type, a software code АТЕК–ТТС was created. It corresponds to a dynamic programming environment and a set of modeling scenarios, which provide solutions for the given set of problems.

Each scenario consists of a calculation scheme, nodes of which represent independent fuel cycle stages, describing stage data sets and algorithms. All of the mentioned elements can be created by user dynamically.

During the process of scenario preparation, АТЕК–ТТС forms a tree-type structure, which is the presentation medium of hierarchically structured data. XML data file appears to be an internal representation of these structures, while external representation is graphical user interface, where all of these tree-type structures can be display by means of hierarchical lists or nested ensembles.

Each scheme node in АТЕК–ТТС represents a calculation block, which contains a set of input parameters and an algorithm for output parameter set obtainment (material flows and economic characteristics).

While working in АТЕК–ТТС software environment, the user can:

- represent the TTS calculation algorithms in analytical form (with mathematic formulas);
- edit these algorithms;
- add new parameters in scenarios and algorithms;
- change values of input parameters.

АТЕК–ТТС corresponds to a system with a dynamical data model and dynamical user interface, and thereby allows to modify any particular calculation scheme and to solve another problem type.

In the presented report one can find a description of TTS tasks dynamic programming principles on the example of constructing scenario for RBMK-1000 spent fuel treatment.

5-19

**ИЗУЧЕНИЕ УСКОРЕННЫХ
РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В PuO₂
И СТАБИЛИЗОВАННОМ КУБИЧЕСКОМ
ДИОКСИДЕ ЦИРКОНИЯ (Zr, Gd, Pu)O₂,
ДОПИРОВАННЫХ PU-238**

Б.Е. Бураков¹, М.А. Яговкина²

¹НПО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина»,
Санкт-Петербург, Россия

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: burakov@peterlink.ru; ymasha@mail.ioffe.ru

Кубический диоксид циркония (Zr,...)O₂, стабилизированный добавками иттрия, кальция или редкоземельных элементов (внедренных в структуру в форме твердых растворов), характеризуется кристаллической решеткой флюоритового типа, аналогичной кубическим диоксидам актинидов UO₂, PuO₂, NpO₂, AmO₂. Твердый раствор плутония в кубическом диоксиде циркония (Zr, Pu,...)O₂ был предложен для создания ядерного топлива с инертной матрицей, а твердые растворы актинидов в (Zr,...)O₂ (в виде низкопористой плотной керамики) рассматриваются в качестве наиболее устойчивых керамических форм отходов для окончательной изоляции. Эксперименты по облучению кубического диоксида циркония показали его уникальную радиационную устойчивость как при внешнем облучении тяжелыми ионами и нейтронами, так и при самооблучении за счет внедренного в кристаллическую решетку мощного альфа-излучателя ²³⁸Pu. Поведение кристаллического диоксида плутония под воздействием самооблучения изучено недостаточно. Известно, что PuO₂, прокаленный на воздухе при температуре свыше 600°C, труднорастворим в кислотах, однако по мере накопления радиационных дефектов его химическая устойчивость существенно снижается.

Для синтеза кубического стабилизированного оксида циркония применили аммиачное соосаждение из общего нитратного раствора Zr, Gd и Pu. Полученный осадок был высушен, прокален при 600°C, растерт в агатовой ступке и отпрессован в таблетки, которые спекли на воздухе при 1500°C в течение 3 часов. В результате была получена монофазная керамика на основе

кубического диоксида циркония следующего состава (по результатам рентгеноспектрального микроанализа, в масс. %): Gd – 15,4; Zr – 50,2; Pu (все изотопы) – 12,2. Содержание в керамике ^{238}Pu составило 9,9 масс.%. Поликристаллический PuO_2 был синтезирован сходным образом через аммиачное осаждение из нитратного раствора, сушку и прокалку полученного порошка с последующим холодным прессованием и спеканием на воздухе. Содержание ^{238}Pu в конечном поликристаллическом PuO_2 составило 11,0 масс.% (в пересчете на металл).

Для обеспечения радиационной безопасности при длительном хранении образцов и проведении периодических рентгеноструктурных исследований самые тонкие таблетки образцов (примерно 8–9 мм в диаметре и 1,5 мм толщиной) поместили в герметичные кассеты с бериллиевым окном. После полной герметизации кассеты отвечали требованиям закрытых источников ионизирующего излучения. Рентгеноструктурный анализ проводился через бериллиевое окно кассеты. Рефлексы Be и BeO использовались в качестве внутреннего стандарта при расчете параметра кристаллической решетки $(\text{Zr, Gd, Pu})\text{O}_2$ и PuO_2 . Общая длительность экспериментальных наблюдений составила почти 4,5 года для $(\text{Zr, Gd, Pu})\text{O}_2$, и более 2,5 лет – для PuO_2 . При расчете накопленных доз учитывался только ^{238}Pu , а вклад в самооблучение матрицы от других изотопов плутония рассматривался как несущественный.

Результаты изучения ускоренных радиационных повреждений в поликристаллических $(\text{Zr, Gd, Pu})\text{O}_2$ и PuO_2 , характеризующихся одинаковой кубической структурой флюоритового типа, позволяют сделать следующие выводы:

1) Самооблучение $(\text{Zr, Gd, Pu})\text{O}_2$ сопровождается двумя конкурирующими процессами – в виде периодического «пульсирующего» накопления и самоотжига радиационных дефектов. Вероятно, это обуславливает уникальную радиационную устойчивость кубического диоксида циркония.

2) Поведение кристаллической структуры PuO_2 в процессе самооблучения принципиально отличается от $(\text{Zr, Gd, Pu})\text{O}_2$. Признаков самоотжига возникающих радиационных дефектов выявлено не было.

3) Существует вероятность возникновения процессов самоотжига радиационных дефектов в поликристаллическом спеченном PuO_2 при уменьшении плотности (повышении пористости) данного материала и снижении удельной радиационной нагрузки. Данное предположение требует экспериментальной проверки.

A STUDY OF ACCELERATED RADIATION DAMAGE IN PuO_2 AND STABILIZED CUBIC ZIRCONIA, $(\text{Zr, Gd, Pu})\text{O}_2$, DOPED WITH ^{238}Pu

B.E. Burakov¹, M.A. Yagovkina²

¹V.G. Khlopin Radium Institute, St. Petersburg, Russia

²A.F. Ioffe Physical-Technical Institute, St. Petersburg, Russia

e-mail: burakov@peterlink.ru; ymasha@mail.ioffe.ru

Cubic zirconia, $(\text{Zr, ...})\text{O}_2$, stabilized by yttrium, calcium or rare-earths (incorporated in the form of solid solution) is characterized with fluorite-type crystalline structure, which

is the same to ones of UO_2 , PuO_2 , NpO_2 , AmO_2 . Plutonia-zirconia cubic solid solution, $(\text{Zr, Pu, ...})\text{O}_2$, was suggested for development of nuclear fuel with inert matrix, and actinide-doped cubic zirconia, $(\text{Zr, An, ...})\text{O}_2$, in the form of low porous ceramic is considered as one of the most durable ceramic waste forms for final geological disposal. Radiation damage experiments have demonstrated that cubic zirconia is extremely resistant to external irradiation by heavy ions and neutrons as well as to internal irradiation from strong alpha-emitter ^{238}Pu incorporated into crystalline lattice. In contrast, the behavior of crystalline plutonium dioxide under self-irradiation has been studied insufficiently. It is known that PuO_2 calcined in air at temperature higher 600°C is difficult to dissolve in acids. However, chemical resistance of PuO_2 decreases essentially depending on accumulation of radiation defects.

In order to obtain starting precursor for synthesis of cubic zirconia the hydroxides of Zr, Gd and Pu have been co-precipitated from common nitrate solution by ammonium hydroxides. Then the precursor was dried, calcined in air at 600°C , ground in agate mortar, cold pressed into pellets, which were sintered in air at 1500°C for 3 hours. As a result single phase cubic zirconia ceramic of the following chemical composition (from microprobe analysis, in wt.%): Gd – 15.4; Zr – 50.2; Pu (all isotopes) – 12.2 has been obtained. Content of ^{238}Pu in ceramic matrix was 9.9 wt.%. Polycrystalline PuO_2 was synthesized by similar method through precipitation by ammonium hydroxide from nitrate solution, drying, calcination of the powder obtained followed by cold pressing and sintering in air. Content of ^{238}Pu in final polycrystalline PuO_2 was 11.0 wt.% (estimated on Pu metal).

In order to provide radiation safety during long-term storage and repeated XRD analyses the thin pellets of both samples (approximately 8–9 mm in diameter and 1.5 mm thickness) were placed into hermetical cassettes with metallic beryllium window. After full sealing these cassettes became analogues of certified sealed sources of irradiation. XRD-analyses were carried out through Be-window. Peaks of Be and BeO were used as peaks of internal standard for calculation of unit-cell parameter of $(\text{Zr, Gd, Pu})\text{O}_2$ and PuO_2 . Duration of all experimental work with $(\text{Zr, Gd, Pu})\text{O}_2$ was 4.5 years and for PuO_2 – more than 2.5 years. The contribution of ^{238}Pu irradiation only was used for calculation of accumulated doses, the irradiation from other Pu-isotopes was considered as insignificant.

The results of the study of accelerated radiation damage effects in cubic fluorite-type structured polycrystalline $(\text{Zr, Gd, Pu})\text{O}_2$ and PuO_2 allow us to make the following conclusions:

4) Self-irradiation of $(\text{Zr, Gd, Pu})\text{O}_2$ is accompanied with two competing processes – repeated «pulsating» accumulation and self-annealing of radiation defects. Probably, it causes the unique radiation resistance of cubic zirconia.

5) Behavior of PuO_2 crystalline structure under self-irradiation differs essentially from $(\text{Zr, Gd, Pu})\text{O}_2$. No evidences of radiation defect's self-annealing were observed.

6) There is a probability to initiate the radiation defect's self-annealing processes in polycrystalline sintered PuO_2 through decrease of matrix density (increase of porosity) and decrease of relative radiation damage impact. It requires further experimental verification.

5-20

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ УРАНОСОДЕРЖАЩИХ ЯДЕРНЫХ ТОПЛИВ МЕТОДАМИ АТОМИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Д.Е. Смирнова

Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

С помощью методов атомистического моделирования выполняется исследование структуры и свойств перспективных топливных сплавов уран–молибден и чистого урана. Для изучения свойств указанных материалов на атомистическом уровне разработаны потенциалы, описывающие межатомное взаимодействие в чистом уране (U) и в бинарной системе уран–молибден (U–Mo). Потенциалы построены методом «согласования по силе» (force-matching method) в рамках модели погруженного атома. В качестве нормировочных данных при оптимизации потенциальных функций используются значения сил, энергий и напряжений, полученные из ab initio расчетов. Установлено, что предложенные потенциалы корректно воспроизводят структуру α -U, γ -U, Mo, топливных сплавов системы U–Mo (содержащих от 6 до 10 весовых процентов молибдена) и соединения U₂Mo. Упругие постоянные, температуры плавления, тепловое расширение и «холодное» сжатие компонентов системы U–Mo находятся в согласии с экспериментальными данными. Вычисленные значения параметра Грюнайзена для жидкой и кристаллических фаз чистого урана соответствуют опубликованным экспериментальным данным и результатам расчетов, выполненных методом квантовой молекулярной динамики. Полученные с потенциалами значения энергии образования точечных дефектов (вакансий, межузельных атомов) в U и Mo согласуются с результатами ab initio расчетов. Разработанные потенциалы ориентированы на детальное изучение механизмов образования и эволюции радиационных дефектов и соответствующих изменений структуры и свойств ураносодержащих топлив под воздействием радиационного облучения.

INVESTIGATION OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF URANIFEROUS NUCLEAR FUELS VIA ATOMISTIC SIMULATION TECHNIQUES

D.E. Smirnova

Joint Institute of High Temperatures, RAS, Moscow, Russia

E-mail: d.e.smirnov@gmail.com

The properties of prospective uranium-molybdenum (U–Mo) fuel alloys and pure uranium are investigated using atomistic simulation techniques. For simulation of the corresponding structures at the atomistic scale two new potentials describing interatomic interactions in pure uranium and in binary U–Mo system were developed. Both of them were constructed using «force-matching» method [1] within the frame of the embedded-atom model [2]. The potential functions were fitted to the values of interatomic forces, en-

ergies and stresses obtained from ab initio calculations. It is proved that the potentials proposed reproduce the structure of α -U, γ -U, Mo, U-10wt.%Mo fuel alloy and an ordered U₂Mo compound. Elastic constants, melting temperatures and room-temperature isotherms for the components of U–Mo system are consistent with the experimental data. The Grüneisen parameter for liquid and solid uranium agrees well with the known experimental data and with the values calculated previously using QMD [3]. The values of point defect (SIA, single vacancy) formation energies in pure U and Mo are close to the results of ab initio calculations. The potentials developed are aimed to study the formation and evolution of radiation defects and to investigate the corresponding changes in fuel structure and strength properties under irradiation.

References

1. Daw M.S., Baskes M.I. // Phys. Rev. B., 1984, V. 29, P. 6443.
2. Ercolessi F., Adams J.B. // Europhys. Lett., 1994, V. 26, P. 583.
3. Hood R.Q., Yang L.H., Moriarty J.A. // Phys. Rev. B., 2008, V. 78, P. 024116

5-21

РАЗВИТИЕ АСПЕКТОВ МИКРОПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАТЕРИАЛОВ ОБОЛОЧЕК ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Е.И. Курбатова, А.И. Ксенофонтов, В.М. Демин,
В.С. Трошин, И.Н. Фридляндер, Л.С. ГузейНаучно-исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия

E-mail: elkur@km.ru

Представленная работа направлена на исследование и развитие аспектов ионно-плазменных технологий для создания моделей материалов оболочек твэлов с новыми структурными формами поверхности, обладающей повышенными специальными и механическими свойствами [1, 2].

Вследствие воздействия радиационного, физико-механического и коррозионного фактора в поверхностных слоях материала оболочек образуются дефекты, приводящие к разрушению и потере герметичности конструкции.

В качестве материала оболочки (мишени) при исследовании использовали электролитическое железо и цирконий, а также углеродистые и легированные стали. Облучение проводили ионными пучками тугоплавких металлов.

В ходе исследования было установлено:

- в синтезированных поверхностных зонах металлических мишеней протяженностью 3–10 мкм реализуется интерметаллидный механизм упрочнения. Наиболее высокими свойствами при температурах 700–1000°C обладают интерметаллиды металлов VI группы.
- в поверхностных зонах стальных мишеней сохраняется механизм карбидного упрочнения, при этом их ширина составляет 2–3 мкм. Наиболее высокими

механическими свойствами обладают зоны, синтезированные ионными пучками металлов IV группы. При нагреве до температур 600–700°C из значения понижаются.

Разработаны аспекты процесса синтеза поверхностных зон в исследованных мишенях ионными пучками металлов IV–VI групп с целью повышения их свойств при температуре 700–1000 °C. Для синтезированных модельных образцов оболочек с поверхностными зонами установлено:

- повышение механических свойств на 10–12%,
- увеличение долговечности модельных образцов в 1,2–1,4 по сравнению с мишенью.

Литература

1. Ksenofontov A.I et al. The Simulation of Creation Process of Substructural Shielding Barrier Layers for Iron and Zirconium Alloys Used in Nuclear Technology. 1-st International Nuclear & Renewable Energy Conference (INREC-10), Jordan, Amman, 2010.
2. Agapov A.M., Ksenofontov A.I, Kurbatova E.I. Simulation of Increased Durability Materials under the Influence of Radiation, High Pressure and Temperature. Materials of ANS Winter Meeting «The Status of Global Nuclear Deployment» Washington, DC, 2011, p. 38.

THE DEVELOPMENT OF MICROPLASMA TECHNOLOGY ASPECTS FOR OPERATION SAFETY INCREASE OF MATERIALS OF FUEL ELEMENTS SHELLS

E.I. Kurbatova, A.I. Ksenofontov, V.M. Dyomin,
V.S. Trochin, I.N. Friedlyander, L.S. Guzey
National Research Nuclear University «MEPhI»,
Moscow, Russia
E-mail: elkur@km.ru

This work is directed on the research and development of ionic-plasma technology aspects for the creation of material models of fuel element shells with new surface structural forms possessing increased special and mechanical properties [1, 2].

The defects resulting in destruction and hermiticity loss of a construction because of influence of the radiation, physical and mechanical and corrosion factor in the surface layers of shell material are formed.

The electrolytic iron and zirconium as well as carbonaceous and alloyed steels as a material of fuel element shell (target) were used during the research. An irradiation was carried out by ionic beams of refractory metals.

During the research it has been established:

- It is realized intermetallic mechanism of hardening into the synthesized surface zones of metal targets in the extent of 3–10 microns. The possess highest properties in the temperature range of 700–1000°C intermetallids metals of VI group.
- The mechanism of carbide hardening in surface zones of steel targets is kept, thus the zone widths make 2–3 microns. The zones synthesized by ionic beams of metals of IV group possess the highest mechanical properties. These values at heating in the temperature range of 600–700°C value are decreased.

The aspects of synthesis process of surface zones in the investigated targets by ionic beams of metals of

IV–VI groups to increase their properties in the range temperatures of 700–1000°C are developed. For the synthesized modeling shell samples with surface zones it is established:

- The mechanical properties increase on the average by 10–12 per cents.
- The durability of modeling samples in comparison with a target increase on the average by 1.2–1.5 times.

References

1. Ksenofontov A.I et al. The Simulation of Creation Process of Substructural Shielding Barrier Layers for Iron and Zirconium Alloys Used in Nuclear Technology. 1st International Nuclear and Renewable Energy Conference (INREC-10), Jordan, Amman, 2010.
2. Agapov A.M., Ksenofontov A.I, Kurbatova E.I. Simulation of Increased Durability Materials under the Influence of Radiation, High Pressure and Temperature. Materials of ANS Winter Meeting «The Status of Global Nuclear Deployment» Washington, DC, 2011, p. 38.

5-22

ДЕФЕКТОСКОПИЯ МЕТАЛЛОБЕТОННОГО ХРАНИЛИЩА ДЛЯ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

И.Г. Вавилова, Я.А. Касман, М.Р. Колхидашвили,
В.В. Марченков, А.М. Пирогов, В.А. Соловей,
И.В. Шока, Н.Д. Шциголев
Петербургский институт ядерной физики
им. Б.П. Константинова, Гатчина, Россия
E-mail: IGVavilova@pnpi.spb.ru

Условиями изготовления и безопасной эксплуатации разработанного в Конструкторском бюро специального машиностроения металлобетонного контейнера для отработанного ядерного топлива предусмотрена дефектоскопия его бетонного наполнителя, сложности изготовления и т. д.

В данной работе описывается новая версия испытательного стенда гамма-контроля контейнеров.

Представлены кинематика стенда, электронное и программное обеспечение с техническими решениями, повышающими живучесть и надежность комплекса, а также достоверность результатов выполняемых с помощью него измерений.

FLAW DETECTION OF METAL AND CONCRETE CASK FOR SPENT NUCLEAR FUEL

I.G. Vavilova, N.Ya. Kasman, M.R. Kolhidashvili,
V.V. Marchenkov, A.M. Pirogov, V.A. Solovei,
I.V. Shoka, N.D. Shchigolev
Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, Russia
E-mail: IGVavilova@pnpi.spb.ru

Specification for production and safe operation of the metal and concrete cask developed at JSC «Design Bureau of Special Mechanical Engineering» and aimed for spent nuclear fuel storage and transportation presume strict quality control.

This work describes a new version of the casks test-bench measuring γ -radiation attenuation.

Presented are the test-bench mechanics, electronics and software that provide for better safety and robustness of the installation and reliability of the measurements performed using this equipment.

5-23

К ПРИНЦИПАМ ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙСМОЗАЩИТЫ КРУПНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Ф.Х. Каримов

Институт геологии, сейсмостойкого строительства
и сейсмологии Академии наук Республики Таджикистан,
Душанбе, Таджикистан

Крупные электростанции, вырабатывая тысячи мегаватт электроэнергии, сами потребляют энергию различного вида. Устройства, которые предназначены для преобразования механической, тепловой, ядерной энергии, в пиковых режимах нагрузки весьма энергоёмки. Именно в пиковых режимах эти электростанции оказываются особенно уязвимыми к сейсмическим воздействиям естественных землетрясений, взрывов и т. д. Поэтому очень важно заранее, до прихода сейсмических волн, переводить пиковый режим работы электростанций на наиболее энергетически низкий уровень.

Предлагается использовать два способа раннего предупреждения. Первый основан на различиях в скоростях распространения электрических сигналов и сейсмических волн. Скорость этих сигналов составляет величины порядка 100 000 км/с, а сейсмических волн – 1 км/с. Источники сейсмических волн сильных землетрясений расположены в разломных зонах первого порядка, причем, как правило, в определенных зонах разломов, в таких, как дизъюнктивные узлы или пересечения крупных линейментов. Если расположить конвертерные устройства для преобразования сейсмических колебаний в электрические сигналы непосредственно в этих очаговых зонах, то, используя различия в скоростях, можно получить в распоряжение секунды, минуты для перевода режима работы электростанций в менее опасный. Передача переменных электрических сигналов может осуществляться либо с помощью электропроводных, либо антенных устройств. На эпицентральных расстояниях 50 км разность времен вступления электрических сигналов и сейсмических волн составит примерно 10 с, на расстоянии 100 км – 20 с.

Второй способ основан на использовании вариаций аномалий геофизических полей различного вида на стадиях подготовки тектонических землетрясений. В настоящее время пока не достигнуто 100-процентной надежности выявления этих аномалий и задача прогноза землетрясений не нашла пока полного решения, однако реакция даже на ложный сигнал оправдана главной задачей – обеспечением сейсмобезопасности электростанций. Причем, в этом способе появляется возможность проводить мероприятия по снижению степени

сейсмического риска для электростанций на различных стадиях подготовки тектонического землетрясения – долго- (за месяцы, годы), средне- (за недели) и кратко-срочной (за часы, дни).

Настоящие способы инженерной сейсмозащиты регламентируют соответствующие дополнительные требования к проектированию и строительству крупных электростанций.

TO THE PRINCIPLES OF ENGINEERING SEISMIC PROTECTION OF LARGE POWER PLANTS

F.H. Karimov

Institute of Geology, Earthquake Engineering and Seismology,
Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan,
Dushanbe, Tajikistan

Large power plants, producing thousands of MW of electricity, themselves consume energy of various kinds. Devices designed to transform mechanical, thermal, nuclear energy, are very energy capacious at peak loading regimes. It is at these modes the power stations are turned up particularly vulnerable to seismic effects of natural earthquakes, explosions, etc. It is therefore very important to transfer peak power regime into the most low energy one in advance, before the arrival of seismic waves.

Two methods for early warning are proposed to use. The first is based on differences in the rates of propagation of electrical signals and seismic waves. The speed of the signals is 100,000 km/s and one of the seismic waves is 1 km/sec by the order of magnitude. The sources of strong earthquakes' seismic waves are located in the fault zones of the first order, and, as a rule, in such specific parts of the faults, as disjunctive nodes or intersections of major lineaments. If to site the devices directly in these focal sites to convert seismic waves into electrical signals, then by using the differences in the rates one can get at the command seconds, minutes for the transferring the plants operation regime into the most secure. Alternating electrical signals transmission can be carried out either by using electrical conductor or antenna devices. For the epicentral distance 50 km the arrival time difference of electrical signals and seismic waves is approximately 10 s, for the distance 100 km that is 20 s.

The second method is based on variations of geophysical fields' anomalies of different types at the stages of preparation of tectonic earthquakes. At the present time there isn't 100 percent reliability of the identification of these anomalies yet reached and the problem of earthquake prediction has not found while a complete solution, but the reaction to a false alarm is justified by the mission of providing the stations' seismic safety. To that, it is possible in this method to carry out actions to reduce the seismic risk for the power plants at the various stages of preparation of a tectonic earthquake, long-term (months, years), medium (weeks) and short-term (hours, days).

The present methods of engineering seismic protection impose the additional requirements to the designs and constructions of large power plants.

5-24

АДАПТИВНЫЙ НЕЙРОСЕТЕВОЙ РЕГУЛЯТОР

М.А. Трапезников, Н.Н. Алексеенко,
П.Г. Зыков, П.В. Волобуев

Физико-технологический институт УрФУ,
Екатеринбург, Россия

E-mail: zpg36@mail.ru

Для управления моделью кинетики точечного реактора с одной группой запаздывающих нейтронов используется аппарат нечеткой логики. Предложен регулятор на основе Q-критика, который осуществляет ввод положительной или отрицательной реактивности с целью выхода на заданную мощность и поддержания этого уровня.

Работа Q-критика основана на следующих положениях.

1. На обучении с подкреплением – это обучение с учителем. На каждое действие регулятора в данных условиях учитель отвечает наградой либо наказанием, но не указывает правильное действие. Очевидно, что в случае большого количества наказаний регулятор должен обладать механизмом смены решения. Этот механизм реализуется сменой знака производной выхода критика Q по его входу A;

2. На выработке программы управления, оптимальной в смысле получения максимальной суммарной награды от учителя за промежуток времени. Это реализуется с помощью обучения критика, при котором его выход Q считается оценкой суммарной награды в будущем.

Предлагается дальнейшее усовершенствование алгоритма.

AN ADAPTIVE NEURAL NETWORK CONTROLLER

М.А. Трапезников, N.N. Alexeyenko,
P.G. Zykov, P.V. Volobuyev

Physics and Technology Institute, UrFU
Yekterinburg, Russia,

E-mail: zpg36@mail.ru

Fussy logic is used to control a model describing kinetics of a point reactor with one group of delayed neutrons. We propose a Q-critic-based controller which inputs positive or negative reactivity to reach and maintain a specified level of power.

Q-critic operation is based on the following assumptions.

1. Learning with backing, or learning with teacher: the teacher responds to each controller's action by awarding or punishing, but does not state the right action. It is clear that the controller needs to have a mechanism which changes the solution if the number of punishments is large. The mechanism implements by altering the sign of Q output derivative from its input A.

2. Development of a control program which would be optimal in terms of a maximum total award from the teacher during a time interval. This is implemented through learning the critic in such a way where its output Q is assumed to be an estimate of the total award in the future.

Further improvements to the algorithm are proposed.

5-25

РАДИОХИМИЧЕСКОЕ И РЕНТГЕНСПЕКТРАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИНЕРАЛА БРИТОЛИТА КАК ПРИРОДНОГО АНАЛОГА СИНТЕТИЧЕСКИХ МАТРИЦ ДЛЯ ИММОБИЛИЗАЦИИ АКТИНИДОВ

А.А. Петрунин², М.И. Скриплев², Э.В. Фомин¹
А.В. Титов¹, Р.В. Богданов²

¹Петербургский институт ядерной физики,
им. Б.П. Константинова, Гатчина, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: petrulin@pnpi.spb.ru; bogdanov@RB7584.spb.edu

Хранение радиоактивных отходов в подземном депозитарии связано с выделением большой энергии (в случае иммобилизации фракции актинидов – до 10–20 киловатт на тонну матричного материала), что – в отсутствие интенсивного отвода тепла из шахт хранилища – приведет к нагреванию радиоактивных блоков до температуры в несколько сотен градусов. Это обстоятельство делает необходимым изучение поведения матриц ВАО и их природных аналогов при повышенных температурах. В представляемой работе изучались химические процессы, протекающие в метамиктном минерале бритолите (рассматриваемом в литературе в качестве природного аналога многофазных силикофосфатных матриц для иммобилизации актинидов [1]) в температурном интервале 20–900°C.

Литература

1. Bogdanov R.V., Zaytsev Y.M., Sergeev A.S. The use of cerium valence state for evaluation of accessory minerals durability to radiation damage. Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXV. 2002, Boston, USA, pp. 469–476.

RADIOCHEMICAL AND X-RAY STUDY OF THE MINERAL AS A NATURAL ANALOGUE OF BRITHOLITE SYNTHETIC MATRICES FOR IMMOBILIZATION OF ACTINIDES

А.А. Петрунин¹, М.И. Скриплев²,
Е.В. Фомин¹, А.В. Титов¹, Р.В. Богданов²

¹Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, Russia

²St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

E-mail: petrulin@pnpi.spb.ru; bogdanov@RB7584.spb.edu

Storage of radioactive waste in underground depositories associated with the release of high energy (in the case of immobilization of actinide fraction it is up to 10–20 kilowatts per ton of matrix material), which, in the absence of intense heat from the storage pits, leads to radioactive heating the units to a temperature of several hundred degrees. This makes it necessary to study the behavior of HLW matrices and their natural analogues at increased temperatures. In this work we studied the chemical processes occurring in metamict mineral britholite (considered in the literature as a natural analogue of multiphase silicon phosphate matrix for the immobilization of actinides [1]) in the operating temperature range 20–900 °C.

Reference

1. Bogdanov R.V., Zaytsev Y.M., Sergeev A.S. The use of cerium valence state for evaluation of accessory minerals durability to radiation damage. Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXV. 2002, Boston, USA, p. 469–476.

5-26

**АЛЮМО-СИЛИКОФOSФATНАЯ
МОДЕЛЬ ПОЛИФАЗНЫХ МАТРИЦ
ДЛЯ ИММОБИЛИЗАЦИИ SR-CS-ФРАКЦИИ
ВЫСОКОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ
ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА**

Р.В. Богданов¹, Р.А. Кузнецов¹,
Е.Е. Прудников¹, А.В. Титов²

¹Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

²Петербургский институт ядерной физики,
Гатчина, Россия

Развитие концепции фракционирования ВАО с получением практически в чистом виде Sr–Cs-фракции не только открывает перед ядерной технологией новые возможности, но и ставит новые задачи, определяемые возросшей удельной активностью матриц ВАО. В частности, удельная активность нуклида Cs-135 в матрице возрастает до $(1,5–2,8) \cdot 10^9$ Бк/кг, что приближается к нижнему порогу высокоактивных отходов. Требуется поиск новых форм матричных материалов, альтернативных стеклянным матрицам, рассчитанных на длительное (105–106 лет) хранение в подземных депозитариях.

В работе развивается концепция полифазных керамических матриц алюмосиликофосфатного типа (геокерамик), синтезированных на основе природных бокситов и хвостов обогащения апатитового сырья. Определен оптимальный состав компонентов: Cs₂O, P₂O₅, SiO₂, Al₂O₃ и разработан экономичный метод синтеза матриц с содержанием до 15 масс.% изотопов цезия и 6% стронция. Выявлены фазы, в которых стабилизируются изотопы цезия. Показано, что наиболее водостойкими являются матрицы, расчетный стехиометрический состав которых близок к составу поллуцита: CsAlSi₂O₆. Скорость выщелачивания цезия из таких матриц в 10^{-6} г/см²сутки. Закалка материалов не кинетической области составляет 2 приводит к ухудшению иммобилизационных характеристик. В ряде случаев положительный эффект дает использование золь-гель технологии, связанное с резким уменьшением размера зерен: величины R опускаются до $(0,4–0,9) \cdot 10^{-6}$ г/см²сут. Скорость выщелачивания стронция лежит ниже порога определения: $0,3 \cdot 10^{-6}$ г/см²сут.

**ALUMINOSILICATE-PHOSPHATE MODEL OF
POLYPHASE MATRICES FOR IMMOBILIZATION
OF Sr-Cs-FRACTIONS OF NUCLEAR
FUEL CYCLE HLRW**

R.V. Bogdanov¹, R.A. Kuznetsov¹,
E.E. Prudnikov¹, A.V. Titov²

¹St.Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

²Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, Russia

E-mail: bogdanov@RB7584.spb.edu; titov@pnpi.spb.ru

Development of the concept of Sr–Cs-fractions extraction from High Level Radioactive Waste (HLRW) not only opens up new opportunities for nuclear technology, but also puts the new problems defined by increased specific activity of matrices. In particular, specific activity of Cs-135 in a matrix increases up to $(1.5–2.8) \cdot 10^9$ Bk/kg that lays near to border of HLRW. Search for new forms of the materials for matrices alternative to the glass ones, calculated on long (105–106 years) storage in underground depositories, is required.

In the work the concept of polyphase geoceramic matrices of aluminosilicate-phosphate type synthesized on the basis of natural bauxites and tails of apatite raw material enrichment develops. The optimum structure of components is certain and the economic method of synthesis of matrixes with the maintenance up to 15 wt % of cesium isotopes and 6% of strontium is developed. Phases are revealed in which isotopes of cesium are stabilized. It is shown that the most waterproof are matrices, chemical composition of which is close to the pollucite structure CsAlSi₂O₆. The cesium leaching rate (R) from such matrices makes 10^{-6} g/cm² day in kinetic area. Hardening of materials does not lead to deterioration of immobilization characteristics. In some cases the positive effect gives use of the sol-gel technology, connected with sharp reduction of the grain size. The leaching rate for cesium falls up to $(0.4–0.9) \cdot 10^{-6}$ g/cm²day. Leaching rate for strontium lays below a threshold of definition: $0.3 \cdot 10^{-6}$ g/cm²day.

5-27

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ
НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОРБЕНТОВ КЛАССА
ДВОЙНЫХ СИЛИКАТОВ**

Г.Г. Михайлов¹, Н.М. Барышева²,
Т.М. Лонзингер¹, А.Г. Морозова¹, Е.В. Поляков³

¹Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

²Российский федеральный ядерный центр – ВНИИ
технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

³Институт химии твердого тела УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

E-mail: labchim@mail.ru; n.m.barysheva@vniitf.ru;
Polyakov@ihim.uran.ru

Разработан сорбент, обладающий высокими значениями коэффициента распределения по отношению к ионам металлов, извлекаемым из растворов, в том

числе содержащих посторонний электролит. Это неорганический силикат на основе $\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$, являющегося преобладающей фазовой составляющей самораспадающихся шлаков металлургических производств. Практически необратимый сорбционный процесс осуществляется в широком интервале pH и концентраций растворов электролитов. Процесс происходит как за счет ионного обмена, так и вследствие растворения сорбента по некоторым (не всем) компонентам его состава, и сопровождается повышением pH и изменением состава раствора.

Для расширения области применения неорганических сорбентов класса двойных силикатов предложено использование их гранулированных форм. Разработан способ получения гранулированного сорбента, обеспечивающий диффузионную проницаемость и достаточно высокие сорбционные свойства по сравнению с порошкообразным вариантом. Гранулы сорбента представляют собой многофазную полиминеральную систему, структурные единицы которой связаны жестким кремнекислородным каркасом. Прочное удержание катионов тяжелых металлов обеспечивается на поверхности и в объеме гранул в пределах структурной устойчивости каркаса.

Показано, что данный сорбент, как в виде порошка, так и гранул, может быть применен в технологиях очистки загрязненных природных и техногенных вод для повышения pH и извлечения из них ионов тяжелых металлов и радионуклидов. Учитывая тот факт, что силикатный сорбент содержит те же химические фазы, что и цементные материалы, он позволяет, не только более эффективно решать технологические задачи очистки растворов, но и отверждать, иммобилизовать отработанный сорбционный продукт в составе цементов.

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF NEW INORGANIC BISILICATE SORBENTS

G.G. Mikhaylov¹, N.M. Barysheva², T.M. Lozinger¹,
A.G. Morozova¹, E.V. Polyakov³

¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

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

³Institute of Solid State Chemistry, Ural Branch of RAS,
Yekaterinburg, Russia

E-mail: labchim@mail.ru; n.m.barysheva@vniitf.ru;
Polyakov@ihim.uran.ru

A sorbent is developed which has high distribution coefficients with respect to metal ions extracted from solutions including those containing a foreign electrolyte. This is an inorganic silicate based on $\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ – a phase which prevails in self-scattering slag from metallurgical works. Practically irreversible sorption is attained in electrolytic solutions with widely variable pH and concentrations. The process occurs through ion exchange and dissolution of some (not all) sorbent components. It makes pH higher and changes the composition of the solution.

To extend the applicability range of inorganic bisilicate sorbents, it is proposed to use them in the form of granules. A sorbent granulation method is developed. It ensures

diffusion permeability and rather high sorption properties compared with powdered sorbents. Each granule is a multi-phase polymineral system whose structural units are bound by a rigid silicon-oxygen framework. Heavy metal cations are fast retained on the surface and inside the granules within the structural stability range of their framework.

It is shown that the sorbent, granulated or powdered, can be used in natural and technogenic water purification technologies for deacidification and extraction of heavy metals and radionuclides. Since the silicate sorbent consists of the same chemical phases as cement materials, it helps not only make purification more effective, but also solidify and immobilize the sorption product in cements.

5-28

РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СУБЛИМАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ МОЛИБДЕНА-99

Ю.А. Занора¹, И.А. Истомина¹,
С.В. Степанов¹, Г.В. Савватимов²

¹Производственное объединение «Маяк», Озёрск, Россия

²НИИ НПО «Луч», Подольск, Россия

E-mail: mayak@po-mayak.ru

На ФГУП ПО «Маяк» в ближайшее время планируется возобновление производства препарата молибдена-99 для генераторов технеция-99m.

В соответствии с технологической схемой, для обеспечения высокого качества препарата молибдена-99, на заключительной стадии очистки целесообразно проводить его сублимацию. Процесс сублимации (отгонки в газовую фазу с последующей конденсацией) молибдена сейчас используется на целом ряде зарубежных установок. К сожалению, аппаратное оформление этих процессов неизвестно. В связи с этим был проведен поиск конструктивного решения для сублимационного передела. Основываясь на результатах проведенных исследований на ФГУП ПО «Маяк» совместно с ФГУП НИИ НПО «Луч» (г. Подольск), была разработана конструкция сублимационной камеры.

Камера предназначена для проведения процессов упаривания, отгонки примесей, а так же сублимации и десублимации триоксида молибдена.

В качестве материала камеры используется особо чистый карбид кремния. Обогреву подлежит приемная часть камеры и примыкающие к ней отрезки отводящих линий. Допустимая температура эксплуатации составляет 1300°C. Охлаждение оборудования происходит за счет теплопроводности, естественной конвекции и излучения. Объем приемной части камеры, где производится упаривание, составляет порядка 350 см³. Это с запасом обеспечивает прием всего объема раствора на упаривание. Температура зоны конденсации молибдена не должна превышать 600°C.

Эффективность работы сублимационного оборудования в реальных условиях действующего производства на опытных операциях составила от 40 до 68%. Механическая и химическая устойчивость материала была подтверждена в агрессивных средах и высоких радиационных полях.

DEVELOPMENT OF EQUIPMENT FOR MO-99 PURIFICATION BY SUBLIMATION

Yu.A. Zanora¹, I.A. Istomin¹,
S.V. Stepanov¹, G.V. Savvatimov²

¹Federal State Unitary Enterprise «MAYAK» Production Association», Ozyorsk, Russia

²«Scientific and Research Institute Scientific and Production Association «LOUCH», Podolsk, Russia

E-mail: mayak@po-mayak.ru

MAYAK PA intends to recommence in the next future the production of ⁹⁹Mo preparation for ^{99m}Tc generators.

According to the process flowsheet it is advisable to sublime ⁹⁹Mo preparation at the final stage of its purification to assure the high quality of the preparation. Molybdenum sublimation process (distillation into the gas phase followed by condensation) is being applied currently in many facilities abroad. Unfortunately, equipment provision of these processes is not known. That is why a design solution for sublimation unit was searched for. Based on the investigation results, which were carried out by MAYAK PA personnel in cooperation with the scientific institution LUOCH in Podolsk, a sublimation cell was developed.

The cell is designed for evaporation, impurity distillation, as well as molybdenum trioxide sublimation and desublimation.

Very-high-purity silicon carbide is used as the cell construction material. Receiving department of the cell and adjacent parts of the outlet lines are to be heated. Permitted operational temperature is 1300°C. Equipment is cooled due to heat conduction, natural convection and emission. The volume of the receiving department of the cell, where the evaporation is carried out, amounts about 350 cm³. It is well enough to receive the total solution for evaporation. The temperature in the molybdenum condensation zone may not exceed 600°C.

The efficiency of the sublimation equipment under the real production conditions in test operations was 40 to 68%. Mechanical and chemical stability of material was verified in corrosive media and strong radiation fields.

ределения физико-химического состояния актинидных атомов в объеме сложных твердофазных систем ограничиваются в первую очередь трудностью интерпретации экспериментальных данных. Несмотря на очевидную перспективность установления связи «спектр-состояние атома» на основании прямого моделирования электронной структуры и спектров методами квантовой химии, такой подход до сих пор не получил широкого распространения как ввиду крайней громоздкости традиционных схем релятивистских расчетов твердых тел или кластеров, так и вследствие численной неустойчивости результатов из-за малости химических сдвигов по сравнению с энергиями рентгеновских переходов. Предлагаемый новый метод определения химических сдвигов на основе расчета электронной структуры исследуемых систем в рамках приближения релятивистских псевдопотенциалов и использования техники апостериорного восстановления волновых функций, сглаженных в окрестностях атомных ядер в расчете с псевдопотенциалом, характеризуется высокой экономичностью. Полученное нами представление самой величины химического сдвига энергии перехода в виде среднего значения некоторого квантовомеханического оператора существенно уменьшает возможность появления численных неустойчивостей. Важнейшим достоинством метода является полностью релятивистское («четырёхкомпонентное») описание основных электронных оболочек, с которыми связан рентгеновский переход, на основании «двухкомпонентных» (учитывающих зависящие от спина взаимодействия) и даже «однокомпонентных» (скалярно-релятивистских) расчетов соединений, у которых только валентные и субвалентные оболочки рассматриваются явно. Результаты расчетов химических сдвигов для Kα_{1, 2} и L переходов IV-й группы катионов металлов в отношении нейтральных атомов представлены. Результаты расчета химических сдвигов Kα₁-линии на свинце в молекулах PbO и PbF₂ по отношению к нейтральному атому свинца также обсуждаются. Точность используемых приближений и качество проведенных расчетов анализируются. Обсуждаются также перспективы применения предложенного подхода к оценке и прогнозированию свойств минералоподобных керамических матриц для иммобилизации актинидной фракции высокоактивных отходов ядерного топливного цикла.

Работа поддержана грантом РФФИ № 10-03-00727-а.

5-29

ХИМИЧЕСКИЕ СДВИГИ ЖЕСТКИХ РЕНТГЕНОВСКИХ ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЙ: НОВЫЙ НЕЭМПИРИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА

А.В. Титов¹, Ю.В. Ломачук¹,
А.В. Зайцевский^{1,2}, Р.В. Богданов³

¹Петербургский институт ядерной физики,
Гатчина, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: titov@pnpi.spb.ru; zaitsevskii@kintechlab.com;
bogdanov@RB7584.spb.edu

Возможности рентгеновской эмиссионной спектроскопии как уникального неразрушающего метода оп-

CHEMICAL SHIFTS OF HARD X-RAY EMISSION LINES: A NEW AB INITIO COMPUTATIONAL METHOD

A.V. Titov¹, Yu.V. Lomachuk¹,
A.V. Zaitsevsky^{1,2}, R.V. Bogdanov³

¹Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, Russia

²National Research Center "Kurchatov Institute",
Moscow, Russia,

³St.Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

E-mail: titov@pnpi.spb.ru; zaitsevskii@kintechlab.com;
bogdanov@RB7584.spb.edu

Advantages of X-ray emission spectroscopy as a unique non-destructive method for determining the physical-

chemical state of the actinide atoms in the bulk of complex solid systems are restricted first of all by the difficulty of interpreting the experimental data. Despite the obvious promise of establishing the relationship «spectrum-atomic state» through direct simulation of the electronic structure and spectra by the quantum chemistry methods, this approach is still not widely used due to both the extreme complexity of traditional schemes of relativistic calculations of solids or clusters, and because of the numerical instability when calculating the small chemical shifts in comparison with the energies of X-ray transitions. The proposed new method for determining the chemical shifts by calculating the electronic structure of the systems within the relativistic pseudopotential approximation and using the techniques of a posteriori restoration of wave functions (smoothed in the vicinity of the atomic nuclei at the pseudopotential calculation stage) is characterized by high efficiency. We have derived the expression for the chemical shift of the transition energy (as an average value of a quantum mechanical operator) which significantly reduces the possibility of numerical instabilities. The major advantage of the method is in the fully relativistic («four-component») description of the core shells, with which the X-ray transition is associated, on the basis of «two-component» (taking into account the spin-dependent interactions), and even «one-component» (scalar-relativistic) calculations of the compounds, which have only valence and subvalence shells considered explicitly. The results of our calculations of chemical shifts for the $K\alpha_{1,2}$ and L transitions of the IV-th group metal cations with respect to the neutral atoms are presented. The calculations of chemical shifts for $K\alpha_1$ -line in the Pb-core transition within PbO and PbF₂ with respect to the neutral Pb are also discussed. The accuracy of the used approximations and quality of the performed calculations is analyzed. We also discuss the prospects of the proposed approach for evaluating and predicting the properties of mineral-ceramic matrices for immobilization of actinide fraction of high-level waste nuclear fuel cycle. This work was supported by the RFBR grant N 10-03-00727-a.

5-30

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЫХОДА КСЕНОНА ПОД ОБОЛОЧКУ ТВЭЛА
РЕАКТОРА ВВЭР С УЧЕТОМ ОБРАЗОВАНИЯ
ПУЗЫРЬКОВ**

В.М. Алюшин

Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», Москва, Россия

Изучается процесс диффузии атомов газа и образования пузырьков газа в тепловыделяющем элементе водо-водяного энергетического реактора. Сформулирована математическая модель миграции газообразных продуктов в твэле с учетом зависимости коэффициента диффузии и скорости выделения атомов газа от температуры. При анализе процессов миграции использованы численные и аналитические методы. Получены зависимости от расстояния до центра твэла и от времени концентраций атомов, радиуса пузырьков и их количес-

тва в диоксиде урана. Определена зависимость от времени концентрации газа под оболочкой твэла. Установлены радиальное распределение пористости ядерного топлива и ее эволюция во времени.

5-31

**УЧЕТ И ВЕРИФИКАЦИЯ ЯДЕРНЫХ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ПРОГРАММЕ IThMC**

В.И. Костюченко¹, О.Б. Рязанцев¹,
С.И. Самарин², А.С. Углов²

¹ГНЦ РФ – Институт теоретической и
и экспериментальной физики, Москва, Россия

²Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: kostjuch@itep.ru; a.s.uglov@vniitf.ru

В области протонной терапии с начала нового столетия произошел огромный прорыв: теперь уже несколько десятков специализированных центров работает практически на всех континентах и каждый год число их увеличивается. Одной из основных составляющих, необходимых для проведения протонной терапии, является система планирования облучения (СП). Как правило, для ускорения расчетов в этих СП используются аналитические методы, достоверность и точность которых не позволяет в полной мере реализовывать достоинства самого метода лечения. «Золотым» стандартом, позволяющим верифицировать расчеты, произведенные такими СП, являются расчеты, выполненные с использованием метода Монте-Карло (МК). В одном из старейших в мире медицинских протонных центров – ИТЭФ (г. Москва) – программа МК входит в СП как ее составляющая часть. Этот программный комплекс МК, имеющий название IThMC, разработан специалистами ВНИИТФ (г. Снежинск) в ходе выполнения Проекта МНТЦ № 3563.

Для моделирования взаимодействия протонного излучения с облучаемым объектом необходимо учитывать три основных процесса: электромагнитное торможение протонов в веществе, многократное кулоновское рассеяние и ядерные взаимодействия. Именно этой последней составляющей и посвящена настоящая работа. Ядерные реакции, в отличие от торможения и рассеяния (для которых есть точные и достаточно простые теории), при теоретическом моделировании являются значительно более сложными и существенно менее проверенными.

Обзор литературы показал, что в мире в настоящее время нет единого подхода к моделированию процессов упругих и неупругих ядерных взаимодействий, что приводит к различию результатов расчетов с помощью различных программ МК. Сами по себе эксперименты по верификации этих процессов сложны. Однако есть две классические экспериментальные работы [1, 2], которые проведены весьма аккуратно и столь же аккуратно описаны, что позволяет с их помощью унифицировать процесс верификации. В настоящее время считается правилом хорошего тона проводить верификацию каждой новой программы, использующей метод МК, с помощью данных из этих работ.

В докладе приводится описание моделируемых задач, результаты расчетов с помощью программы IThMC и сравнение этих результатов, как с экспериментальными данными работ [1, 2], так и с аналогичными расчетами, выполненными другими авторами. Кроме того, анализируется различие расчетных и экспериментальных данных и последствия, к которым они могут привести при расчете конкретного дозового поля и его характеристик.

Литература

1. Gottschalk B. and Platais R. Nuclear interactions of 160 MeV protons stopping in copper: A test of Monte Carlo nuclear models, *Medical Physics*, Vol. 26, No. 12, p. 2597–2601, December 1999.
2. Paganetti H., Gottschalk B. Test of GEANT3 and GEANT4 nuclear models for 160 MeV protons stopping in CH₂, *Medical Physics*, Vol. 30, No. 7, p. 1926–1931, July 2003.

NUCLEAR INTERACTIONS IN THE ITHMC CODE: IMPLEMENTATION AND VERIFICATION

V.I. Kostyuchenko¹, O.B. Ryazantsev¹,
S.I. Samarin², A.S. Uglov²

¹Institute of Theoretical and Experimental Physics,
Moscow, Russia

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

E-mail: kostjuch@itep.ru; a.s.uglov@vniitf.ru

A great breakthrough in proton therapy has happened in the new century: several tens of dedicated centers are now operated throughout the world and their number increases every year. An important component of proton therapy is a treatment planning system. To make calculations faster, these systems usually use analytical methods whose reliability and accuracy do not allow the advantages of this method of treatment to implement to the full extent. Predictions by the Monte Carlo (MC) method are a «gold» standard for the verification of calculations by these systems. At the Institute of Experimental and Theoretical Physics (ITEP) which is one of the eldest proton therapy centers in the world, an MC code is an integral part of their treatment planning system. This code which is called IThMC was developed by scientists from RFNC–VNIITF (Snezhinsk) under ISTC Project 3563.

Proton interaction with an exposed object material needs to be modeled with account for three basic processes: electromagnetic stopping of protons in matter, multiple coulomb scattering and nuclear interactions. Just the last type of processes is the topic of this paper. Unlike proton stopping and scattering for which rather accurate and simple theories exist, nuclear interactions are much more difficult to model and verify.

Our study of the literature shows that there is no a unique approach to the simulation of elastic and inelastic nuclear interactions and calculations with different MC codes often differ. Experiments for the verification of these processes are very complicated. But there are two classical experimental efforts [1, 2] that were done and described very accurately and can be used to unify verification. Now it is a rule of good form to verify each new MC code against data provided in these papers.

The paper describes the problems which are solved, results obtained with the IThMC code, and their comparison with experimental data from [1, 2] and calculations reported by other authors. Also, the authors analyze differences between calculated and experimental results and their possible effect on the calculation of a particular dose field and its characteristics.

References

1. Gottschalk B. and Platais R. Nuclear interactions of 160 MeV protons stopping in copper: A test of Monte Carlo nuclear models, *Medical Physics*, Vol. 26, No. 12, p. 2597–2601, December 1999.
2. Paganetti H., Gottschalk B. Test of GEANT3 and GEANT4 nuclear models for 160 MeV protons stopping in CH₂, *Medical Physics*, Vol. 30, No. 7, p. 1926–1931, July 2003.

5-32

САМООРГАНИЗАЦИЯ МОЛЕКУЛ В СМЕСЯХ ВОДА–ЛЕЦИТИН ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАДИАЦИИ

В.В. Зайцев¹, Н.Б. Зайцева²,
О.Г. Польский¹, Д.Ю. Шакин¹

¹ГУП Московское научно-производственное объединение
«Радон», Москва, Россия

²Закрытое акционерное общество им. Н.А. Семашко
Москва, Россия

E-mail: mocconfere@rambler.ru

Плоский капилляр с молекулярной системой лецитина в воде обладает свойствами ячейки с лиотропным жидким кристаллом. Такими же свойствами обладает и плоский капилляр с плазмой крови. В зависимости от степени разрушения молекул лецитина в поле зрения поляризационного микроскопа образуются так называемые текстуры. Ранее было показано [1], что обработка альфа- и гамма-излучениями позволяет получить в поле зрения поляризационного микроскопа текстуры, свидетельствующие о разрушении фосфолипидов по механизму свободнорадикального перекисного окисления липидов. Регистрируются и мишенные эффекты. В настоящей работе обосновывается возможность определения значений Керма (Гр в системе СИ) альфа излучения, вводимой в систему смесей с биологическими молекулами, что в свою очередь позволяет связать значения вводимой в молекулярную систему дозы с эффектами изменения в самоорганизации.

В качестве модели введения энергии альфа-излучателей в биологическую модель смеси лецитина (5%) с водой было принято обычное уравнение для поглощенной дозы:

$$X_i D = (\text{ЭРОА}(R_n + T_n) T V \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}) / m,$$

где X_i – ненаблюдаемая случайная величина; D – поглощенная доза, Гр; $\text{ЭРОА}(R_n + T_n)$ – эквивалентная равновесная объемная активность радона и торона в воздухе, Бк·м³; T – время барботации, сек; V – объем радонсодержащей смеси, пропускаемый за время T , л; $6 \cdot 10^6$ – энергия излучения альфа-частиц, эВ; m – масса пробы смеси лецитина, кг; $1,6 \cdot 10^{-19}$ – коэффициент, учитывающий систему единиц.

В исследованиях использованы установки и методы: фотометрии для регистрации продукта СПОЛ – маломолекулярного диальдегида; источник излучения цезий-137 с активностью до 0,014 Кюри и дозой облучения до 2 мГрей в день, установка Gammacell-220 (Англия) с кобальтом-60 и мощностью дозы один Грей в минуту; оригинальная установка барботации газа с контролируемым и измеряемым ЭРОА радона и торона; а также спектральная, биофизическая и клиническая аппаратура кардиологи. Работа оригинальной экспериментальной установки позволяла регулировать и точно определять объем V проходящей радонсодержащей смеси за время T , и изменяя T , m и V , регулировать вводимую дозу K в соответствии с математической моделью.

Согласно теории точечной теплоты, радиация вызывает нагревание отдельных точек до очень высокой температуры, что и ведет, в конечном счете, к биологическому поражению. Несмотря на то, что теория точечной теплоты была отвергнута, от нее остался «принцип попадания». В настоящих исследованиях изменение дозы альфа-излучения и экранирование гамма-излучения показало, что «принцип попадания», эффект мишеных эффектов развивается за 1–2 часа, а СПОЛ за 24–26 часов.

Литература

1. Зайцев В.В., Польский О.Г., Шакин Д.Ю. Журнал Жидкие кристаллы и их практическое использование, 2010, 3, 91–93.

SELF-ORGANIZING OF MOLECULES IN MIXES WATER - LECITHIN UNDER ACTION OF RADIATION

V.V. Zaytsev¹, N.B. Zaytseva²,
O.G. Polsky¹, D.Yu. Shakin¹

¹State Unitary Enterprises Moscow scientifically a production association «Radon», Moscow, Russia

²Joint-stock company it N.A. Semashko Moscow, Russia
E-mail: mocconfere@rambler.ru

The flat capillary with molecular system of lecithin in water possesses properties of a cell with a liquid crystal. The same properties the flat capillary with plasma of blood possesses also. Depending on a degree of destruction of molecules of lecithin in sight a polarizing microscope so-called structure are formed. Earlier it has been shown [1] that processing an alpha- and scale-radiations allows receiving in sight a polarizing microscope the structures testifying to destruction on the mechanism of freely radical oxidation lipids. Effects of collisions are registered also. In the present work (Gy the opportunity of definition of values Керма proves in system of SI) an alpha of the radiation, entered in system of mixes with biological molecules, that in turn allows connecting values of a doze entered into molecular system with effects of change in self-organizing.

As model of introduction of energy of alpha emitters in biological model of a mix of lecithin (5%) with water the usual equation for the absorbed doze was accepted:

$$XiD = (EEVA (Rn + Tn) TV \cdot 10^{-3} 6 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}) / m,$$

where Xi – not observable random variable; D – the absorbed doze, Gr; $EEVA (Rn + Tn)$ – equivalent equilibrium volumetric activity of radon and toron in air, Bq·m³; T – time of passage, S; V – the volume radon of a containing mix passed in time T , L; $6 \cdot 10^6$ – energy of radiation of alpha particles, ev; m – weight of test of a mix of lecithin, kg; $1,6 \cdot 10^{-19}$ – the factor considering system of units.

In researches installations and methods are used: microscopy for registration of product PROL – dialdehyd of malonic; a source of radiation caesium-137 with activity up to 0,014 Cu and a doze of an irradiation up to 2 mGy in day, installation Gammacell-220 (England) with cobalt-60 and capacity of a doze one Heat in a minute; original installation of passing gas with controllable and measured EEVA radon and toron; and also the spectral, biophysical and clinical equipment cardiologists. Work original experimental installation allowed to adjust and precisely to determine volume V of a containing mix passing radon in time T , and changing T , m and V to adjust an entered doze to according to mathematical model.

According to the theory of dot heat, radiation causes heating separate points to very heat, as conducts, finally, to biological defeat. In spite of the fact that the theory of dot heat has been rejected, from it there was «a principle of hit». In the present researches change of a doze an alpha- and shielding scale-radiations has shown radiations, that «the principle of hit», effect of direct collisions of effects develops for 1–2 hours, and PROL for 24–26 hours.

Reference

1. Zaytsev V.V., Polsky O.G., Shakin D. Yu. Magazine Liquid crystals and their practical use, 2010, 3, 91–93.

5-33

ВНЕДРЕНИЕ СТЕРЕОТАКСИЧЕСКОЙ РАДИОХИРУРГИИ НА РОБОТИЗИРОВАННОМ ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ «СУБЕР KNIFE» В ЛЕЧЕНИЕ МЕЛАНОМЫ ХОРИОИДЕИ В ЧЕЛЯБИНСКОМ ОБЛАСТНОМ КЛИНИЧЕСКОМ ОНКОЛОГИЧЕСКОМ ДИСПАНСЕРЕ

И.Е. Панова, А.В. Важенин, Е.И. Гютнер,
Л.Е. Семенова, Е.Ю. Лукина, Ю.В. Галямова,
Е.В. Новиков, И.А. Важенин
Челябинский областной клинический
онкологический диспансер, Челябинск, Россия
E-mail: ElenaGuntner@yandex.ru

Перспективность применения стереотаксической радиохирургии в лечении меланомы хориоидеи определяется ее высокой эффективностью (до 98%), возможностью использования в лечении «больших» меланом хориоидеи [1, 2].

В Челябинском областном клиническом онкологическом диспансере в 2011 году внедрена методика стереотаксической радиохирургии в лечении меланомы хориоидеи, пролечено два пациента с диагнозом меланома хориоидеи Т3N0M0 III стадии, средняя высота опухоли – 10,7 мм, средняя ширина опухоли – 14,3 мм. На подготовительном этапе лечения изготавливалась

индивидуальная фиксирующая маска. Топометрическая подготовка пациента включала компьютерную и магнитно-резонансную томографию с контрастом, распределение объема облучения, составление плана лечения (планирующая система Multyplan), «оконтуривание» опухоли в осевых проекциях. Доза облучения составила 19–25 Гр на поверхность опухоли с защитой критических структур органа зрения в условиях ретробульбарной анестезии и акинезии глазного яблока.

После окончания лечения в зоне лучевого воздействия видимых изменений не наблюдалось. На 3 сутки – лучевая реакция максимальной степени выраженности. После лечения, при сроках наблюдения 1–6 месяцев имела место стабилизация процесса, по данным УЗИ – отсутствие кровотока в опухоли.

Применение стереотаксической хирургии в лечении меланомы хориоидеи сопровождается возникновением выраженных лучевых реакций в раннем постлучевом периоде, определяет перспективность применения методики и требует дальнейших исследований.

Литература

1. Dieckmann K., Georg D., Zehetmayerb M., et al. LINAC based stereotactic radiotherapy of uveal melanoma: 4 years clinical experience // *Radiotherapy and Oncology*. – 2003. – Vol. 67. – P. 199–206.
2. Muacevic A., Nentwich M., Wowra B., et al. Development of a Streamlined, Non-invasive Robotic Radiosurgery Method for Treatment of Uveal Melanoma // *Technology in Cancer Research and Treatment*. – 2008. – Vol. 7. – No. 5. – P. 369–373. ISSN 1533–0346.

INTRODUCTION OF STEREOTAKSICHESKY RADIOSURGERY ON THE ROBOTIZED LINEAR ACCELERATOR «CYBERKNIFE» IN TREATMENT OF UVEAL MELANOMA IN CHELYABINSK THE REGIONAL ONCOLOGICAL CLINIC

I.E. Panova, A.V. Vagenin, Y.I. Gytner,
L.E. Semenova, E.Yu. Lukina, Yu.V. Galyamova,
E.V. Novikov, I.A. Vagenin

Chelyabinsk the Regional Oncological Clinic,
Chelyabinsk, Russia

E-mail: ElenaGuntner@yandex.ru

Perspectivity of application stereotaksicheskoy radiosurgery in treatment of a uveal melanoma is defined by its high efficiency (to 98%), possibility of use in treatment of the «big» uveal melanomas [1, 2].

In Chelyabinsk regional oncological clinic in 2011 the technique stereotaksicheskoy radiosurgeries in treatment of a uveal melanoma is introduced, is treated two patients with the diagnosis uveal melanoma T3N0M0 III stages, average height of a tumour – 10,7 mm, average width of a tumour – 14,3 mm. At a preparatory stage of treatment the individual fixing mask was made. The preparation of the patient included a computer and magnitno-resonant tomography with contrast, scoping of an irradiation, scheduling of treatment (planning system Multyplan), «around» tumours in axial projections. The dose of an irradiation has made 19-25 Gy on a surface of a tumour with protection of critical structures of an organ of vision in conditions retrobulbar anesthetics.

After the termination of treatment in a zone of beam influence of visible changes it was not observed. For 3 days – beam reaction of the maximum degree of expressiveness. After treatment, at terms of supervision of 1–6 months stabilisation of process, according to ultrasonic – absence of a blood-groove in a tumour took place.

Application stereotaksicheskoy radiosurgeries in treatment of a uveal melanoma is accompanied by occurrence of the expressed beam reactions in the early postbeam period, defines perspectivity of application of a technique and demands the further researches.

References

1. Dieckmann K., Georg D., Zehetmayerb M., et al. LINAC based stereotactic radiotherapy of uveal melanoma: 4 years clinical experience // *Radiotherapy and Oncology*. – 2003. – Vol. 67. – P. 199–206.
2. Muacevic A., Nentwich M., Wowra B., et al. Development of a Streamlined, Non-invasive Robotic Radiosurgery Method for Treatment of Uveal Melanoma // *Technology in Cancer Research and Treatment*. – 2008. – Vol. 7. – No. 5. – P. 369–373. ISSN 1533–0346.

5-34

РАДИАЦИОННАЯ МЕДИЦИНА В ЧЕЛЯБИНСКОМ ОБЛАСТНОМ КЛИНИЧЕСКОМ ОНКОЛОГИЧЕСКОМ ДИСПАНСЕРЕ

А.В. Важенин, Е.В. Новиков

Челябинский областной клинический онкологический
диспансер, Челябинск, Россия

E-mail: roc_chel@mail.ru

Радиационная медицина – направления современной медицины, использующие радиоактивные вещества для диагностики и терапии в различных областях научной и практической медицины – в онкологии, кардиологии, неврологии и др.

Преимущества, а в ряде случаев и незаменимость методов радиационной медицины обусловили на протяжении нескольких последних десятилетий их устойчивое развитие и превращение в неотъемлемую часть клинической практики.

Челябинский областной клинический онкологический диспансер – одна из крупнейших клиник онкорadiологического профиля в РФ, являющаяся также организационно – методическим и консультативным центром. Медицинский персонал и медицинские физики диспансера прошли обучение в ведущих клиниках России, Европы, США.

Благодаря современному техническому оснащению все этапы подготовки пациента к лечению проходят в пределах диспансера: диагностика, планирование лучевого лечения, непосредственно лечение пациента.

Широкий спектр диагностического оборудования ГБУЗ «ЧОКОД» позволяет локализовать большинство известных злокачественных новообразований.

Диагностический технопарк ГБУЗ «ЧОКОД»:

1. ПЭТ-центр полный цикл производства радиофармпрепарата F-18 с диагностикой на ПЭТ/КТ сканерах Biograph 64 и Biograph 40.

2. Гамма-камера E-Cam диагностика Tm99.
3. Компьютерный томограф Aquillion 64.
4. Магнито-резонансный томограф SIGNA 1.5T HDe
5. Рентген-диагностическое оборудование.
6. Гамма-камера Mediso для отделения радионуклидной терапии с I-131.

Современные административно-информационные, планирующие системы, рабочие станции, симуляторы лучевого воздействия позволяют с высокой точностью спланировать и подвести предписанную дозу непосредственно в очаг опухоли.

Планирование лучевого воздействия:

1. XIO CE-3D, Focal, Mosaiq – для линейного ускорителя Elekta Synergy.
2. MultiPlan – для роботизированной радиохирургической системы CyberKnife.
3. HDRplus – для внутрисполостной терапии Multisource с Co-60.
4. Гаммаплан – для Theratron Elite и Theratron Equinox с Co-60.
5. PSID – для расчета брахитерапии с применением I-125.
6. Bebig Plaque Simulator – программа расчета для офтальмоаппликаторов с Ru/Ro-106.

Административно-информационная система Mosaiq передает планы лучевого лечения непосредственно на рабочие станции радиологического оборудования с которых осуществляется лечение пациентов.

Радиологическое оборудование для лечения:

1. Лучевая терапия Theratron Elite с Co-60.
2. Лучевая терапия Theratron Equinox с Co-60.
3. Линейные ускорители Elekta Synergy и SL-15.
4. Роботизированная радиохирургическая система CyberKnife.
5. Внутрисполостная терапия Multisource, АГАТ-ВУ, АГАТ-В2 с Co-60.
6. Брахитерапия с применением I-125.
7. Отделение радионуклидной терапии с I-131 и Sr-89.
8. Офтальмологическое отделение с Ru/Ro-106.
9. Отделение нейтронной терапии в г. Снежинске
10. Интраоперационное облучение Бэтатрон 10БЭ.
11. Близкофокусная рентгенотерапия Gulmay и РТА.

Таким образом, Челябинский областной клинический онкологический диспансер является клиникой полного цикла лечения пациентов от ранней диагностики злокачественных новообразований до лечения.

RADIATION MEDICINE IN CHELYABINSK REGIONAL ONCOLOGY CLINIC

A.V. Vajenin, E.V. Novikov

Chelyabinsk Regional Oncological Clinic,
Chelyabinsk, Russia

E-mail: roc_chel@mail.ru

Radiation Medicine – modern area which is used radiation materials for diagnostics and therapy in different spheres of science and practical medicine (oncology, cardiology, neurology and etc.).

There are a lot of advantages. Besides, in some cases these methods are not replaceable, they become integral

part of clinical practice after decades due to its sustainable development.

Chelyabinsk Regional Oncology Clinic – one of the biggest oncology clinics in Russian Federation, also it is an organizational-methodological and consultative center. Medical personnel and medical physicians are done his trainings in leading Russian, Europe, and USA clinics.

Due to modern technical equipment all patient pretreatments performs within clinic: diagnostic, treatment planning, and treatment.

Broad spectrum of diagnostic equipment in Chelyabinsk Oncology Clinic allows us to detect majority known cancers.

Diagnostic equipment of Chelyabinsk Oncology Clinic:

1. PET center: allows to do a whole cycle of manufacturing of F-18 radiopharmaceutical with diagnostic on PET-CT Biograph 64 & Biograph 40.
2. Gamma-ray chamber E-Cam for diagnostic Tm99.
3. computerized tomographic system Aquillion 64.
4. MRI SIGNA 1.5T HDe.
5. X-ray diagnostic equipment.
6. Gamma-ray chamber Mediso for planar nuclear therapy with I-131.

Modern administrative-informational planning systems, work stations, simulator of radiation influence are allow to planning and treat a patient with high accuracy.

Radiation treatment planning:

1. XIO CE-3D, Focal, Mosaiq – for working with Elekta Synergy accelerator.
2. MultiPlan – for robotic radio surgery system CyberKnife.
3. HDRplus – for intracavitary therapy on Multisource with Co-60.
4. Гаммаплан – for Theratron Elite & Theratron Equinox with Co-60.
5. PSID- for brachytherapy planning with I-125.
6. Bebig Plaque Simulator – program for calculation ophthalmia applicators with Ru/Ro-106.

Administrative-informational system Mosaiq is working with treatments plans of a patient and realizes communication between treatment planning stations and radiological equipment.

Radiological equipment:

1. Theratron Elite с Co-60.
2. Theratron Equinox с Co-60.
3. Elekta Synergy & SL-15 accelerators.
4. Robotic radiosurgery system CyberKnife.
5. Intracavitary therapy on Multisource, АГАТ-ВУ, АГАТ-В2 with Co-60.
6. Brachytherapy with I-125.
7. Branch of planar nuclear therapy with I-131 & Sr-89.
8. Ophthalmological department with Ru/Ro-106.
9. Neutron therapy in Snezhinsk town.
10. Intraoperative treatment on Betatron 10BE.
11. Close-focus roentgenotherapy Gulmay & РТА.

Thereby, Chelyabinsk Regional Oncology Clinic is a clinic of a whole cycle of patient treatment all the way from early diagnostic of cancer to treatment.

5-35

**РАДИОНУКЛИДНАЯ ТЕРАПИЯ –
ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ
ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЫ НА ЮЖНОМ УРАЛЕ**

Е.Б. Васильева, Е.А. Сырчикова

Челябинский областной клинический онкологический
диспансер, Челябинск, Россия

E-mail: roc_chel@mail.ru

Радионуклидная терапия (РНТ) – уникальный метод системной лучевой терапии, основанный на селективном накоплении и лечебном воздействии радиофармпрепарата (РФП) в зоне патологического очага. Однако применение открытых радиоизотопов ограничено жесткими нормативами. рамках программы по усовершенствованию оказания онкологической помощи населению с февраля 2011 г. в Челябинском окружном клиническом онкологическом диспансере открыто отделение радионуклидной терапии, рассчитанное на 8 «активных» коек. Основные направлениями работы – диагностика и лечение заболеваний щитовидной железы I-131, лечение костных метастазов препаратами Sr-89.

За 2011 г. обследовано и пролечено 138 больных, в возрасте от 12 до 77 лет.

В плане комплексного лечения дифференцированного рака щитовидной железы послеоперационный курс радиойодтерапии (РЙТ) получили 37 больных, по поводу рецидива и локорегионарных метастазов – 18; в виде самостоятельной системной терапии при генерализованном метастатическом процессе – 15. Непосредственные результаты лечения оценивались по накоплению и распределению РФП на гамма-камере. 17 пациентам спланированы повторные курсы РЙТ.

При подозрении на рецидив заболевания 26 пациентам проведена диагностическая сцинтиграфия с I-131. В 13 случаях (50%) выявлено высокое накопление РФП в зоне удаленной щитовидной железы. У 3 пациентов процесс верифицирован. Выполнена операция. 9 человек получили курс РЙТ в режиме радиойодабляции.

С учетом индивидуального дозиметрического планирования пролечено 19 больных с тиреотоксикозом.

Sr-89 хлорид введен 15 больным с костными метастазами опухолей различных локализаций.

Таким образом, приоритетным направлением развития медицины на Южном Урале является внедрение в практику высоких инновационных технологий, позволяющих оказывать менее травматичную и более эффективную помощь. Одним из таких направлений является РНТ.

**RADIONUKLIDNAYA THERAPY –
AS PERSPECTIVE DIRECTION OF NUCLEUS
MEDICINE ON SOUTH URAL**

E.B. Vasilieva, E.A. Syrchikova

Chelyabinsk Regional Oncological Clinic,
Chelyabinsk, Russia

Radionuclide therapy (RNT) – an unique method system beam therapy, founded on selection accumulation and medical influence radiopharmpreparation (RFP) in zone of the pathological centre.

Within the framework of program on improvement of the rendering oncology help to population since February 2011 in Chelyabinsk region clinical cancer Center openly branch of radionuclide therapy, calculated on 8 «active» berths. The Main trends of the functioning – a diagnostics and treatment of the diseases of the thyroid gland with I-131, treatment bone metastasis with preparation of Sr-89.

For 2011 was examined and treatment 138 patients at age 12 before 77 years.

In plan of the complex treatment of the differentiated cancer of the thyroid gland postoperative course radioiodine therapy (RAIT) have got 37 sick, on cause of the relapse and regional metastasis – 18; in the manner of independent system therapy under generalization of metastasis process – 15. The Direct results of the treatment were valued on accumulation and distribution RFP on gamma-camera. 17 patients are planned repeated courses RYT.

At suspicion on relapse of the disease 26 patients are organized diagnostic scintigraphy with I-131. In 13 events (50%) is revealed high accumulation RFP in zone of the remote thyroid gland. Beside, 3 patients process was verification who's executed operation. 9 persons have got the course RYT in mode radioiodineablation

With provision for the individual dosimetry of the planning was treatment 19 sick with thyrotoxicosis.

Sr-89 is entered 15 sick with bone metastasis of the tumors different localization.

Thereby, priority direction of the development of medicine on South Ural is an introduction in practical person high innovation technology, allowing render less traumatic and more efficient help. One of such directions is RNT.

5-36

**ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ
ЧЕЛЯБИНСКОГО ЦЕНТРА ПОЗИТРОННОЙ
ЭМИССИОННОЙ ТОМОГРАФИИ**

А.В. Важенин, Н.Г. Афанасьева, Д.А. Важенина,
А.С. Зотова, Н.В. Супрончук, Н.В. Ваганов,
Д.Б. Калантаев, Д.Н. Чашухин, Д.В. Трофимов,
А.А. Варенникова, Е.А. ОзеровЧелябинский областной клинический
онкологический диспансер, Челябинск,
Челябинск, Россия

В Челябинском окружном клиническом онкологическом диспансере с 2 января 2011 г. пациентам проводится позитронная эмиссионная томография, совмещенная с компьютерной томографией (ПЭТ/КТ) с использованием синтезируемого радиофармпрепарата – F-18-фтордезоксиглюкозы.

ПЭТ/КТ было выполнено 860 пациентам с онкопатологией различных локализаций.

289 пациентам обследование было проведено для оценки распространенности заболевания; выявление прогрессирования злокачественных новообразований после проведенного комбинированного лечения – 209 пациентам; динамика проведенного химиотерапевтического лечения – 116 пациентам; дифференциальный диагноз патологических образований – 92 пациентам; выявление

первичного очага злокачественной опухоли – 40 пациентам. Всем пациентам в режиме «все тело» выполнялась диагностическая компьютерная томография, ПЭТ, с последующим совмещением изображения КТ и ПЭТ.

Из 498 пациентов, кому оценивалось распространённость процесса и выявление прогрессирования заболевания, метаболические изменения регионарных лимфатических узлов были выявлены у 284 пациентов, при этом размеры варьировали от 6 мм до 36 мм, во всех случаях гистологически подтвердилось злокачественное поражение. У 19 пациентов по данным УЗИ, КТ, МРТ диагностированы увеличенные лимфоузлы, в которых по ПЭТ/КТ не отмечалось гиперметаболизма или присутствовало незначительное накопление РПП. В этих случаях диагностирована не метастатическая лимфоаденопатия, что подтвердилось морфологическим исследованием.

Таким образом, были получены следующие результаты: в 24,3% случаев исследование позволяет изменить стадию заболевания, как с увеличением ее, так и с уменьшением, что приводит к адекватному выбору тактики лечения первичных пациентов и своевременному повторному хирургическому и химиолучевому лечению пациентов с продолженным ростом опухолевого процесса. ПЭТ/КТ также эффективна при оценке динамики проводимой консервативной терапии, что может повлиять на своевременное изменение тактики лечения. В 97% была адекватно проведена дифференциальная диагностика доброкачественных и злокачественных процессов в легких, печени, надпочечниках, что подтверждено гистологическим дообследованием, динамическим наблюдением. При выявлении первичного очага у пациентов с ранее выявленными метастазами, ПЭТ/КТ исследование оказалось малоинформативным.

THE FIRST RESULTS OF THE WORK REGIONAL PET-CENTER IN THE RUSSIAN FEDERATION

A.V. Vazhenin, N.G. Afanasjeva, D.A. Vazhenina,
A.S. Zotova, N.V. Supronchuk, N.V. Vaganov,
D.B. Kalantaev, D.N. Chashchuhin, D.V. Trofimov,
A.A. Varennikova, E.A. Ozerov

Chelyabinsk Regional Oncological Clinic,
Chelyabinsk, Russia

In the Chelyabinsk district clinical oncology dispensary on 2 January 2011 patients positron emission tomography, combined with computed tomography (PET/CT) with the use of synthesizable radiopharmaceutical – F-18-FDG.

PET/CT is performed 860 patients with oncopathology of various localizations.

289 patients, the survey was conducted to evaluate the prevalence of the disease; the identification of the progression of malignant neoplasms after the combined treatment – 209 patients; dynamics conducted chemical treatment of 116 patients; the differential diagnosis of pathological formations – 92 patients; the identification of the primary focus of malignant tumor – 40 patients. All patients in the «whole body» was carried out diagnostic ct scan, PET scan, with the subsequent combination of image

CT scan and PET imaging.

From 498 patients, who have estimated the prevalence of the process and the identification of progression of the disease, metabolic changes of the regional lymph nodes were identified in 284 patients, the size ranged from 6 mm to 36 mm, in all cases of histologically confirmed malignant lesion. In 19 patients according to the data of ULTRASOUND, CT, MRI diagnosed with enlarged lymph nodes, in which the PET/CT is not mentioned hypermetabolism or there was a slight accumulation of RPP. In these cases diagnosed not metastatic limfoadenopatia, which was confirmed by the morphological study.

Thus, the following results were obtained: 24.3% of the cases, the survey allows us to change the stage of the disease, as with the increase in its, so to reduce that leads to the adequate choice of tactics of treatment of primary patients and timely resurgical and chemical-gamma therapy the treatment of patients with the continuing growth of the tumor process. PET/CT is also effective in assessing the dynamics of the ongoing conservative therapy, which may affect the timely change of tactics of treatment. In 97% was adequately carried out differential diagnosis of benign and malignant processes in the lung, liver, adrenal glands, which is confirmed by histology doobsledovaniem, dynamic observation. When identifying the primary focus in patients with previously identified metastases, PET/CT study was uninformative.

5-37

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ДОЗОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ДЛЯ НЕЙТРОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ТОНКОГО ЛУЧА

А.Н. Моисеев^{1, 2}, В.А. Климанов¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», Москва, Россия

²ФНКЦ ДГОИ, Москва, Россия

E-mail: VAKlimanov@mephi.ru; info@niidg.ru

Введение

Использование нейтронного излучения в лучевой терапии носит преимущественно экспериментальный характер, но, тем не менее, ощущается острая нехватка в компьютерном дозиметрическом планировании нейтронной лучевой терапии. Планирование осуществляется либо по эмпирическим методам, применимым только к данной терапевтической установке, либо с использованием программ Монте-Карло общего назначения, скорость расчета в которых обычно неприменима даже для традиционного прямого планирования.

Метод тонкого луча нашел очень широкое применение в дистанционной фотонной лучевой терапии. Несмотря на недостатки метода, которые в основном связаны с неточностью вычисления дозы для гетерогенных сред, скорость данного алгоритма на сегодняшний день оставляет его вне конкуренции для решения задач оптимизации. Кроме того, тонкий луч позволяет вычислять абсолютные дозы, и, следовательно, применим для подсчета мониторинговых единиц, в том числе для верификации расчетов, произведенных другими методами.

Материалы и методы

Метод тонкого луча (ТЛ) состоит в расчете дозового распределения при интегрировании дозового ядра $K(x, y, z)$ по площади поперечного сечения пучка излучения S :

$$D(x, y, z) = \int_S K(x - x', y - y', z) dx' dy'$$

Для вычисления дозового ядра $K(x, y, z)$ использовалась программа моделирования переноса методом Монте-Карло (МК) MCNP. Аналогичные вычисления проводились также в тестовых расчетах, позволяющих оценить согласие вычислений методами МК и ТЛ.

Для описания всего многообразия спектров, в данной работе использовалось многогрупповое приближение спектров. Но, несмотря на формальный универсализм, для вычисления некоторых поправок и сравнения результатов расчетов необходимо рассматривать определенные спектры, сопоставимые с используемыми в клинической практике. В данной работе рассматривались пять спектров нейтронов, часто встречаемые на клинических установках для терапии быстрыми нейтронами.

Расчеты методом МК позволяют получить только дискретные значения дозовых ядер $K(x, y, z)$, что сильно снижает скорость интегрирования. Поэтому в работе исследовались аппроксимации дозовых ядер рассеянного нейтронного излучения аналитическими функциями и разные подходы к интегрированию.

Заключение

Проведенные в работе исследования показали возможности и ограничения использования метода ТЛ для дозиметрического планирования дистанционной нейтронной терапии. Результаты работы опубликованы в [1–3].

Литература

1. Моисеев А.Н., Климанов В.А. Дозовые распределения тонкого луча нейтронов в воде. – Альманах клинической медицины, т. XVII, часть 1, сс. 350–4, 2008.
2. Моисеев А.Н., Климанов В.А. Дозовое распределение в цилиндрическом водном фантоме от тонкого луча нейтронов для 28 групп энергий в диапазоне 0–14,5 МэВ. – Медицинская физика, № 2 (38), с. 29–33, 2008.
3. Моисеев А.Н. Определение дозовых распределений в биологических тканях для полей нейтронов на основе метода тонкого луча: дисс. – Москва, 2011.

DOSE CALCULATION ALGORITHM FOR NEUTRON RADIOTHERAPY BASED ON PENCIL BEAM METHOD

A.N. Moiseev^{1,2}, V.A. Klimanov¹

¹Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

²NIIDG, Moscow, Russia

E-mail: VAKlimanov@mephi.ru; info@niidg.ru

Introduction

The usage of neutron radiation for radiotherapy has primary experimental nature; nevertheless it's clearly seen the lack of computational treatment planning. Calculations use either measurement-driven empirical models, limited for certain equipment, or general purpose Monte-Carlo codes, whose calculation times are acceptable even for conventional «non-inverse» planning.

Pencil beam method is widely accepted in teletherapy. Though it has some drawbacks, especially for calculation accuracy in heterogeneous media, algorithm's speed is suitable for inverse planning. In addition, pencil beam is able to calculate absolute doses thus can be used for monitor units counting, including verification of different calculations.

Materials and methods

Pencil beam (PB) method uses integration of dose kernel $K(x, y, z)$ cross field size S to rebuild dose distribution $D(x, y, z)$:

$$D(x, y, z) = \int_S K(x - x', y - y', z) dx' dy' \quad (1)$$

In order to calculate $K(x, y, z)$ we used general purpose Monte-Carlo (MC) code MCNP. The same program was used also for PB benchmarking. Multi-group approach, used for kernels calculation, virtually allows calculation for arbitrary spectrum. Nevertheless we took five common spectra to investigate accuracy and establish according corrections.

The output of MC calculations is discrete kernel $K(x, y, z)$ data and do not allow fast calculations. To avoid this limitation we investigate different dose kernels approximations and integrations.

Conclusion

Researches of this paper show benefits and limitations of PB method for neutron teletherapy treatment planning. Additional information can be found elsewhere [1–3].

References

1. Моисеев А.Н., Климанов В.А. Дозовые распределения тонкого луча нейтронов в воде. – Альманах клинической медицины, т. XVII, часть 1, с. 350–4, 2008.
2. Моисеев А.Н., Климанов В.А. Дозовое распределение в цилиндрическом водном фантоме от тонкого луча нейтронов для 28 групп энергий в диапазоне 0 – 14,5 МэВ. – Медицинская физика, № 2 (38), с. 29–33, 2008.
3. Моисеев А.Н. Определение дозовых распределений в биологических тканях для полей нейтронов на основе метода тонкого луча: дисс. – Москва, 2011.

5-38

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ РОБОТИЗИРОВАННОЙ РАДИОХИРУРГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «СУБЕРКНИФ» («КИБЕРНОЖ») В УСЛОВИЯХ ЧЕЛЯБИНСКОГО ОКРУЖНОГО КЛИНИЧЕСКОГО ОНКОЛОГИЧЕСКОГО ДИСПАНСЕРА

А.В. Важенин, Ю.В. Галямова, Е.Ю. Лукина,
Е.Я. Мозерова, Е.В. Новиков, Н.В. Калыганова,
И.А. Важенин, О.Н. Чернова, Е.А. Озеров

Челябинский областной клинический
онкологический диспансер, Челябинск, Россия

В Челябинском окружном клиническом онкологическом диспансере за первые семь месяцев эксплуатации роботизированного линейного ускорителя «CyberKnife» (Кибернож) с энергией 6 МВ лечение по-

лучили 140 пациентов с новообразованиями различных локализаций. Возраст пациентов варьировал от 12 до 80 лет (средний возраст 52,5 лет), мужчины составили 45,7% (64 пациента), женщины – 54,3% (76 пациенток). Лечение проводилось пациентам с новообразованиями различных локализаций. Опухоли головного мозга были у 76 пациентов, спинного мозга – 7, головы и шеи – 13, метастатическое поражение имело место у 23 пациентов. Среди опухолей головного мозга преобладали менингиомы (35), аденомы гипофиза (16), рецидивы глиом (19), вестибулярные шванномы (7). Артериовенозные мальформации подверглись лучевому воздействию у 8 пациентов.

Впервые в Российской Федерации применены уникальные возможности Киберножа: радиохирургическое лечение увеальной меланомы проведено 3 пациентам, а 2 пациентам осуществлено лечение рака легкого с применением систем слежения за опухолью XSight Lung и синхронизации с дыханием Synchrony.

План лечения определялся на основании международных рекомендаций с учетом размеров, особенностей конфигурации опухоли, близости критических структур. Количество фракций составляло от 1 до 5. Однократное подведение дозы от 12 Гр до 24 Гр было проведено 23 пациентам.

Всем пациентам проведено лечение в запланированном объеме. Необходимости в прерывании лечения по соматическим причинам не возникало. Не отмечено нарастания очаговой неврологической симптоматики. Отсутствовали признаки поражения органов риска.

При оценке объективных данных – результатов МРТ-исследования – через 3 месяца после проведения стереотаксической радиохирургии в 40% случаев отмечена положительная динамика, у 12% пациентов отмечена полная резорбция процесса, в 47% случаев наблюдалась стабилизация процесса. Сроки формирования ответа были обусловлены как особенностями радиочувствительности опухолей, так и радиобиологическими особенностями гипофракционирования.

Таким образом, стереотаксическая радиохирургия является современным высокотехнологичным неинвазивным, безопасным и эффективным методом лечения.

**ROBOTIZED RADIOSURGERY
SYSTEM «CYBERKNIFE» («CYBERKNIFE»)
AT THE CHELYABINSK REGIONAL
ONCOLOGICAL CENTER. FIRST RESULTS**

A.V. Vazhenin, Yu.V. Galyamova, E.Yu. Lukina,
E.Ya. Mozerova, E.V. Novikov, N.V. Kalyganova,
I.A. Vazhenin, O.N. Chernova, E.A. Ozerov

Chelyabinsk Regional Oncological Center,
Chelyabinsk, Russia

At the Chelyabinsk Regional Oncological Center during June – December 2011 140 patients with different localizations of tumors were treated using the robotized linear accelerator «CyberKnife».

The patients' ages ranged from 12 to 80 years (mean age 52.5 years), males accounted for 45.7% (64 patients), women – 54.3% (76 patients). Treatment was conducted in patients with tumors of various localizations. Brain tumors

were 76 patients, the spinal cord – 7, head and neck – 13, metastases occurred in 23 patients. Among brain tumors predominated meningiomas (35), pituitary adenomas (16), recurrent gliomas (19), vestibular schwannomas (7). Arteriovenous malformations underwent radiation exposure in 8 patients.

For the first time in the Russian Federation implemented unique capabilities of the «CyberKnife»: radiosurgical treatment of uveal melanoma for 3 patients and 2 patients achieved treatment of lung cancer with the use of XSight Lung tracking system and Synchrony system for synchronization with the breath.

The treatment plan was determined on the basis of international recommendations with regard to the size, configuration features of the tumor, proximity to critical structures. Number of fractions ranged from 1 to 5. A single dose 12 to 24 Gy was held on 23 patients. For all patients treatment was performed according to prescribed plan. The need to interrupt treatment for somatic reasons, did not arise. There was no increase of focal neurological symptoms. There were no signs of organs at risk damage.

When assessing the objective data – the results of an MRI study – 3 months after stereotactic radiosurgery in 40% noted positive dynamics, 12% of patients showed complete resorption of the tumor, 47% had stable process. Terms of formation of response were attributable to the peculiarities of tumor radiosensitivity and radiobiological characteristics of hypofractionation.

Thus, stereotactic radiosurgery is a modern, high-tech, non-invasive, safe and effective method of treatment.

5-39

**РЕЗУЛЬТАТЫ HDR-БРАХИТЕРАПИИ
НА АППАРАТЕ «MULTISOURCE»
ОПУХОЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ЛОКАЛИЗАЦИЙ**

Т.М. Шарабура, А.В. Важенин, А.А. Ложков,
А.Г. Жумабаева, А.В. Турбина, Е.Я. Мозерова

Челябинский областной клинический
онкологический диспансер, Челябинск, Челябинск, Россия
Челябинская государственная медицинская академия,
Челябинск, Россия

Брахитерапия (БТ) является неотъемлемым компонентом лечения опухолей различных локализаций. До последнего времени в качестве источника излучения для аппаратов автоматизированного афтелоудинга использовался Ir-192 с низкой энергии фотонов, что обеспечивает более резкий спад градиента дозы. В связи с коротким периодом полураспада Ir-192, эксплуатация данного изотопа требует частой замены источника. Источник Co-60, использующийся в аппарате MultiSource, имеет период полураспада около 5 лет, что делает применение данного изотопа более рентабельным. Исследования показали, что различия параметров изотопов Co-60 и Ir-192 можно нивелировать за счет оптимизации дозного распределения при трехмерном планировании.

Цель настоящего исследования заключалась в апробации протоколов и программы гарантии качества

брахитерапии опухолей различных локализаций на аппарате MultiSource с источником Co-60 в режиме HDR.

Материалы и методы. Сочетанную лучевую терапию с дистанционным и контактным облучением получили 20 больных с опухолями трахеи и крупных бронхов, пищевода, слизистой оболочки ротовой полости. Визуализация мишени и интрастатов осуществлялась с помощью РКТ с занесением сканов в формате DICOM в планирующую систему HDR plus 2.6. Для повышения точности визуализации, с учетом ограничения возможностей КТ, была использована функция fusion для совмещения МРТ и КТ изображений. При внутрисполостной БТ подводилась доза 10–15 Гр за 2–3 фракций по 5,0–7,0 Гр 1 раз в неделю. Внутритканевая БТ проводилась с дозой 3 Гр 2 раза в день с интервалом 6 часов до 24 Гр.

Полученные результаты свидетельствуют о хорошей переносимости, низкой токсичности и высокой непосредственной эффективности примененных схем БТ. Рассмотрены проблемы, значимые для обеспечения эффективности и гарантии качества БТ: оптимальный режим HDR-брахитерапии, определение объема мишени и обеспечение качества его визуализации, обеспечение оптимального дозного распределения.

RESULTS OF HDR-BRACHYTHERAPY WITH «MULTISOURCE» OF DIFFERENT TUMORS

T.M. Sharabura, A.V. Vazhenin, A.A. Lozhkov, A.G. Zhumabayeva, A.V. Turbina, E.Ya. Mozerova

Chelyabinsk Regional Oncological Center,
Chelyabinsk State Medical Academy,
Chelyabinsk, Russia

Brachytherapy (BT) is an integral component of the treatment of tumors of different localizations. Ir-192 provides a sharp decline in the gradient of the dose outside target and is often used for remote afterloading brachytherapy. Due to the short half-life of Ir-192 isotope, it is necessary to replace the source every 3 months. Co-60 has a half-life of about 5 years and so is more profitable. The differences in the parameters of Co-60 and Ir-192 in dose distribution can be optimized with three-dimensional planning.

The purpose of this study was to estimate the protocols and quality assurance of HDR-brachytherapy of tumors of different locations with the help of MultiSource with Co-60.

Materials and Methods. 20 patients with tumors of a trachea and bronchus, esofagus, tongue and floor of the mouth got combined therapy with brachytherapy. CT scans were introduced in DICOM format to the planning system HDR plus 2.6. The fusion of MRI and CT images was used for better visualization. 10–15 Gy with 5.0–7.0 Gy per fraction weekly was given with intracavitary BT. 24 Gy with 3 Gy per fraction was given twice a day with an interval of 6 hours with interstitial BT.

The results showed good tolerability, low toxicity and high efficacy of BT. Problems considered in this study: optimum plane of HDR-brachytherapy, visualization of target volume, maintenance of quality assurance and optimization of dose distribution.

5-40

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ НАКОПЛЕНИЯ ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРА РАДАХЛОРИН В БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЯХ

А.В. Лаппа, А.С. Зарезина,
Н.Н. Куликовский, Р.Н. Куликовский
Челябинский государственный университет,
Челябинск, Россия
E-mail: zarezina@csu.ru

Введение

Целью настоящей работы является исследование динамики накопления фотосенсибилизатора «Радахлорин» в патологических и нормальных тканях при проведении фотодинамической терапии (ФДТ) злокачественных образований.

Эффективность ФДТ зависит, прежде всего, от двух параметров: концентрации фотосенсибилизатора (ФС) в опухоли, определяющей интенсивность фотохимических реакций, и контрастности накопления (отношения концентраций ФС в опухоли и окружающих нормальных тканях), определяющей селективность фотодинамического воздействия. Мониторинг этих параметров в процессе ФДТ позволяет определить лучшее время для облучения, оценить эффективность лечения, минимизировать опасность для нормальных тканей.

Материалы и методы

Нами был разработан неинвазивный метод определения абсолютных концентраций фотосенсибилизатора в биологических тканях. Метод использует тот факт, что любой сенсibilизатор имеет в спектре поглощения несколько узких пиков поглощения. Для фотодинамической терапии обычно используется самый длинноволновый пик: именно на этой длине волны осуществляется облучение опухоли (для «Радахлорина» – 660 нм). Если направить на сенсibilизированную ткань пучок света с непрерывным спектром в области рабочего пика поглощения сенсibilизатора, то спектр отраженного света окажется измененным: в области пика поглощения сенсibilизатора появится «провал» из-за большего поглощения фотонов данной длины волны. В первом приближении относительная величина этого «провала» прямо пропорциональна концентрации сенсibilизатора.

Результаты

Метод был реализован в виде измерительно-вычислительного комплекса и использован для мониторинга накопления Радахлорина в различных тканях, включая кожу и щитовидную железу в норме, опухоли щитовидной железы, базально-клеточный рак кожи, злокачественные образования мочевого пузыря [1].

Исследования показали, что концентрация «Радахлорина» в злокачественных опухолях различной локализации остается существенно выше по сравнению со здоровой тканью на всем интервале исследования. Максимальное значение накопления фотосенсибилизатора

в опухолях достигается примерно через 1–1,5 часа после введения. Контрастность накопления по сравнению со здоровой тканью в момент максимального накопления значительна, что позволяет говорить об эффективности использования данного фотосенсибилизатора для лечения данного вида новообразований.

Литература

1. Privalov V.A., Lappa A.V., Bigbov E.N. Mechanisms of tumor necrosis in photodynamic therapy with a chlorine photosensitizer: experimental studies // *Optical Methods for Tumor Treatment and Detection: Mechanisms and Techniques in Photodynamic Therapy XX: Proceedings of SPIE*; David H. Kessel; Tayyaba Hasan, Eds., 2011. Vol. 7886. P. 17.1–17.12

DYNAMIC OF RADACHLORIN PHOTOSENSITIZER ACCUMULATION IN BIOLOGICAL TISSUES

A.V. Lappa, A.S. Zarezina,
N.N. Kulikovskiy, R.N. Kulikovskiy

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: zarezina@csu.ru

Introduction

The purpose of this paper is to study the dynamics of accumulation of the «Radachlorin» photosensitizer in pathological and normal tissues during photodynamic therapy (PDT) of malignant tumors.

The effectiveness of PDT depends primarily on two parameters: the concentration of photosensitizer (PS) in the tumor, which determines the intensity of photochemical reactions, and the accumulation contrast (the ratio of PS concentrations in the tumor and surrounding normal tissues), which determines the selectivity of the photodynamic treatment. Monitoring of these parameters during PDT allowed us to determine the best time for irradiation, to assess the effectiveness of treatment, to minimize the risk for normal tissues.

Materials and methods

We have developed a noninvasive method for determining the absolute concentration of photosensitizer in biological tissues. The method is based on the fact that any sensitizer has several narrow absorption peaks in the absorption spectrum. The long-wavelength peak is commonly used for photodynamic therapy, i.e. this wavelength is used for irradiation of the tumor (660 nm for «Radachlorin»). If a continuous spectrum beam is sent in the sensitized tissue, the spectrum of the reflected light will be changed: there will be a «dip» in the region of the absorption peak of the sensitizer due to the greater absorption of photons of this wavelength. In the first approximation, the relative magnitude of this «dip» is directly proportional to the concentration of sensitizer.

Results

The method was implemented as the measuring and computing complex, which was used to monitor the accumulation of «Radachlorin» in various tissues, including normal skin and thyroid gland, thyroid tumors, basal cell skin cancer, malignant tumors of the bladder [1].

It has been shown that the concentration of «Radachlorin» within the tumor was significantly higher than in healthy tissue at any time of the study. The maximum value of the photosensitizer accumulation by the tumor was reached approximately 1–1.5 hours after administration. Accumulation contrast at the time of maximum accumulation is significant, which suggests the effectiveness of this photosensitizer use for the treatment of these tumors.

Reference

1. Privalov V.A., Lappa A.V., Bigbov E.N. Mechanisms of tumor necrosis in photodynamic therapy with a chlorine photosensitizer: experimental studies // *Optical Methods for Tumor Treatment and Detection: Mechanisms and Techniques in Photodynamic Therapy XX: Proceedings of SPIE*; David H. Kessel; Tayyaba Hasan, Eds., 2011. Vol. 7886. P. 17.1–17.12.

"Для того, чтобы дела у нас шли хорошо, надо каждому на своем месте честно делать то, что ему положено".

Е.И. Забабахин

Секция 6

**ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ,
АЛГОРИТМЫ, ПРОГРАММЫ
И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ**

Section 6

**NUMERICAL METHODS,
ALGORITHMS, CODES
AND ACCURATE SOLUTIONS**

**ЭФФЕКТИВНЫЙ ТРЕХМЕРНЫЙ МЕТОД ALE
С НЕСКОЛЬКИМИ МАТЕРИАЛАМИ НА
НЕРЕГУЛЯРНЫХ СЕТКАХ, ОСНОВАННЫЙ НА
МОФ-ВОССТАНОВЛЕНИИ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА,
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ
СЖИМАЕМЫХ СРЕД**

Жиа Зупень¹, Лью Жун², Жань Шудао^{1,2}

¹Институт прикладной физики и вычислительной
математики, Пекин, Китай

²Центр прикладной физики и техники, Пекинский
университет, Пекин, Китай

В данной работе представлен эффективный трехмерный метод ALE на нерегулярных сетках для моделирования гидродинамики многокомпонентных сжимаемых сред. Метод MMALE использует возможности Метода момента жидкости (Moment of Fluid – MOF) с востановлением границы раздела для моделирования гидродинамики многокомпонентных неперемешиваемых сред. Это Лагранжев метод с явным временным шагом и перестройкой сетки. На этапе моделирования методом Лагранжа используется ступенчатая совместимая дискретизация для лагранжевой газодинамики, модель Типтона релаксации давления для смешанной зоны используется в качестве модели замыкания для смешанных ячеек. Для этапа перестройки сетки представлен усовершенствованный метод второго порядка точности для трехмерных нерегулярных сеток, основанный на точном пересечении ячеек. Наш ALE метод моделирования многокомпонентных сред пригоден для параллельных вычислений. С помощью этого нового метода на вычислительной машине, мы рассчитываем несколько численных тестовых задач в распараллеленной постановке. Были исследованы такие задачи, как задача о трехмерном периодическом вихре, о сильном воздействии водной ударной волны на цилиндрический погруженный воздушный пузырек, 2-мерная и 3-мерная неустойчивость Релея-Тейлора, многофазная имплозия в цилиндрической геометрии и т.д. Результаты решения этих численных тестовых задач представлены для демонстрации точности второго порядка, эффективности и устойчивости этого нового метода.

AN EFFECTIVE THREE-DIMENSIONAL MULTI-MATERIAL ALE METHOD ON UNSTRUCTURED GRIDS BASED ON MOF INTERFACE RECONSTRUCTION FOR COMPRESSIBLE FLUID DYNAMICS

Jia Zupeng¹, Liu Jun², Zhang Shudao^{1,2}

¹Institute of Applied Physics and Computational
Mathematics, Beijing 100094, PRC, China

²Center of Applied Physics and Technology, Peking
university, Beijing 100871, PRC, China

This paper presents an effective three-dimensional multi-material ALE method on unstructured grids for compressible fluid dynamics. The MMALE method utilizes Moment of Fluid (MOF) capability with interface reconstruction for multi-material modeling of immiscible fluids. It is of the

explicit time-marching Lagrange plus remap type. In the Lagrangian phase, the staggered compatible discretization for Lagrangian gas dynamics is used, Tipton's mixed zone pressure relaxation model is used as the closure model for mixed cells. For the remapping phase, an improved second-order accurate cell-intersection-based method for three-dimensional unstructured grids is presented. Our multi-material ALE method is suitable for parallel computation. We compute some numerical tests using this new method on a parallel machine. These problems include the three-dimensional periodic vortex problem, a strong water shock impacting on a cylindrical air bubble in water, 2D and 3D Rayleigh-Taylor instability, multi-mode implosion in cylindrical geometry, etc. Results of these numerical tests are given to demonstrate the second-order accuracy, effectiveness and robustness of this new method.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
РАЗРУШИТЕЛЬНЫХ ПРИРОДНЫХ
ВОСХОДЯЩИХ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ**

С.П. Баутин¹, Е.Д. Белова²,
И.Ю. Крутова², А.Г. Обухов³

¹Уральский государственный университет путей сообщения,
Екатеринбург, Россия

²СФТИ НИЯУ МИФИ, Снежинск, Россия

³Тюменский государственный нефтегазовый университет,
Тюмень, Россия

E-mail: SBautin@math.usurt.ru; ek.d.belova@gmail.com;
aobukhov@tsgu.ru

В монографии [1] предложена схема возникновения и устойчивого функционирования восходящих закрученных потоков (ВЗП) таких, как смерчи, торнадо и тропические циклоны. Схема согласуется со всеми газодинамическими эффектами, наблюдаемыми в природных ВЗП. Эксперименты, проводимые в Объединенном институте высоких температур (смотри, например, [2]), подтверждают эту схему в части возникновения и начального функционирования ВЗП.

Для математического моделирования движения воздуха в ВЗП исследуются решения системы уравнений газовой динамики (СУГД), описывающие изэнтропические течения идеального политропного газа в придонной части ВЗП, где происходят основные разрушения, а также и в вертикальной части ВЗП [3].

Для течения в придонной области доказано, что в задаче о плавном стоке на цилиндре заданного ненулевого радиуса в первоначально покоящемся в поле тяжести газе наряду с радиальным движением возникает и окружное. Причем в случае Северного полушария закрутка газа идет в положительном направлении, в случае Южного – в отрицательном. Численными расчетами описан процесс закрутки газа с течением времени силой Кориолиса. Тем самым, смоделированы спиральные течения в природных ВЗП с разномасштабными характерными линейными размерами: километры для торнадо; сотни километров для тропических циклонов. Расчеты выявили времена,

за которые под действием силы Кориолиса в указанных течениях возникают свои характерные скорости движения воздушных масс. Полученные числовые характеристики согласуются с имеющимися данными наблюдений за природными ВЗП. В виде сходящихся рядов построено трехмерное стационарное течение в окрестности непроницаемой плоскости $z = 0$. Для моделирования течения в вертикальной части ВЗП строятся начальные слагаемые бесконечных сходящихся рядов по степеням малых параметров, входящих в СУГД регулярно. Анализ построенных коэффициентов показал возможность существования течений, закрученных как по всему сечению вертикальной области, так и только в его кольцевой части. Во втором случае в центральной части возможна либо область вакуума, либо область покоящегося газа с ненулевой плотностью. Показано, что основные газодинамические характеристики в вертикальной части ВЗП определяются величиной закрутки газа, поступающего из придонной части. И на их значения влияние силы Кориолиса в вертикальной части ВЗП существенно меньше, чем влияние силы тяжести.

Исследование поддержано РФФИ, проекты 08-01-00052, 11-01-00198.

Литература

1. Баутин С.П. Торнадо и сила Кориолиса. Новосибирск: Наука, 2008. 80 с.
2. Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н. О возможности воздействия на вихревые атмосферные образования // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48. № 3. С. 1–6.
3. Баутин С.П., Обухов А.Г. Математическое моделирование разрушительных атмосферных вихрей. Новосибирск: Наука, 2012. 160 с.

MATHEMATICAL SIMULATION OF DEVASTATING NATURAL RISING SWIRLING FLOWS

S.P. Bautin¹, E.D. Belova²,
I.Yu. Krutova², A.G. Obuhov³

¹Ural State University of Railway Transport,
Yekaterinburg, Russia

²Snezinskiy Physical-Technical Institute, Snezhinsk, Russia

³Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, Russia

E-mail: SBautin@math.usurt.ru;
ek.d.belova@gmail.com; aobukhov@tsogu.ru

In [1] proposed a scheme for the emergence and sustainability of the upward vortex flows (UVF), such as tornadoes and tropical cyclones. The scheme is compatible with all gas-dynamic effects observed in natural UVF. Experiments carried out at the Joint Institute for High Temperatures (see, eg, [2]) confirm this pattern in terms of origin and initial operation of the UVF.

For the mathematical modeling of air movement in the UVF study the solutions of equations of gas dynamics, describing the isentropic flow of an ideal polytropic gas in the bottom of the UVF, where major destruction are, but also in the vertical part of the UVF [3].

For the flow in the bottom of it, is proved that the problem of a smooth cylinder of a given stock at a nonzero

radius initially at rest in the gravitational field of the gas along the radial and circumferential motion occurs. And in the case of the Northern Hemisphere twist the gas is in the positive direction, in the case of the South – in the negative. Numerical calculations describes the process of gas swirling over time by the Coriolis force. Thus, the simulated spiral flow in natural charge density waves with different scales characteristic linear dimensions: miles to tornadoes, hundreds of miles of tropical cyclones. Calculations showed the times for which the action of the Coriolis force in these currents arise own characteristic velocity of the air masses. The obtained numerical characteristics consistent with the available observational data for natural UVF. In the form of converging series constructed three-dimensional steady flow in the vicinity of an impenetrable plane $z = 0$. To simulate the flow in the vertical part of the UVF built the initial terms of infinite convergent series in powers of small parameters in system of equations of gas-dynamic regularly. Analysis of the constructed coefficients showed the possibility of the existence of currents swirling around both vertical cross-section area, and only in its circular part. In the second case in the central region can be either a vacuum or a gas at rest area with non-zero density. It is shown that the main gas-dynamic characteristics in the vertical part of the UVF are determined by the size spinning gas coming from the bottom part. And their values influence of the Coriolis force in the vertical part of the UVF is much smaller than the influence of gravity.

The study was supported by RFBR, projects 08-01-00052, 11-01-00198.

References

1. Bautin S.P. Tornadoes and the Coriolis force. Novosibirsk: Nauka, 2008. 80 p.
2. Varaksin A.Y., Romashev M.E., Kopeytsev V.N. On the possibility of exposure to atmospheric vortex formation // High Temperature. 2010. V. 48, № 3. P. 1-6.
3. Bautin S.P., Obuhov A.G. Mathematical modeling of the destructive atmospheric vortices. Novosibirsk: Nauka, 2012. 160 p.

6-3

О ЧИСЛЕННОМ АНАЛИЗЕ ДИНАМИКИ НЕЛИНЕЙНОЙ УПРАВЛЯЕМОЙ СИСТЕМЫ

И.Н. Кандоба¹, В.Б. Костоусов¹,
Е.К. Костоусова¹, И.В. Козьмин¹,
А.Б. Ложников¹, В.И. Починский²

¹Институт математики и механики УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

²ФГУП НПО автоматики им. академ. Н.А. Семихатова,
Екатеринбург, Россия

E-mail: kandoba@imm.uran.ru

Доклад посвящен задачам управления, возникающим при выведении ракеты-носителя (носителя) на заданную околоземную эллиптическую орбиту. Движение носителя описывается нелинейной динамической системой. В ряде практически важных задач к искомому управлению предъявляются дополнительные требования. Первое заключается в максимизации выводимой на орбиту массы полезной

нагрузки, второе диктуется необходимостью обеспечения успешного возвращения пилотируемого модуля носителя на Землю в случае аварийного прекращения его полета в любой момент времени. Второе условие приводит к возникновению ограничений на текущее фазовое состояние динамической системы.

В задаче максимизации массы выводимой полезной нагрузки рассматривается ситуация, когда параметры модели математически определяются как нормально распределенные случайные величины с известными средними и среднеквадратическими отклонениями. Приводятся методики построения оценок максимальной массы полезной нагрузки, выводимой носителем типа «СОЮЗ-2» на орбиту с вероятностью не ниже заданной, и величины выигрыша по этой массе, который может быть получен за счет уточнения значений случайных параметров модели [1].

Для задачи выведения, осложненной требованием успешного возвращения пилотируемого модуля носителя на Землю в случае возникновения аварийной ситуации, приводятся результаты исследования функции максимальной перегрузки. Обсуждаются подходы к построению программного управления носителем с учетом ограничений на перегрузки, возникающие при баллистическом спуске возвращаемого модуля на Землю.

В основу предлагаемых методик и подходов положены алгоритмы обработки и анализа статистических данных, полученных в результате вычислительного эксперимента на многопроцессорной вычислительной системе с использованием реальных данных [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 12-01-00493 и интеграционного проекта УрО и СО РАН «Качественная теория и численные методы для задач динамики, управления и оптимизации».

Литература

1. Кандоба И.Н., Козьмин И.В., Костоусов В.Б., Ложников А.Б., Починский В.И. О задаче вывода на орбиту максимальной полезной нагрузки в условиях случайных возмущений параметров // Автоматика и телемеханика. 2012 (в печати).

ON THE NUMERICAL ANALYSIS OF NONLINEAR CONTROL SYSTEM DYNAMICS

I.N. Kandoba¹, V.B. Kostousov¹, E.K. Kostousova¹,
I.V. Kozmin¹, A.B. Lozhnikov¹, V.I. Pochinskii²

¹Institute of Mathematics and Mechanics UB RAS,
Yekaterinburg, Russia

²FSUE Scientific and Production Association of Automatics
named after Academician N.A. Semikhatov,
Yekaterinburg, Russia

E-mail: kandoba@imm.uran.ru

The report is devoted to control problems connected with the injection of a carrier rocket (launcher) into a given circumglobal elliptic orbit. The motion of the launcher is described by a nonlinear dynamic system. In some important practical problems, there are some additional requirements on a desired control. The first requirement consists in the maximization of the payload mass led to the orbit. The second one is dictated by the necessity to provide the safe

return of the manned spacecraft to the earth in the case of the launcher flight abortion at any time. The second condition generates constraints on the current phase state of the dynamic system.

In the problem of maximizing the led payload mass, the situation when model parameters are mathematically defined as normal-distributed random values with known mean values and mean square deviations is under consideration. The procedures for constructing estimates for the maximal payload mass led to the orbit by launcher «Soyuz-2» with a prescribed probability as well as estimates of the advantage with respect to this mass that can be obtained at the expense of more precise definition of values of random parameters in the model are designed [1].

For the injection problem complicated by the requirement of the safe return of the manned spacecraft of the launcher to the earth in the case of emergency, the results of investigating the maximal overload (g-load) function are presented. The approaches to the program control construction for the launcher under constraints on g-loads during ballistic descent of the manned spacecraft to the earth are discussed.

The suggested procedures and approaches are based on algorithms of processing and analysis of statistic data obtained as a result of a computing experiment on the multi-processor machine with the use of real data [1].

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 12-01-00493) and by the integrated project of Ural Branch and Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences «Qualitative theory and numerical methods for problems of dynamics, control and optimization».

Reference

1. Kandoba I.N., Kozmin I.V., Kostousov V.B., Lozhnikov A.B., Pochinskii V.I. On problem of injection into the orbit of maximal payload under random variations of parameters // Automation and Remote Control. 2012 (in the press).

6-4

ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ОБОБЩЕННЫХ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ТИПА ГАМИЛЬТОНА-ЯКОБИ

А.А. Успенский, П.Д. Лебедев

Учреждение Российской академии наук Институт
математики и механики Уральского отделения РАН,
Екатеринбург, Россия

E-mail: uspen@imm.uran.ru, pleb@yandex.ru

Изучается проблема построения (в точной аналитической или аппроксимационной форме) обобщенных (минимаксных) решений краевых задач для дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка типа Гамильтона-Якоби [1]. Краевые задачи Коши и Дирихле для уравнений означенного типа возникают, в частности, в механике, в газовой и гидродинамике, в геометрической оптике, при решении задач оптимального управления, в дифференциальных

играх. Решениям этих задач свойственна негладкость, что существенным образом затрудняет их нахождение в явном виде. Означенное свойство решений также обуславливает алгоритмически затратные процедуры, вовлекающие конструкции выпуклого и негладкого анализа при разработке корректных разностных схем численного построения решений [2].

В докладе рассматривается задача Дирихле для уравнения типа эйконала [3] в достаточно общей постановке в части краевых условий. Допускается невыпуклость краевого множества и негладкость его границы. Излагаются элементы численно-аналитического подхода к построению совокупности волновых фронтов (линий уровня решения), основанного на выделении множества симметрии задачи – множества, на котором градиент минимаксного решения терпит разрыв. Техника изучения особенностей опирается на свойства локальных диффеоморфизмов. Получены необходимые условия существования псевдовершин – особых точек краевого множества, которые определяют структуру множества негладкости минимаксного решения. Необходимые условия выписаны в терминах пределов производных локальных диффеоморфизмов, определяемых нелинейным уравнением, связывающим параметры задачи Дирихле [4,5].

Одним из теоретических итогов работы является обобщение классического понятия производной, которое в частных случаях совпадает с симметрической производной Шварца.

Результаты исследования иллюстрируются на примерах решений динамических задач управления и геометрической оптики.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 11-01-00427-а, гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ № НШ-64508.2010.1 и регионального гранта РФФИ/ПСО № 10-01-96006-р_урал_a.

Литература

1. Субботин А.И. Обобщенные решения уравнений в частных производных первого порядка. Перспективы динамической оптимизации. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных технологий, 2003. 336 с.
2. Тарасев А.М., Успенский А.А., Ушаков В.Н. Аппроксимационные операторы и конечно-разностные схемы для построения обобщенных решений уравнений Гамильтона-Якоби // Известия РАН. Техническая кибернетика. 1994. № 3. С. 173–185.
3. Ушаков В.Н., Успенский А.А., Лебедев П.Д. Построение минимаксного решения уравнения типа эйконала // Труды Института математики и механики, 2008. Т. 14. № 2. С. 182–191.
4. Успенский А.А., Лебедев П.Д. О множестве предельных значений локальных диффеоморфизмов при эволюции волновых фронтов // Труды Института математики и механики, 2010. Т. 16. № 1. С. 171–186.
5. Успенский А.А. Спектр производных локальных диффеоморфизмов при эволюции волновых фронтов в задаче быстрого действия // ВІСНИК Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Abstracts of Conference Reports Dynamical System Modelling and Stability Investigation, May 25–27, 2011. P. 382.

ANALYTICAL AND NUMERICAL METHODS FOR GENERALIZED SOLUTIONS OF HAMILTON-JACOBI PDE CONSTRUCTION

A.A. Uspenskiy, P.D. Lebedev

Institute of Mathematics and Mechanics of RAS,
Yekaterinburg, Russia

E-mail: uspen@imm.uran.ru, pleb@yandex.ru

Generalized (minimax) solutions for boundary problems for the first-order PDE type of Hamilton-Jacobi construction is studied (both in analytical and approximation way) [1]. Dirichlet and Cauchy boundary problems for this type of equations are used particularly in mechanics, in gas and hydrodynamics, in geometric optics, in optimal control problem and differential games. Their solutions are often not smooth, so it is difficult to find them in explicitly. Also this property causes algorithms procedures, which include constructions of convex and nonsmooth analyze for difference schemes of solutions design, to be complicated [2].

Dirichlet problem for eikonal type equation [3] with sufficiently common settings of boundary conditions is considered in the report. The boundary set is allowed to have non-convex and nonsmooth boarder. Elements of numerical and analytical way of wave fronts set construction (level lines of solution) based on finding of symmetry set (minimax solution gradient has a gap on this set) are proposed. Technique of singularities studying uses local diffeomorphism properties. Indispensable conditions for existing of pseudo vertices (special points of a boundary set which determine the minimax solution nonsmooth set structure) are given. Indispensable conditions are written in limits of local diffeomorphism derivatives terms, which are determined by nonlinear equation connecting Dirichlet problem's parameters [4, 5].

One of the theoretical results of the paper is generalizing of classical conception of derivation, which in some cases is similar to Schwartz symmetry derivation.

Dynamic control and geometric optics problems solutions examples illustrate the research results.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects no. 11-01-00427-a), by the Program for Sponsorship of Leading Scientific Schools (Grant NSCH-64508.2010.1), by the regional grant of the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Sverdlovsk oblast (project no. № 10-01-96006-r_Ural_a).

References

1. Subbotin A.I. Generalized Solutions of First-Order PDEs. The Dynamical Optimization Perspective. Boston, Birkhauser, 1995.
2. Taras'ev A.M., Uspenskii A.A., and Ushakov V.N. Approximation Operators and Finite-Derivative Schemes for Generalized Solutions of Hamilton-Jacobi Equations Solutions // Izv RAN. Engineering Cybernetics. 1994. No 3. P. 173–185. [In Russian].
3. Lebedev P.D., Ushakov V.N., and Uspenskii A.A. Minimax Solution of Eikonal Type Equation Construction. Tr. IMM UrO RAN. Vol 14, no 2. 2008. P. 182–191. [in Russian].
4. Uspenskii A.A., and Lebedev P.D. Derivatives Set of Local Diffeomorphisms in The Study of Wavefront Evolution. // Tr. IMM UrO RAN. Vol. 16, no 1. 2010. P. 171–186. [in Russian].
5. Uspenskii A.A. Local Diffeomorphisms Spectrum and Wavefront in Velocity Problem // Journal of Kiev National University named after Taras Shevchenko, Abstracts of Conference Reports-Dynamical Systems Modelling and Stability Investigation, May 25–27, 2011. P. 382. [in Russian].

6-5

КОРРЕКТНОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ВИНЕРА-ХОПФА В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ ВЗРЫВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Г.В. Орлов

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Для восстановления прерванного входного сигнала, прошедшего через измерительную аппаратуру взрывного эксперимента, разработан алгоритм корректного решения цифрового интегрального уравнения первого рода с конечным интервалом наблюдения, то есть цифрового уравнения Винера-Хопфа.

Доказано, что задача восстановления входного воздействия имеет смысл только при условии априорной причинности входного и выходного сигналов и причинности обратной аппаратной функции.

В рамках теории z -преобразований последовательностей, дающей для их аналитических образов простые спектральные условия временной причинности, доказана теорема об условиях и единственности представления цифрового фильтра в виде свертки минимально-фазового и двух всепропускающих фильтров – причинного и антипричинного. Для конечномерной аппаратной функции получено полное описание корректной аппроксимации оператора решения цифровой задачи Винера-Хопфа, основанной на минимально-фазовом представлении аппаратной функции.

CORRECT SOLUTION OF THE WIENER-HOPF EQUATION FOR EXPERIMENTAL EXPLOSION DATA PROCESSING

G.V. Orlov

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

The paper presents an algorithm which correctly solves a numerical integral equation of the first kind with a limited observation interval, i.e., the Wiener-Hopf equation, for restitution an input signal transmitted in experimental explosion instrumentation.

It is proved that the problem of input restitution is only meaningful for a priori causality of input and output signals and causality of the inverse impulse response.

With z -transform theory which gives simple spectral conditions of temporal causality for the analytical patterns of sequences, a theorem is proved, which gives conditions for a unique representation of a digital filter as a convolution of a minimal-phase filter and two all-pass filters – causal and anti-causal. For a finite-dimensional transfer function a complete and correct approximation to the solution operator of a numerical Wiener-Hopf problem is found. It is a sequence of the minimum-phase representation of impulse response.

6-6

АНАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭВОЛЮЦИОННЫХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ВОЛН В ЖИДКОСТИ С ПУЗЫРЬКАМИ ГАЗА

Н.А. Кудряшов, Д.И. Синельщиков

Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», Москва, Россия
E-mail: nakudryashov@mephi.ru

Исследования волновых процессов в жидкости с пузырьками газа важны для понимания многих явлений в физике, химии, биологии, медицине и в ряде других разделов науки [1, 2]. Как правило для описания нелинейных волновых процессов в жидкости с пузырьками газа используются уравнения Кортевега де Вриза и Бюргерса Кортевега де Вриза. При выводе этих уравнений не принимается во внимание процесс межфазного теплообмена, учет которого важен для многих приложений. Кроме того, важно отметить, что волновые процессы в жидкости с пузырьками газа изучались только в одномерном случае. В работах [3, 4] получены нелинейные эволюционные уравнения для описания волновых процессов в жидкости с пузырьками газа при учете межфазного теплообмена. В [5] предложено трехмерное обобщение уравнения Бюргерса Кортевега де Вриза для описания волн в жидкости с пузырьками газа. Целью работы является исследование аналитических свойств и построение точных решений нелинейных эволюционных уравнений для описания волн в жидкости с пузырьками газа при учете межфазного теплообмена и в трехмерном случае.

В докладе представлены результаты исследования на свойство Пенлеве указанных выше нелинейных эволюционных уравнений. Показано, что в общем случае эти уравнения не обладают свойством Пенлеве и, следовательно, не относятся к классу интегрируемых. Однако для данных уравнений получены семейства точных решений в виде уединенных и периодических волн, выраженные через тригонометрические и эллиптические функции. Показано, что в трехмерном случае в приближении невязкой жидкости эволюционное уравнение имеет односолитонное и двухсолитонное решения. В трехмерном случае проведено исследование устойчивости одномерных уединенных волн по отношению к поперечным возмущениям.

Литература

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1,2. М.: Наука. 1987. 464 с.
2. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р. Волновая динамика газо- и парожидкостных сред. М.: Энергоатомиздат, 1990. 248 с.
3. Кудряшов Н.А., Синельщиков Д.И. Нелинейные волны в жидкости с пузырьками газа при учете вязкости и теплообмена // Изв. РАН. МЖГ, 2010. – № 1. С. 108–127.
4. Kudryashov N.A., Sinelshchikov D.I. Nonlinear waves in bubbly liquids with consideration for viscosity and heat transfer // Phys. Lett. A, 2010. V. 374. I. 19–20. P. 2011–2016.

5. Kudryashov N.A., Sinelshchikov D.I. Equation for three-dimensional nonlinear waves in liquid with gas bubbles // Phys. Scr., 2012, In press.

ANALYTICAL PROPERTIES AND EXACT SOLUTIONS OF NONLINEAR EVOLUTION EQUATIONS FOR DESCRIPTION OF WAVES IN LIQUID WITH GAS BUBBLES

N.A. Kudryashov, D.I. Sinelshchikov

National Research Nuclear University «MEPhI»,
Moscow, Russia

E-mail: nakudryashov@mephi.ru

Investigations of nonlinear waves in a liquid with gas bubbles is important problem for understanding of various phenomena in physics, chemistry, biology and other fields of science [1,2]. Usually the Korteweg – de Vries and the Burgers–Korteweg–de Vries equations are used for the description of nonlinear waves in a gas-liquid mixture. At the derivation of these equations the process of heat transfer between a liquid and a gas in bubbles is not taken into account which is important for many applications. It is worth to note that nonlinear waves in a liquid with gas bubbles were investigated only in the one-dimensional case. In works [3,4] nonlinear evolution equation for wave processes in a liquid with gas bubbles were obtained with consideration for the heat transfer. In work [5] three-dimensional counterpart of the Burgers – Korteweg – de Vries equation were proposed for the description of waves in a gas-liquid mixture. The aim of this work is investigation of analytical properties and construction of exact solutions for nonlinear evolution equations for waves in a liquid with gas bubbles with consideration for the heat transfer and in the three-dimensional case.

Investigation of the Painleve property is carried out for the above mentioned nonlinear evolution equations. It is shown that these equations do not have the Painleve property in the general case. However for these equations families of exact solutions are obtained in the form of solitary and periodic waves. It is shown that in the three-dimensional and ideal liquid case the nonlinear evolution equation has one-soliton and two-soliton exact solutions. Investigation of stability for one-dimensional solitary waves under transverse perturbations is carried out.

References

1. Nigmatulin R.I. Dynamics of Multiphase Media, Part 1,2. New York: Hemisphere. P. 388.
2. Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G., Shreiber I.R. Wave Propagation in Gas-Liquid Media. New York: CRC Press. P. 222
3. Kudryashov N.A., Sinel'shchikov D.I. Nonlinear waves in liquids with gas bubbles with account of viscosity and heat transfer // Fluid Dyn., 2010. V. 45. I 1. P. 96-112.
4. Kudryashov N.A., Sinelshchikov D.I. Nonlinear waves in bubble liquids with consideration for viscosity and heat transfer // Phys. Lett. A, 2010. V. 374. I. 19-20. P. 2011-2016.
5. Kudryashov N.A., Sinelshchikov D.I. Equation for three-dimensional nonlinear waves in liquid with gas bubbles // Phys. Scr., 2012. V. 85, 025402.

6-7

НОВЫЕ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В МЕХАНИКЕ МНОГОФАЗНЫХ СРЕД

В.С. Суров

Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

E-mail: svcs@csu.ru

В докладе обсуждаются такие новые математические модели механики многофазных сред как гиперболическая модель односкоростной многокомпонентной вязкой теплопроводной смеси, а также гиперболическая модель многоскоростной многокомпонентной среды.

Односкоростная модель многокомпонентной среды используется при моделировании волновых процессов во вспененных жидкостях и полимерах, в пузырьковых жидкостях, для локализации контактных поверхностей в многожидкостной гидродинамике. Включение в уравнения смеси сил вязкого трения и теплопроводности расширяет сферу приложения модели и дает возможность проводить расчеты течений, например, углеводородных смесей, биологических жидкостей и т.д. Для обеспечения гиперболичности уравнений модели вместо закона Фурье использован закон Максвелла–Катанео, а также введены релаксационные силы вязкого трения. Представлены результаты численных экспериментов, полученные с использованием конечноразностной схемы Куранта–Изаксона–Риса.

Многоскоростная модель многокомпонентной среды, в отличие от других описанных в литературе моделей, строится только на основе законов сохранения. Вводится некоторое состояние смеси, называемое как смесь в целом, характеризующее осредненными параметрами. Применяя к введенной таким образом смеси в целом законы сохранения массы, импульса и энергии, получим уравнения по виду совпадающие с газодинамическими, которым должны удовлетворять осредненные переменные. К этим соотношениям добавляются уравнения, выражающие законы сохранения для отдельных компонентов смеси. Показано, что построенная таким способом модель гетерогенной среды относится к гиперболическому типу. С использованием численного метода Куранта–Изаксона–Риса рассчитан ряд модельных задач о распаде произвольного разрыва в воздухе, водном тумане и запыленном газе. Отмечено, что в рамках предложенной модели многоскоростной среды находит объяснение акустический эффект «эха» (расщепления основного сигнала на два) в водном тумане, наблюдаемый в экспериментах Тиндаля.

NEW HYPERBOLIC MODELS IN A MECHANICS OF MULTIPHASE MEDIUMS

V.S. Surov

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: svcs@csu.ru

In the report such new mathematical models of a mechanics of multiphase mediums as hyperbolic model one-high-speed multicomponent viscous теплопроводной of a mixture, and also hyperbolic model of a multihigh-speed multicomponent medium are considered.

The one-high-speed model of a multicomponent medium is used at modeling wave processes in foamed liquids and polymers, in bubble liquids, for localization of contact surfaces in multiliquid hydrodynamics. The inclusion in the equations of a mixture of forces of viscous friction and thermal conductions expands an orb of application of model and enables to carry out accounts of currents, for example biological liquids etc. For security hyperbolic of the equations of model instead of the law of Fourier the law of Maxwell-Cattaneo is used, and also the relaxational forces of viscous friction are entered. The outcomes of numerical experiments obtained with use finite-difference of the circuit of Courant–Isaacson–Rees are submitted.

The multihigh-speed model of a multicomponent medium, as against other models, circumscribed in the literature, is under construction only on the basis of conservation laws. Some condition of a mixtures called as a mixture in whole, characterized in average parameters is introduced. Applying to the entered thus mixture in the whole conservation laws of a mass, impulse and energy, we shall receive the equations by the form conterminous with gasdynamic, which should satisfy average variables with. To these relations the equations expressing conservation laws for separate components of a mixture are added. Is shown, that the constructed in such a way model of a heterogeneous medium concerns to a hyperbolic type. With use of a numerical method of Courant–Isaacson–Rees a series of model tasks about disintegration of an arbitrary rupture in air, water fog and dusty gas is designed. Is marked, that within the framework of the offered model of a multihigh-speed medium discovers an explanation acoustic effect of «echo» (decomposition of the basic signal on two) in a water fog observed in experiments.

6-8

КОД ЭГАК-КД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ 3D ТЕЧЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕТОЧНЫХ И ДИСКРЕТНЫХ ПОДХОДОВ

Ю.В. Янилкин, С.П. Беляев, В.Н. Софронов,
В.А. Шмелев, К.С. Мокина, Е.В. Потехина,
Л.И. Дегтяренко, А.С. Разумков, Н.Р. Антипина,
А.Л. Потехин, М.В. Черенкова, В.Н. Пискунов,
И.А. Давыдов

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

Описана организация кода ЭГАК-КД. В данном коде для численного моделирования 3D течений сплошной среды предлагается совместное использование сеточных методов и методов кластерной динамики в связанной постановке.

В основе метода кластерной динамики (КД) лежат следующие основные положения [1]:

- сплошная среда представляется в виде набора выделенных структурных элементов (точечных базовых кластеров);
- уравнения механики сплошной среды заменяются на уравнения движения взаимодействующих кластеров;

– для описания динамики движения кластеров применяются методы, аналогичные молекулярной динамике;

– выбор потенциалов взаимодействия кластеров осуществляется, исходя из реального уравнения состояния моделируемого материала.

Расчет связанных задач основан на методе покомпонентной декомпозиции (по веществам). Предполагается, что для каждого физического вещества выбран собственный метод численного моделирования. Проблема совмещения различных методов на поверхностях контакта решена с учетом взаимного влияния двух сред (сплошной и кластерной).

Для сеточных методов используются разностные схемы кодов ЭГАК и ТРЭК [2], а для методов КД–гамильтоновы разностные схемы, сохраняющие каноничность фазового потока.

Код ЭГАК-КД разработан для моделирования задач, требующих использования высокопроизводительных параллельных вычислительных систем. Разработанная ранее для сеточных методов технология мелкозернистого поточечного распараллеливания [3] обобщена на метод частиц.

Представлены результаты расчетов методических задач.

Литература

1. Davydov I.A., Piskunov V.N., Voronin B.L. et al. Cluster dynamics method for simulation of dynamic processes of continuum mechanics // Computational Materials Science, 2010. Vol. 49. P. 32–36.
2. Янилкин Ю.В., Беляев С.П., Бондаренко Ю.А. и др. Эйлеровы численные методики ЭГАК и ТРЭК для моделирования многомерных течений многокомпонентной среды. Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ. Научно-исследовательское издание, Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, вып. 12. С. 54–65, 2008.
3. Беляев С.П. Метод мелкозернистого распараллеливания с динамической балансировкой на примере задачи газовой динамики и вычислительные эксперименты на параллельной системе // ВАИТ, сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 2000. N 1. 45–49.

EGAK-KD CODE FOR SIMULATION OF 3D FLOWS USING GRID AND DISCRETE APPROACHES

Yu.V. Yanilkin, S.P. Belyaev, V.N. Sofronov, V.A. Shmelev,
K.S. Mokina, E.V. Potekhina, L.I. Degtyarenko,
A.S. Razumkov, N.R. Antipina, A.L. Potekhin,
M.V. Cherenkova, V.N. Piskunov, I.A. Davydov

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

EGAK-KD code organization is described. This code suggests shared use of grid methods and cluster dynamics methods in associated arrangement for simulation of 3D continuum flows.

Cluster dynamics (CD) method is based on the following key points [1]:

- the continuum is given as a set of distinguished structural elements (base point clusters);
- continuum mechanics equations are changed to interacting cluster movement equation;

- methods similar to molecular dynamics are used to describe cluster movement dynamics;
- cluster interaction potentials are taken from the real equation of state of the simulated material.

The simulation is based on (substance) component-wise decomposition. It is assumed that a proper simulation method is given for each substance. The problem of combination of different methods for interfaces is solved considering the mutual influence of two media (continuum and cluster).

The difference schemes of EGAK and TREK codes [2] are used for grid methods, and phase flow canonicity preserving Hamiltonian difference schemes are used for CD methods.

EGAK-KD code is developed for simulations requiring high-performance parallel computation systems. Fine-grained point parallelization [3] developed earlier for grid methods is generalized for particle method.

Method simulation results are given.

References

1. Davydov I.A., Piskunov V.N., Voronin B.L. et al. Cluster dynamics method for simulation of dynamic processes of continuum mechanics // *Computational Materials Science*, 2010. Vol. 49. P. 32–36.
2. Yanilkin Yu.V., Belyaev S.P., Bondarenko Yu.A., et. al. EGAK and TREK Euler numerical methods for simulation of multidimensional flows of multi-component medium. RFNC–VNIIEF Proceedings. Scientific and Research Edition, Sarov: RFNC–VNIIEF, Issue 12, 2008, 54–65.
3. Belyaev S.P. Dynamic balancing fine-grained parallelization method as an example of gas dynamics problem and computational experiments using parallel system // *VANT, Ser. Mathematical physics numerical simulation methods and codes*. 2000. N 1. 45–49.

6-9

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СРЕДЫ

П.П. Захаров, И.С. Меньшов

ВНИИА им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

Предлагается математическая модель расчета течений неоднородных сред на базе введения единого уравнения состояния [1]. Под неоднородной средой подразумевается среда, состоящая из нескольких компонент (веществ), имеющих различные механические, термодинамические свойства, каждый из которых занимает свою область пространства и разделенные контактной поверхностью. Область занимаемая той или иной компонентой определяется по полю распределения массовых концентраций соответствующих компонент. Предлагаемая модель реализована в программном комплексе с использованием численного метода типа С.К. Годунова[2]. Неопределенность данного подхода возникает при расчете так называемых смешанных ячеек, содержащих две или более компонент. Используется два вида замыканий для расчета в смешанных ячейках. Первый использует предположения о равенстве давлений и температур. Второй – определяет истинные давления из анализа поля плотности. Данные замыкания

проанализированы и обнаружены модельные эффекты, к которым они приводят. Подход с единым уравнением состояния продолжен для расчета взрывчатых веществ (ВВ). Для этого вводятся удельная массовая концентрация ВВ (вообще говоря несколько ВВ), для которой записывается уравнение макрокинетики.

Литература

1. Меньшов И.С. Использование единого уравнения состояния для описания течений неоднородных сред. Препринт Ин-та прикладной механики, 1982.
2. Численное решение многомерных задач газовой динамики. / Под ред. С.К. Годунова. М.: Наука, 1976. 400 с.

NUMERICAL MODELING OF MULTIMATERIAL MEDIUM FLUIDS

P.P. Zakharov, I.S. Men'shov

All-Russia Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

Mathematical model of not uniform medium fluid calculation based on united equation of state is suggested. Not uniform medium means medium composed of several components (materials) with different mechanic, thermodynamic properties and are separated with contact surface. Domain occupied by certain component is determined by mass concentration field. Suggested model is implemented in computer program that uses Godunov's type numerical method. Uncertainty of such approach takes place when mixed cells (cells that contain two or more materials) are calculated. There are two types of closure for calculation in mixed cells. The first one uses two assumptions: pressure equilibrium and temperature equilibrium. The second one determines true densities by density field analysis. These closures are analyzed and some model effect are found out. Approach with united equation of state is extended to explosive materials calculation. In order to do this specific mass concentration of explosive with macrokinetics equation is used.

6-10

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

А.А. Кулешов, Е.Е. Мышецкая

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

E-mail: andrew_kuleshov@mail.ru

Лесные пожары – сложное природное явление, для математического моделирования которого к настоящему времени предложены различные подходы. Турбулентные течения, возникающие в реальных лесных пожарах, имеют сложный трехмерный характер и их численное моделирование на основе трехмерных моделей требует больших вычислительных ресурсов и возможно лишь с применением новейших суперкомпьютеров. Однако, для оперативной оценки обстановки и прогноза распространения пожаров необходимы модели, с помощью которых можно выполнить быст-

рые расчеты динамики этого процесса. В создании таких моделей целесообразно использовать упрощенные двумерные постановки, учитывающие основные особенности рассматриваемого процесса. Одной из таких моделей является разработанная авторами двумерная двухфазная математическая модель лесных пожаров [1, 2]. Модель основана на осреднении трехмерной системы уравнений по высоте однородного слоя лесных горючих материалов. Однако, эта модель отражает фундаментальные законы сохранения массы, импульса и энергии и учитывает все физические явления в зоне пожара, которые важны для распространения фронта пожара. На основе этой однослойной модели можно построить более сложные многослойные модели лесных пожаров. Представлены численный метод решения задачи, основанный на расщеплении системы уравнений модели по физическими процессами на несколько подсистем с конечно-разностной аппроксимацией этих подсистем, и результаты демонстрационных расчетов процесса распространения лесных пожаров. Результаты демонстрационных расчетов показывают, что построенная двумерная двухфазная модель дает качественно правильную картину образования фронта пожара и его распространения в условиях неоднородного распределения запасов лесных горючих материалов на местности, наличия препятствий для распространения огня, таких как дороги, просеки, реки, поляны, водоемы и т.д., а также при возможном наличии ветра, т. е. при условиях, в которых протекают реальные лесные пожары.

Литература

1. Кулешов А.А. Математические модели лесных пожаров // Математическое моделирование, 2002. Т. 14. № 11. С. 33–42.
2. Кулешов А.А. Математическое моделирование лесных пожаров с применением многопроцессорных ЭВМ // Математическое моделирование, 2008. Т. 20. № 11. С. 28–34.

NUMERICAL SIMULATION OF FOREST FIRE SPREAD

A.A. Kuleshov, E.E. Myshetskaya

Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS,
Moscow, Russia

E-mail: andrew_kuleshov@mail.ru

Forest fire is a complex natural phenomenon for which various mathematical modeling approaches have been proposed. Turbulent flows arising during real forest fires have a complex three-dimensional character and their numerical simulation on the basis of three-dimensional models demands the long time of computation and supercomputer applications. However, for an operative estimation and forecasting of process of fire spreading, models are needed that can enable to carry out fast computations of this process dynamics. In the development of such models, it is expedient to use simplified two-dimensional problem statements taking into account the features appropriate to the process under consideration. A two-dimensional two-phase mathematical model of forest fires developed by the authors [1, 2] is considered. The model is based on the averaging of three-dimensional set of equations over the thickness of the homogeneous forest

fuel materials layer. Nevertheless, these models reflect the fundamental physical laws of conservation of mass, momentum and energy and take into account all of the physical phenomena in the fire zone that are important for the fire dynamics. On the basis of this single-layer model it is possible to construct more complex many-layer models of forest fires. Numerical method by splitting the system of equations by physical processes into several subsystems with the finite-difference approximation of this subsystems and the results of a demonstrative numerical simulation of the process of forest fire spread are presented. The results of numerical simulation are shown that the developed two-dimensional model correctly reflects the process of the fire front spreading for the case of non-homogeneous forest fuel materials distribution in the area, with such obstacles as roads, glades, water bodies etc., as well as in the presence of wind, i.e., for a particular set of conditions under which real forest fires occur.

References

1. Kuleshov A.A. Mathematical forest fire models // Mathematical modeling, 2002. V. 14. No. 11. P. 33–42 (Russian).
2. Kuleshov A.A., Myshetskaya E.E. Mathematical simulation of forest fires using multiprocessor computers // Mathematical Models and Computer Simulations, 2009. V.1, No. 4. P. 629–634.

6-11

ПРОГРАММА ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СПИРАЛЬНЫХ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

А.С. Пикарь, П.В. Королёв

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

E-mail: pikar_alex@mail.ru

В докладе представлен алгоритм программы для численного моделирования физических процессов во взрывных спиральных генераторах.

Программа организована так, чтобы расчет работы генераторов можно было проводить «из первых принципов» без введения каких либо эмпирических коэффициентов.

Геометрия генератора токопроводов и нагрузки задается в виде слоев материалов. Для спирали генератора задается положение витков, их диаметр, толщина провода, вид соединения. Задается эксцентриситет между лайнером и спиралью.

Сначала методом векторного потенциала находится распределение магнитных полей в полости генератора. Численно исследуется «эффект близости» – искажение магнитных полей при приближении лайнера и взаимоиנדукция между витками генератора. Из экспериментальных исследований, либо численных расчетов задается скорость отдельных участков лайнера. Из предварительных численных расчетов задается запаздывание образования точки контакта при столкновении лайнера с витками.

В нулевом приближении проводится расчет работы генератора с помощью аналитических формул для

индуктивностей и толщины скин-слоя. Результаты расчета используются для вычисления нелинейной толщины скин-слоя в первом приближении. Расчет повторяется. На практика бывает достаточно двух-трех приближений для достижения приемлемой точности.

Программа позволяет проводить расчет как простых, так и сложных, многосекционных спиральных генераторов с питанием от конденсаторной батареи либо системы постоянных магнитов, учитывать влияние эксцентриситета, наличие внешних проводящих экранов, учитывать динамику разрушения изоляции проводов и запаздывание образования точки контакта.

CODE FOR NUMERICAL SIMULATION OF HELICAL MAGNETO-CUMULATIVE GENERATORS

A.S. Pikar, P.V. Korolev

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

E-mail: pikar_alex@mail.ru

The paper presents code algorithm for numerical simulation of physical processes in helical magneto-cumulative generators.

Calculation of the generator operation uses «first-principle approach» without empirical coefficients.

Geometry of the current conductors of the generator and load is set up in the form of materials layers. Location of the coils, their diameter, wire thickness, and connection type are setup for the generator helix. Eccentricity between the liner and helix is also set up.

Using a vector-potential method we find distribution of the magnetic fields in the generator cavity. A «proximity effect» – magnetic field deformation at the liner approaching and mutual induction between the coils of the generator is studied numerically. Velocity of separate liner sections has been taken from the experimental research or numerical calculations. Delay of the contact point formation at the liner collision with the coils is set up from preliminary numerical calculations.

Calculation of the generator operation using analytical formulas for inductances and skin-layer thickness is carried out in zero approximation. The calculation results are used for calculation of non-linear thickness of the skin-layer in the first approximation. The calculation is repeated. Two-three approximations are enough to obtain an acceptable precision.

The code allows calculating both simple and complicated multi-sectional helical generators, powered from a capacitor bank and a system of permanent magnets, taking into account eccentricity effect, existence of outer conducting shields, considering destruction dynamics of wires insulation and delay of the contact point formation.

6-12

СПОСОБЫ РЕАЛИЗАЦИИ ДВУМЕРНОЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ МЕТОДИКИ Д НА ГИБРИДНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Е.Е. Чупраков

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

В настоящее время все большую популярность набирают вычислительные методы, нацеленные на использование графических арифметических ускорителей. Постоянно увеличивается и число высокопроизводительных вычислительных систем с гибридной архитектурой, совмещающей вычислительные процессоры общего назначения и специализированные арифметические модули.

Интерес к данной архитектуре обеспечивается ее значительным преимуществом по цене и энергопотреблению в сравнении с традиционными универсальными процессорами. Эти достоинства на сегодняшний день делают гибридную архитектуру явным фаворитом при построении вычислительных систем мультитерафлопного класса.

К сожалению, существенным препятствием к широкому использованию арифметических ускорителей является их специализированная модель программирования. Для получения преимуществ от использования гибридных вычислительных систем существующие программы, написанные для универсальных процессоров, должны быть значительно модифицированы. Очень часто алгоритмы, нацеленные на арифметические ускорители, требуется изобретать заново, отказываясь от традиционных подходов.

Данный доклад рассматривает возможные способы реализации программы двумерной газовой динамики на гибридной архитектуре. Примером служит разрабатываемая в ИТМФ газодинамическая методика Д [1].

Методика Д применяется для решения многомерных нестационарных задач механики сплошной среды в переменных Лагранжа на регулярной сетке. Она основана на явной разностной схеме, имеющей сеточный шаблон типа «крест». В докладе исследуются вопросы распараллеливания такой схемы на графических арифметических ускорителях с помощью технологии CUDA [2], рассматриваются некоторые приемы оптимизации программ для гибридной архитектуры. Приводятся результаты тестовых расчетов.

Литература

1. Софронов И.Д., Делов В.И., Дмитриева и др. Методика Д для расчета многомерных задач механики сплошной среды в переменных Лагранжа на регулярной сетке // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1999. Вып. 4. С. 42–50.
2. Nvidia Corporation [Electronic resource]. Mode of access: <http://www.nvidia.com>.

METHODS TO IMPLEMENT A 2D HYDRODYNAMIC CODE ON A HYBRID- ARCHITECTURE COMPUTING SYSTEM

E.E. Chuprakov

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

Computational methods for graphic arithmetic accelerators are gaining popularity nowadays. Also, high-performance hybrid-architecture computers combining general-purpose processors with specialized arithmetic modules are ever increasing in number.

The value of such computer architecture results from its significant advantages in price and power consumption against traditional general-purpose processors. Owing to these advantages the hybrid architecture has surely become a favorite in designing multi-teraflops computing systems.

Unfortunately, a specialized programming model is an obstacle to extensive application of arithmetic accelerators. The existing codes written for general-purpose computers should be substantially modified to take advantages of hybrid computing systems. Very often there is a need in developing new algorithms for arithmetic accelerators instead of the traditional ones.

The paper considers possible methods of implementing a 2D hydrodynamic code on a hybrid-architecture computer. Code D for gas dynamics [1] developed at ITMF of RFNC-VNIIEF is an example.

Code D is used to solve multidimensional time-dependent continuum mechanics problems in Lagrangian variables using a regular grid. It is based on the explicit difference scheme with grid template «krest» (cross). Some issues of paralleling such schemes on graphic arithmetic accelerators with CUDA technology [2] and possible ways to optimize codes for hybrid architectures are considered. Results of test computations are presented.

References

1. Sofronov I.D., Delov V.I., Dmitrieva L.V., Artemiev V.I., Budnikov V.I., Vershinin V.B., Dmitriev N.A., Korepova N.V., Linnik D.M., Malinovskaya E.V., Murugova O.O., Sadchikov V.V., Samigulina R.Z., Suslova S.Yu., Khideva E.S., Chernyshev Yu.D. Code D for multidimensional continuum mechanics problems in Lagrangian variables on a regular grid // *Voprosy Atomnoi Nauki i Tekhniki. Ser.: Math. Model. Phys. Process.* 1999. Issue 4, pp. 42–50.
2. Nvidia Corporation [Electronic resource]. Mode of access: <http://www.nvidia.com>.

6-13

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОГО ПАРАЛЛЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «TIS_P» ДЛЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ГИБРИДНОЙ АРХИТЕКТУРЫ

М.И. Климов

ВНИИА им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

Расчетный комплекс «TIS» предназначен для численного решения задач упругопластического деформирования твердых тел. В основе численного метода лежат метод Годунова [1] и метод разделения по физическим процессам [2]. Для проведения эффективных расчетов задач с помощью комплекса «TIS» был создан «TIS_P», направленный на увеличение производительности комплекса. Данная разработка является параллельной реализацией «TIS» для многопроцессорных и/или многоядерных систем и для GPU архитектуры. Параллельное взаимодействие между процессами осуществляется с помощью MPI [3]. Адаптация комплекса для графических ускорителей происходила с использованием технологии CUDA [4]. Доклад посвящен описанию комплекса «TIS_P», особенностей его параллельной реализации, анализу полученных результатов и производительности на конкретных задачах.

Литература

1. Численное решение многомерных задач газовой динамики. / Под ред. С. К. Годунова. М.: Наука, 1976. 400 с.
2. Роч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980.
3. MPI на parallel.ru: http://parallel.ru/tech/tech_dev/mpi.html
4. CUDA Zone: http://www.nvidia.ru/object/cuda_home_new_ru.html

THE DEVELOPMENT OF PARALLEL PACKAGE «TIS_P»

M.I. Klimov

All-Russia Research Institute of Automatics (VNIIA),
Moscow, Russia

«TIS_P» is a part of the package «TIS» which is used for effective calculation of continuum mechanics' problems. Main objective of «TIS_P» is providing high performance for multiprocessor and/or multicore systems and GPU architecture. This development is a parallel implementation of «TIS». Parallel communication between nodes is realized by using MPI. Adaptation for GPU occurs with the help of CUDA technology. The report is focused on the description of «TIS_P», main features of its' parallel implementation, analysis of the results and performance on examples of specific problems.

Rerences

1. Численное решение многомерных задач газовой динамики. / Под ред. С. К. Годунова. М.: Наука, 1976. 400 с.
2. Роч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980.
3. MPI на parallel.ru: http://parallel.ru/tech/tech_dev/mpi.html
4. CUDA Zone: http://www.nvidia.ru/object/cuda_home_new_ru.html

6-14

РАСЧЕТ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ В КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ НАГРУЖЕНИЯХ

В.В. Погорелко, А.П. Яловец

Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

E-mail: vik_ko83@mail.ru, yal@csu.ru

Интерес к исследованию композитов обусловлен, прежде всего, их широким практическим применением. В настоящее время хорошо изучено как экспериментально, так и теоретически интенсивное нагружение однородных сред. Теоретические исследования интенсивного нагружения композиционных материалов ограничены трудностями применения развитых на сегодня моделей гетерогенных сред к решению этих задач.

Целью данной работы является построение модели композиционного материала и численное моделирование в ней течений, возникающих при воздействии интенсивного потока заряженных частиц.

Система уравнений для гетерогенной среды включает в себя уравнения непрерывности, движения и внутренней энергии для каждой компоненты, которые имеют универсальный вид для любой гетерогенной среды. Данную систему замыкают уравнения, описывающие релаксацию компонент к равновесному состоянию, явный вид которых определяется конкретной структурой гетерогенной среды. Для нахождения функции энерговыделения в облучаемой среде решается кинетическое уравнение для быстрых частиц. В данной работе исследована гетерогенная среда – матрица со сферическими включениями.

Исследована роль компонент композита в формировании полей напряжений и температур в облучаемой мишени.

CALCULATION OF STRESS FIELDS IN COMPOSITE AT INTENSIVE LOADINGS

V.V. Pogorelko, A.P. Yalovets

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: vik_ko83@mail.ru, yal@csu.ru

Interest to examination of composites is caused, first of all, by their wide practical application. Now intensive loading of the homogeneous mediums is detailed studied experimentally as well as theoretically. Theoretical examinations of an intensive loading of composites are restricted by difficulties of application of the heterogeneous mediums models developed for today to the solution of these problems.

The purpose of this work is development of a composite material model and numerical modeling flows, which appear at influence on composite of powerful charged particle beams.

The system of equations for heterogeneous medium include the continuity equation, a motion and an internal energy equations for everyone components which have the

universal appearance for any heterogeneous medium. The given system is closed by the equations featuring a components relaxation to an equilibrium state. The view of these equations is spotted by concrete structure of heterogeneous medium. To calculate of energy release function in irradiated medium the kinetics equation of fast particles is solved. In the given work the heterogeneous medium (a matrix with spherical inclusions) is investigated.

The role of composite components at stress and temperature fields' formation in an irradiated target is researched.

6-15

МОДЕЛЬ АНИЗОТРОПНОГО УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ГИДРОКОДА FLAG

А. Хантер, Т.Р. Кэнфилд, Ф.Л. Аддессо

Лос-Аламосская национальная лаборатория, США

Моделирование высоко-анизотропных материалов может быть очень затратным в вычислительном отношении из-за большого количества независимых уравнений и зависимостей направлений. Часто в моделях деформирования материала принимается допущение об изотропии материала, так как допущенная симметрия значительно упрощает реализацию модели для упругопластических материалов. Однако большинство материалов демонстрирует некоторый уровень анизотропного поведения во время деформации. Во многих случаях, например, когда большие деформации протекают в пластическом режиме, анизотропия материала может оказать значительное влияние на механическое поведение. Чтобы точно смоделировать деформационное поведение материала, необходимо включить анизотропный подход.

В докладе представлена реализация модели анизотропного упругопластического материала в гидродинамическом коде FLAG, который в настоящее время используется в Лос-Аламосской национальной лаборатории (ЛАНЛ). Чтобы уменьшить размерность тензора и повысить вычислительную эффективность, мы реализовали замену базового компонента тензора для преобразования напряжения в систему ортогональных координат (пространство напряжений). Также будут представлены результаты моделирования ударных воздействий Тейлора, чтобы продемонстрировать реализацию анизотропного материала и проверить модель по экспериментальным результатам. Такое моделирование можно использовать для исследования деформационного поведения во многих высокоанизотропных материалах.

Литература

1. Maudlin P.J., Harstad E.N., Mason T.A., Zuo Q.H., Addessio F.L., Material Anisotropy. (Неопубликовано).

ANISOTROPIC ELASTIC-PLASTIC MATERIAL MODEL FOR THE FLAG HYDROCODE

A. Hunter, T.R. Canfield, F.L. Addessio

Los Alamos National Laboratory, USA

Modeling highly anisotropic materials can be computationally expensive due to the increased number of independent equations and directional dependencies. Often, material isotropy is assumed in material deformation models because the assumed symmetry greatly simplifies the elastic-plastic implementation. However, most materials exhibit some level of anisotropic behavior during deformation. In many cases, such as in applications where large deformations occur in the plastic regime, the material anisotropy can greatly impact mechanical behavior. In order to accurately model material deformation behavior, it is essential to include anisotropic framework.

This presentation presents the implementation of an anisotropic elastic-plastic material model into the FLAG Hydrodynamics code, which is currently in use at Los Alamos National Laboratory (LANL). In order to reduce tensor dimensionality and increase computational efficiency, we implement a tensor change-of-basis to transform the stress into an orthogonal coordinate system (stress space). Additionally, results from Taylor-impact simulations will be presented to illustrate the anisotropic implementation and validate the model against experimental results. These simulations can be used to investigate deformation behavior in many highly anisotropic materials.

Reference

1. Maudlin P.J., Harstad E.N., Mason T.A., Zuo Q.H., Addessio F.L., Material Anisotropy. (Unpublished).

6-16

ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ С МЕЗОСКОПИЧЕСКИМИ ДЕФЕКТАМИ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Ю.В. Баяндин, О.Б. Наймарк, Н.В. Савельева

Институт механики сплошных сред УрО РАН,
Пермь, Россия

E-mail: buv@icmm.ru

Целью представленных исследований является разработка и экспериментальная верификация трехмерных широкодиапазонных определяющих соотношений упруговязкопластических материалов с мезоскопическими дефектами. В работе рассматривается поведение преимущественно металлов при умеренных значениях давлений и скоростей деформирования (до 10^5 1/с). Представлены результаты численного моделирования динамического деформирования металлов в условиях прямого удара, сжатия и сдвига.

Реальные твердые тела имеют сложную иерархическую структуру, которая изменяется в процессе деформирования. Эти изменения могут быть классифицированы как пластическая деформация и накопление повреждений, реализуемые как процессы зарождения,

развития и взаимодействия дефектов на определенных структурных уровнях, а также взаимодействия между этими уровнями. Экспериментальные исследования реакций материалов на нагружение в широком интервале интенсивностей и скоростей деформирования обнаруживают ряд закономерностей в процессах пластичности и разрушения и показывают их связь с коллективными свойствами типичных мезоскопических дефектов (дислокационных субструктур, микросдвигов, микротрещин). На основе ранее разработанной статистической теории твердого тела с мезоскопическими дефектами [1–3] предложены эволюционные уравнения для двух структурных переменных, характеризующих поведение ансамблей дефектов, – тензора плотности мезоскопических дефектов и структурного параметра скейлинга, определяющего отношение двух характерных масштабов (размера дефектов и среднего расстояния между ними). Разрушение материала рассматривается как процесс накопления повреждений (микросдвигов, микротрещин), а критерием разрушения является условие достижения значений интенсивностей введенного тензора плотности дефектов критической величины. Разработанная трехмерная математическая модель была реализована в виде отдельного программного модуля в пакете прикладных программ Abaqus/Explicit. Рассмотрены задачи прямого удара и пробивания преграды, а также динамического нагружения в условиях сжатия и сдвига. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 11-05-96005-р_урал_a, 11-01-96005-р_урал_a, № 11-01-96010-р_урал_a, № 11-01-00712-a).

Литература

1. Наймарк О.Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения // Физическая мезомеханика, 2003. Т. 6. № 4. С. 45–72.
2. Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б., Asay J.R. Численное моделирование и анализ автомодельной структуры ударных волн в алюминии // Физика экстремальных состояний вещества. 2006. С. 92–94.
3. Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б., Уваров С.В. Численное моделирование откола, индуцированного мезодефектами при ударно-волновом нагружении металлов // Вычислительная механика сплошных сред. 2010. Т. 3. № 1. С. 13–23.

TREE-DIMENSIONAL SIMULATION OF DEFORMATION AND FAILURE OF SOLIDS WITH MESOSCOPIC DEFECTS UNDER INTENSIVE LOADING

Yu.V. Bayandin, O.B. Naimark, N.V. Savelieva

Institute of Continuous Media Mechanics, UB RAS,
Perm, Russia

E-mail: buv@icmm.ru

The purposes of the presented research are the development and experimental verification of 3D wide-range constitutive equations of elastoviscoplastic materials with mesoscopic defects. Mainly the behavior of metals under dynamic loading at moderate values of pressure and strain rate (up to 10^5 1/s) is considered. Results of numerical simulation of dynamic loading of metals in condition of direct impact, compression and shear are presented.

Real solids have complex hierarchical structure which changes during deformation. These changes can be classified as plastic deformation and the accumulation of damages realized as processes of origin, development and interaction of defects at different structural scales, and also interactions between its. Experimental investigation of material plastic and damage response in wide range of strain rates reveals series of regularities and shows linkage with collective properties of typical mesoscopic defects (dislocation substructures, microsensors and microcracks). The developed statistical model of solid with mesoscopic defects allowed the formulation of evolution equations in terms of two independent variables – the defect density tensor and structural scaling parameter and the simulation of shock wave propagation in the linkage with structural relaxation phenomena [1–3]. Material damage is considered as process of defects accumulation (microshifts, microcracks). And the criterion of failure is the condition achievement of intensities of defect tensor up to critical values. The developed three-dimensional mathematical model has been realized in the form of the program module in the application-specific program package Abaqus/Explicit. Direct impact, dynamic compression and shear loading are considered. The obtained results are corresponds with experimental data.

The research was supported by the projects of the Russian Foundation of Basic Research (projects NN 11-05-96005, 11-01-96005, 11-01-96010, 11-01-00712).

References

1. Naimark O.B. Collective properties of defects ensembles and some non-linear aspects of plasticity and failure // *Phys. Mech.*, 2003. V. 6. № 4. P. 45–72.
2. Bayandin Yu.V., Naimark O.B., Asay J.R. Numerical simulation and analysis of self-similar structure of shock waves in Al // *Physics of extreme states for matter / Eds. V.E. Fortov et al., Chernogolovka.* 2006. P. 92–94.
3. Bayandin Yu.V., Naimark O.B., Uvarov S.V. Numerical simulation of spallation induced by mesodeflects in metals under shock loading // *Computational continuum mechanics.* 2010. V. 3. № 1. P. 13–23.

6-17

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПАКЕТА ПРОГРАММ УРС-ОФ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ

Д.Г. Гордеев, Е.Ф. Голубкова, Л.Ф. Гударенко,
В.Г. Куделькин, О.В. Сапронова

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

При численном решении уравнений механики сплошной среды используемые в прикладных программах системы уравнений движения, как правило, дополняются уравнениями, описывающими теплофизические свойства веществ. Такими уравнениями, в частности, являются уравнения состояния (УРС), связывающие термодинамические величины. При сравнительно небольших давлениях и температурах совместно с уравнениями состояния используются уравнения,

определяющие упругопластические свойства веществ. При решении задач с учетом теплопроводности вместе с уравнениями состояния требуются коэффициенты поглощения фотонов, характеризующие взаимодействие рентгеновского излучения с веществом.

Во ВНИИЭФ разработан пакет программ УРС-ОФ – общая система уравнений состояния, уравнений для расчета упругопластических свойств и пробега фотонов. Пользователем данного пакета может стать любая прикладная программа (ПП) численного решения задач математической физики. Пакет УРС-ОФ независим от использующей ее ПП и типа ЭВМ, позволяет вычислять широкий набор величин по любой из трех пар входных переменных: плотность – энергия; плотность – температура; плотность – давление.

Пакет УРС-ОФ функционирует на всех других типах ЭВМ, имеющихся в ИТМФ, используется в прикладных программах, написанных на различных языках программирования высокого уровня, и обслуживает практически все прикладные программы ИТМФ.

Пакет УРС-ОФ содержит: программы расчета термодинамических функций и наборы параметров (констант); языковые средства взаимодействия с пакетом; стандартный интерфейс, обеспечивающий взаимодействие прикладных программ с объектами пакета на стадии решения задачи; программные средства, обеспечивающие поддержку хранения данных, автоматизированного подключения объектов к прикладным программам; современную интерактивную справочную систему, представляющую собой автономное web-приложение; программы тестирования; базу экспериментальных данных о свойствах веществ, исследованных с использованием ударных волн.

Пакет УРС-ОФ содержит более 1000 уравнений состояния различных веществ, обеспечивающих решение широкого класса задач. Разработанные программы сопровождения библиотек позволяют достигнуть высокой степени надежности расчетов термодинамических величин.

THE CURRENT STATE OF URS-OF SOFTWARE PACKAGE FOR SIMULATION OF THERMODYNAMIC AND MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS

D.G. Gordeev, E.F. Golubkova, L.F. Gudarenko,
V.G. Kudelkin, O.V. Sapronova

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

The motion equations used in applications for the numerical solution of continuum mechanics problems are supplemented, as a rule, by equations describing the thermal physics of materials. These equations include, in particular, equations of state (EOSes) relating thermodynamic quantities. At relatively low pressures and temperatures, equations of state are used together with equations determining the elastic-plastic properties of materials. To solve problems with regard to heat transfer, photon absorption coefficients characterizing the material interaction with X-rays are required along with equations of state.

URS-OF software developed at VNIIEF is a general system of state equations and equations describing the elastic-plastic properties of materials and photon paths. Any application for computational physics problems may become the user of the developed software package. URS-OF is independent of the application which uses it and the type of computer and allows calculating a wide variety of quantities using any of the three pairs of input variables: density – energy, density – temperature, or density – pressure.

URS-OF can be operated on all the types of computers available at ITMF, it is used in applications written in various high-level programming languages and all ITMF's applications.

URS-OF package of codes includes codes for the calculation of thermodynamic functions and sets of parameters (constants); language aids for the operation of this package; a standard interface that provides communication between applications and objects of the package during the problem solution process; data storage supporting tools and tools for automated connection of objects to applications; a modern interactive reference system, which is an independent web-application; testing codes; and a base of experimental data on the properties of materials investigated using shock waves.

URS-OF contains more than 1000 equations of state for various materials that allow solving a wide range of different problems. The developed library-support codes allow gaining a high accuracy and reliability of thermodynamic quantity simulations.

6-18

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТИТАНОВЫХ ОБРАЗЦОВ ПО ЧЕТЫРЕМ СХЕМАМ ДКУП

С.А. Зелепугин^{1,2}, А.Н. Шипачев²,
А.С. Зелепугин^{1,2}, Е.В. Ильина²

¹ТНЦ СО РАН, Томск, Россия

²Томский государственный университет, Томск, Россия

E-mail: szel@dsm.tsc.ru; szel@yandex.ru

Численно исследован процесс деформирования металлических образцов при динамическом канально-угловом прессовании (ДКУП) [1, 2] для различных схем нагружения: инерционной, динамической, динамической с пуансоном и динамической двухпоршневой. Определены эффективные значения начальной скорости образцов из титана, алюминия и меди для инерционной схемы нагружения, а для динамической – начальной скорости и действующего на образец давления. Показано преимущество динамической схемы по сравнению с инерционной, заключающееся в сокращении времени процесса ДКУП, меньшем удлинении образцов после прессования, снижении уровня поврежденности образцов после обработки. Для схем «динамическая с пуансоном» и «динамическая двухпоршневая» определены рациональные сочетания параметров начальная скорость титановых образцов – давление, а в последнем случае и противодействие, обеспечивающие прохождение образцов по каналам и их целостность.

На примере образцов из титана показано, что распределение удельной энергии пластических деформаций после одного цикла ДКУП неравномерно по образцу для всех исследованных схем нагружения, кроме схемы с двумя поршнями, что свидетельствует о необходимости дополнительных циклов. Выявлены области концентрации удельного объема микрповреждений, в которых может наступить макроразрушение образца.

Установлено, что динамическая двухпоршневая схема ДКУП с толкающим и противодействующим поршнями является наиболее эффективной из рассмотренных с точки зрения обеспечения сохранности образцов и их формы после нагружения, а также уменьшения циклов ДКУП за счет более равномерного распределения пластических деформаций в образце.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 10-08-00516).

Литература

1. Шорохов Е.В., Жгилев И.Н., Хомская И.В. и др. Высоко-скоростное деформирование металлических материалов методом канально-углового прессования для получения ультрамелкозернистой структуры // Деформация и разрушение материалов, 2009. № 2. С.36–40.
2. Шипачев А.Н., Суглобова И.К., Ильина Е.В., Зелепугин С.А. Выбор параметров нагружения титановых образцов при динамическом канально-угловом прессовании // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика, 2011. № 2(14). С.111–116.

SIMULATION OF PLASTIC DEFORMATION OF TITANIUM SAMPLES FOR DIFFERENT DCAP SCHEMES

S.A. Zelepugin^{1,2}, A.N. Shipachev²,
A.S. Zelepugin^{1,2}, E.V. Ilina²

¹Tomsk Research Center SB RAS, Tomsk, Russia

²Tomsk State University, Tomsk, Russia

E-mail: szel@dsm.tsc.ru; szel@yandex.ru

Deformation of metal samples is numerically investigated during dynamic channel-angular pressing (DCAP) [1, 2] for different schemes of loading: inertial, dynamic, dynamic with a punch, and dynamic with two pistons. The effective values of initial speeds are determined for the samples of titanium, aluminium, and copper under inertial loading. Initial speeds and pressures are determined under dynamic loading. It is shown an advantage of dynamic loading as compared to inertial loading, which consists in reduction of the DCAP process duration, smaller elongation of the samples after pressing, and decrease of a fracture level of the samples after processing. The rational combinations of parameters: initial speed of titanium samples – pressure and opposite pressure, in the latter case, providing the passage of the samples through the channels and completeness of the samples are determined for the schemes «dynamic with a punch» and «dynamic with two pistons».

By using the titanium samples it is shown that distribution of specific energy of plastic deformations after one DCAP cycle is non-uniform in the samples for all investigated schemes of loading, except for the scheme with two pistons, that testifies the necessity of additional cycles. Areas of concentrations of specific volume of

microdamages are revealed where macrodestructions of the samples could occur.

It is established that the dynamic two piston scheme of DCAP with pushing and counteracting pistons is the most effective among considered schemes based on safety of sample forms after loading and also on reduction of DCAP cycles providing more uniform distribution of plastic deformations in the samples.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 10-08-00516).

References

1. Shorokhov E.V., Zhgilev I.N., Khomskaya I.V., etc. High-speed deformation of metals by method of channel-angular pressing for obtaining ultrafine-grained structure // *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2009, № 2, p. 36–40.
2. Shipachev A.N., Suglobova I.K., Pina E.V., Zelepugin S.A. Choice of loading parameters for titanium samples at dynamic channel-angular pressing // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*, 2011, № 2 (14), p. 111–116.

6-19

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛОС АДИАБАТИЧЕСКОГО СДВИГА В МАТЕРИАЛАХ ПРИ ДЕФОРМАЦИЯХ

Н.А. Кудряшов, П.Н. Рябов

Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», Москва, Россия

E-mail: PNRyabov@mephi.ru

Полосы адиабатического сдвига (ПАС) представляют собой узкие области (1–500 мкм), в которых за короткие промежутки времени достигаются экстремальные температуры и деформации. Данное явление наблюдалось в технологических процессах обрабатываемой, атомной, военной и космической промышленности, а так же во многих физических экспериментах. Примеры таких процессов встречаются при пробивании материала, при механической обработке материала, при работе реактора, при запуске и крушении шаттлов и т. д.

В работе рассматриваются процессы формирования полос адиабатического сдвига при деформациях стали марки HY-100, алюминия 7039 Al и обедненного урана DU-0.75Ti. Обсуждается актуальность исследования свойств данных материалов.

Геометрия рассматриваемой задачи представляет собой тонкостенную несжимаемую пластину неограниченную вдоль двух координатных направлений высотой H . Нижняя стенка образца покоится, а верхняя движется с постоянной скоростью. С учетом данной геометрии в работе сформулирована математическая модель, описывающая процессы формирования ПАС [1, 2]. Для решения поставленной задачи предложен конечно-разностный алгоритм, базирующийся на методе характеристик с итерационной процедурой по Ньютону [1, 2]. Проведено тестирование и обоснована эффективность данного алгоритма.

Обсуждаются результаты численного моделирования процессов формирования ПАС с учетом дефектов различного типа. Исследовано влияние граничных ус-

ловий и параметров задачи на процессы формирования ПАС. Рассмотрены процессы самоорганизации ПАС. Продемонстрирован квазипериодический характер данного явления. Предложены два способа оценки количества сформировавшихся полос адиабатического сдвига, базирующихся на температурном и деформационном критерии. Предложена формула оценки расстояния между ПАС. Проведено сравнение полученных оценок с экспериментальными исследованиями и теоретическими оценками Греди-Киппа и Райта-Оскиндона. Продемонстрировано их адекватное совпадение.

Литература

1. Кошкин В.И., Кудряшов Н.А., Рябов П.Н. Численное моделирование образования полос адиабатического сдвига при деформациях // *Ядерная физика и инжиниринг*, 2010. Т. 1. № 5. С. 465–474.
2. Кошкин В.И., Кудряшов Н.А., Рябов П.Н. Моделирование квазипериодических процессов формирования полос адиабатического сдвига при деформациях // *Математическое моделирование*, 2011. Т. 23. № 10. С. 117–132

NUMERICAL SIMULATION OF ADIABATIC SHEAR BAND FORMATION IN MATERIALS AFTER DEFORMATIONS

N.A. Kudryashov, P.N. Ryabov

National Research Nuclear University «MEPhI»,
Moscow, Russia

E-mail: PNRyabov@mephi.ru

Adiabatic shear bands (ASB) is a narrow region (1–500 mkm) where the extremes temperatures and deformations are attained over a short period of time. This phenomenon was observed in the technological processes of manufacturing, nuclear, military and aerospace industries, as well as in different physical experiments. Examples of such processes can occur after ballistic impact, machining, during reactor operation, startup and crash of the shuttle and etc.

The processes of adiabatic shear bands formation in steel HY-100, aluminum 7039 Al and depleted uranium DU-0.75Ti are considered in the present work. We discuss the relevance of studying the properties of these materials.

The geometry of the problem considered is a thin slab of incompressible material that occupies the region between the planes $Y = 0$ and $Y = H$. The plane $Y = 0$ is fixed and $Y = H$ is moving with the constant speed. The mathematical model describing the process of ASB formation is formulated [1, 2]. We proposed the numerical algorithm which can be used to solve the problem studied. This algorithm based on the method of characteristics with Newton iteration procedure [1, 2]. We demonstrate the efficiency and accuracy of this method.

We discuss the results of numerical simulation of ASB formation processes taking into account the different types of defects. The effect of boundary conditions and parameters of the problem on adiabatic shear band formation processes was studied. The self-organization processes of ASB were considered. We show the quasi-periodic nature of this phenomenon. We propose two ways to estimate the number of adiabatic shear bands that were formed using the tem-

perature and deformation criteria. We give the formula that allows us to estimate the distance between ASB. The comparison of the estimates given in our work with theoretical results of Grady-Kipp and Wright-Oskendon was performed. The adequate match of these estimates was demonstrated.

References

1. Koshkin V.I., Kudryashov N.A., Ryabov P.N. Numerical simulation of adiabatic shear bands formation at deformations // Nuclear physics and engineering, 2010. V. 1. № 5. P. 465–474.
2. Koshkin V.I., Kudryashov N.A., Ryabov P.N. Numerical simulation of the quasi-periodic formation processes of adiabatic shear bands at deformations // Mathematical modeling, 2011. V. 23. № 10. – P. 117–132.

6-20

ЧИСЛЕННОЕ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКОЛЬНЫХ И СДВИГОВЫХ РАЗРУШЕНИЙ В ОБОЛОЧКАХ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 12X18H10T, Fe И СТАЛИ 30ХГСА ПРИ ИХ СФЕРИЧЕСКОМ И КВАЗИСФЕРИЧЕСКОМ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

Е.А. Козлов¹, О.В. Ольхов², Е.В. Шувалова²

¹Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

E-mail: e.a.kozlov@vniitf.ru; ololeg@vniief.ru

В развитие совместных исследований ВНИИЭФ и ВНИИТФ [1, 2], в данной работе кратко описаны постановки и представлены первые результаты численных расчетов по трехмерной методике ИТМФ–ВНИИЭФ [3] особенностей динамики разгона стальных оболочек при их квазисферическом взрывном нагружении в системе с наружным радиусом слоя ВВ равным 40 мм.

Проведено сопоставление расчетных данных с экспериментально зарегистрированными при изучении оболочек из нелегированного железа высокой и технической чистоты [4, 5], стали 30ХГСА в состоянии поставки и закаленном до HRC 35...40 единицы состоянии [6, 7], аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T [7, 8]. Сопоставление проведено с результатами лазерно-интерферометрических измерений [7, 9], изучения развития детерминированных возмущений методом ультрамалоракурсной томографии [7], данными последующих материаловедческих исследований претерпевших взрывное нагружение и относительно «мягкое» торможение сохраненных стальных оболочек.

Литература

1. Ольхов О.В. и др., Международная конференция «Х Забабахинские научные чтения», 15–19 марта 2010, Снежинск
2. Аношин М.А., Габзетдинова Л.Я., Козлов Е.А., Куратов С.Е., Ольхов О.В., Соколов С.С., Таржанов В.И., Шувалова Е.В. Численное моделирование процессов разрушения в экспериментах с обжимаемыми шарами. Деформация и разрушение материалов, 2011, № 3, с. 23–27
3. Авдеев П.А., Артамонов М.В., Бахрах С.М. и др. Комплекс программ ЛЭГАК для расчета нестационарных тече-

ний многокомпонентной сплошной среды и принципы реализации комплекса на многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов, 2001. Вып. 3, с. 14–18.

4. Kozlov E.A., Brichikov S.A., Vildanov V.G., Gorbachev D.M., Yusupov D.T., Spall and shear fractures in the spherically converging shells of iron and steels. Measurements of energy and residual strains // Russ. J. Deformation and Fracture of Materials, 2008, № 11, pp. 2–10, Proceedings for the Joint U.S. Russia Conference on Advances in Materials Science, August 31 to September 4, 2009, Prague, Czech Republic, pp. IV 6–11.

5. Козлов Е.А., Бродова И.Г., Бричиков С.А., Горбачев Д.М., Яблонских Т.И., Структура и откольные разрушения оболочек из армо-железа при различных режимах взрывного нагружения // Деформация и разрушение материалов, 2008, № 11, с. 11–18

6. Козлов Е.А., Бродова И.Г., Бричиков С.А., Горбачев Д.М., Яблонских Т.И. Откольные и сдвиговые разрушения, структурные и фазовые превращения в оболочках из стали 30ХГСА при двух режимах взрывного нагружения // Деформация и разрушение материалов, 2010, № 1, с. 17–25.

7. Kozlov E.A., Brichikov S.A., Zhilyaeva N.S., Khardina L.V., Brezgina L.P., Povyshv V.N. Deterministic Perturbations Developing on Steel Shells under Quasispherical Explosive Loading. Investigation Results using Laser Interferometry and Gamma-Tomography. In: Russian-US Conference on Materials Properties in Extremal Conditions, 6LAB Conference Engineering & Materials at Extreme Conditions, 23–28 October, 2011, Barcelona, Spain.

8. Козлов Е.А., Бродова И.Г., Яблонских Т.И. Разрушение в волнах напряжений и залечивание при схождении оболочек из аустенитной стали 12X18H10T // Деформация и разрушение материалов, 2011, № 9, с. 8–14.

9. Козлов Е.А., Бричиков С.А., Боярников Д.С., Кучко Д.П., Дегтярев А.А. Особенности динамики схождения стальных оболочек при их взрывном нагружении по результатам лазерно-интерферометрических измерений. ФММ, 2011, т. 112, № 4, с. 412–428 [Phys. Metals and Metallog. (Engl. trans.), 2011, vol. 112, No. 4, pp. 389–404.

NUMERICAL 3D SIMULATION OF SPALL AND SHEAR DAMAGE IN SHELLS OF AUSTENITIC STEEL 12KH18N10T, FE AND STEEL 30KHGSA AT SPHERICAL AND QUASISPHERICAL EXPLOSIVE LOADING

Е.А. Козлов¹, О.В. Ольхов², Е.В. Шувалова²

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

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

E-mail: e.a.kozlov@vniitf.ru; ololeg@vniief.ru

In the framework of joint research by VNIIEF and VNIITF [1, 2], the present paper provides a brief review of experimental setups and the first results of numerical simulations utilizing the 3D ITMF–VNIIEF method [3] of peculiar features of acceleration dynamics of steel shells under quasispherical explosive loading in the system with the external HE radius of 40 mm.

The numerical results are compared with the experimental data obtained during investigation of shells of unalloyed iron of high and technical purity [4, 5], steel 30KhGSA as received and quenched up to HRC 35...40 units [6,7], austenitic stainless steel 12Kh18N10T [7, 8]. The results are analyzed for laser-interferometry measurements [7, 9],

studies of development of deterministic perturbations by ultrasmall-view tomography [7], and the data of subsequent material science investigation of recovered steel shells after explosive loading and relatively «mild» deceleration.

References

1. Olkhov O.V. et al., In : Int. Conf. X Zababakhin Scientific Talks, March 15-19, 2010, RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Chelyabinsk Region.
2. Anoshin M.A., Gabzdetdinova L.Ya., Kuratov S.E., Olkhov O.V., S.S.Sokolov, E.V.Shuvalova, E.A.Kozlov, V.I.Tarzhanov, Numerical simulation of material damage in spherical shock-wave recovery experiment // Russ. J. Deformation and Fracture of Materials, 2011, v. 3. pp. 23–27.
3. Avdeev P.A., Artamonov M.V., Bakhrakh S.M., et al. Complex of LEGAK codes to calculate unsteady flows of many-component continuum and principles of this complex realization on multi-processor computers with distributed memory // VANT, Series «Mathematical modeling of physical processes», 2001, Issue 3, pp. 14–18.
4. Kozlov E.A., Brichikov S.A., Vildanov V.G., Gorbachev D.M., Yusupov D.T. Spall and shear fractures in the spherically converging shells of iron and steels. Measurements of energy and residual strains, Russ. J. Deformation and Fracture of Materials, 2008, № 11, pp. 2–10. Proceedings for the Joint U.S. Russia Conference on Advances in Materials Science, 2009, Prague, Czech Republic, pp. IV 6–11.
5. E.A. Kozlov, I.G. Brodova, S.A. Brichikov, D.M. Gorbachev, T.I. Yablonskikh. Characteristics of the structure and spall fractures in Armco-Fe shells under different modes of explosive loading, Russ. J. Deformation and Fracture of Materials. 2008. V. 11. P. 11–18.
6. Kozlov E.A., Brodova I.G., Brichikov S.A., Gorbachev D.M., Yablonskikh T.I., Spall and shear fractures, structural and phase transformations in the shells of 30KhGSA steel under two modes of explosive loading, Russ. J. Deformation and Fracture of Materials, 2010, № 1, pp. 17–25.
7. Kozlov E.A., Brichikov S.A., Zhilyaeva N.S., Khardina L.V., Brezgina L.P., Povyshev V.N. Deterministic Perturbations Developing on Steel Shells under Quasispherical Explosive Loading. Investigation Results using Laser Interferometry and Gamma-Tomography, Russian-US Conference on Materials Properties in Extremal Conditions, 6LAB Conference Engineering & Materials at Extreme Conditions, 23–28 October, 2011, Barcelona, Spain
8. Kozlov E.A., Brodova I.G., Yablonskikh T.I. Fracture in stress-waves interaction and recompaction under converging of 12Kh18N10T austenitic steel shells // Russ. J. Deformation and Fracture of Materials, 2011, v. 9, pp. 8–14.
9. Kozlov E.A., Brichikov S.A., Boyarnikov D.S., Kuchko D.P., Degtyarev A.A. Special Features in Convergence Dynamics of Steel Shells under Their Explosive Loading. Results of Laser-Interferometric Measurements // Phys. Met. and Metallog. (Engl. trans.), 2011, v. 112, No 4, pp. 389–404.

6-21

ТРЕХМЕРНАЯ ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

А.Г. Жилкин^{1, 2}, Д.В. Бисикало²

¹Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

²Институт астрономии РАН, Москва, Россия

E-mail: zhilkin@inasan.ru

В докладе представлена трехмерная численная модель для исследования процессов массообмена в тесных двойных системах, в которых звезда-аккректор обладает магнитным полем дипольного типа. В модели учитываются наклон магнитной оси аккректора по отношению к его оси вращения, диффузия магнитного поля, а также радиационный нагрев и охлаждение. Модель основана на предположении о том, что динамика плазмы определяется медленным средним течением, на фоне которого с большими скоростями распространяются МГД волны. Уравнения, описывающие медленное движение вещества, получены в результате процедуры усреднения по быстро распространяющимся пульсациям. С помощью модифицированного трехмерного параллельного численного кода проведено моделирование структуры течения в тесной двойной системе с различными значениями индукции магнитного поля аккректора. Обсуждаются условия формирования аккреционного диска и критерий, разделяющий два типа течений, соответствующих промежуточным полярам и полярам. Кроме того, исследовано влияние на структуру течения собственного вращения звезды-аккректора. В случае медленного вращения реализуется режим «аккректор», при котором структура течения мало отличается от аналогичной структуры, полученной в расчетах при условии синхронного вращения. В случае быстрого вращения реализуется режим «пропеллер», когда вблизи аккректора формируется магнитосферная каверна, а темп аккреции падает практически до нуля. В случае очень быстрого вращения аккреционный диск не формируется, а вещество подхватывается магнитосферой и выбрасывается за пределы полости Роша аккректора. При этом формируется длинный шлейф, закручивающийся вокруг двойной системы в виде спирали. Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проекты 09-02-00064 и 11-02-00076).

THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL MODEL OF FLOW STRUCTURE IN CLOSE BINARIES WITH MAGNETIC FIELD

A.G. Zhilkin^{1, 2}, D.V. Bisikalo²

¹Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia,

²Institute of Astronomy RAS, Moscow, Russia

E-mail: zhilkin@inasan.ru

In the report 3D numerical model for investigation of mass transfer processes in close binary systems in which the accretor star has dipole-type intrinsic magnetic field is presented. The model is taken into account the inclination

of the magnetic axis of the accretor to its rotation one, the diffusion of the magnetic field and radiative heating and cooling processes. The model is based on the assumption that the plasma dynamics are determined by the slow mean flow, which forms a backdrop for the rapid propagation of MHD waves. The equations describing the slow motion of matter were obtained by averaging over rapidly propagating pulsations. Using the modified 3D parallel numerical code the simulation of the flow structure in close binary system with different values of the magnetic induction of the accretor star is carried out. We discuss the condition of the accretion disk formation and the criteria dividing two types of the flows corresponding to intermediate polars and polars. Additionally we investigate the influence of the accretor spin rotation onto the flow structure. In the case of the slow spin rotation the «accretor» regime is realized when the flow structure is little different from to corresponding structure under condition of the synchronous spin rotation. In the case of the fast spin rotation the «propeller» regime is realized when a magnetospheric cavern is formed near the accretor surface and the accretion rate decreases almost to zero. In the case of very fast spin rotation the accretion disk is not formed. The matter is thrown by the magnetosphere outside the accretor Roche lobe. As a result the long trail is formed and twisted around the binary system in the form of a spiral. This work is supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects 09-02-00064 and 11-02-00076).

6-22

РАСЧЕТ ТРЕХМЕРНЫХ ЗАДАЧ СПЕКТРАЛЬНОГО ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ ПО МЕТОДИКЕ МИМОЗА-НДЗД

А.В. Бабанов, С.А. Бельков, С.В. Бондаренко,
В.В. Ватулин, О.А. Винокуров, И.Н. Гречишкина,
В.В. Змушко, Т.Б. Измайлова, Е.И. Митрофанов,
Н.А. Рябикина, Б.Н. Шамраев

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

Трехмерная методика МИМОЗА-НДЗД предназначена для моделирования в трехмерной геометрии экспериментов на лазерных установках ИСКРА-5 [1], ЛУЧ и будущей установки УФЛ 2М. Создание такой методики стало возможным с появлением в математическом отделении ВНИИЭФ высокопроизводительного вычислительного комплекса МВК. Методика МИМОЗА-НДЗД является обобщением на трехмерный случай двумерной методики МИМОЗА-НД [2] и позволяет рассчитывать такие же физические процессы: поглощение и рассеяние лазерного излучения в короне, электронная и ионная теплопроводность, спектральный перенос рентгеновского излучения, термоядерные реакции, перенос энергии α -частицами возникающими в термоядерных реакциях.

В трехмерных расчетах методики МИМОЗА-НДЗД разностная сетка состоит из шестигранных ячеек, она является регулярной вдоль всех трех направлений. При интегрировании трехмерных уравнений газовой дина-

мики в методике МИМОЗА-НДЗД, используется лагранжево-эйлеровый метод, который является наиболее эффективным в настоящее время при решении задач механики сплошной среды с большими деформациями. В методике МИМОЗА-НДЗД используются обобщенные на трехмерный случай двумерные программы построения расчетной сетки и пересчета величин [3]. При пересчете конвективных потоков используется алгоритм, основанный на расщеплении по направлениям и использовании одномерного алгоритма повышенной точности. Повышение точности достигается введением внутри каждой ячейки распределения пересчитываемых величин, отличного от постоянного значения [4]. Методика МИМОЗА-НДЗД предназначена для проведения трехмерных расчетов в параллельном режиме. При параллельных вычислениях используется трехмерная геометрическая декомпозиция разбиения по процессорам.

Основные уравнения: система уравнений трехтемпературной газовой динамики; оператор сглаживания четвертого порядка; уравнение спектрального переноса излучения в диффузионном приближении; уравнение электронной и ионной теплопроводности; система уравнений, описывающая электронно-ионную релаксацию. Кроме этого рассчитываются три основные термоядерные реакции. При расчете спектральных коэффициентов поглощения и излучения плазмы, коэффициентов теплопроводности и электронно-ионной релаксации, а также уравнения состояния электронов решаются уравнения кинетики ионизации и возбуждения ионов плазмы в приближении среднего иона [5].

Проведен ряд расчетов задачи о генерации нейтронов, при сжатии сферической стеклянной капсулы, наполненной ДТ-газом. Первый расчет в одномерной сферически симметричной постановке. Результаты численного моделирования по методике МИМОЗА-НДЗД сравниваются с результатами проведенными по методикам МИМОЗА-НД и СНДП [6]. Наблюдается удовлетворительное согласие результатов по разным методикам: максимальное объемное сжатие в расчете по методикам МИМОЗА-НДЗД и МИМОЗА-НД достигает $\approx 1,4 \cdot 10^3$, а по программе СНДП – $\approx 1,3 \cdot 10^3$; нейтронный выход в расчете по методике МИМОЗА-НДЗД составил $\approx 9,4 \cdot 10^7$, по методике МИМОЗА-НД – $\approx 1,0 \cdot 10^8$, а по программе СНДП – $\approx 8,5 \cdot 10^7$; отличие нейтронного выхода не превышает 11%. Второй расчет проводился в существенно трехмерной постановке. Хотя среднеквадратичная неоднородность рентгеновского излучения на момент максимума средней плотности излучения составляет всего 1,8%, полный выход нейтронов уменьшился почти в 2 раза и составил $\approx 5,1 \cdot 10^7$.

Литература

1. Bel'kov S.A., Mkhitarian L.S., Vinokurov O.A. et al. Study of the shell's large-scale asymmetry influence on the dynamics using the ISKRA-5 facility // Laser and Particle Beams, 1999. Vol. 17. n. 3. P. 385.
2. Софронов И.Д., Бельков С.А., Винокуров О.А., Мхитарян Л.С., Рябикина Н.А. Методика расчета спектрального переноса излучения в двумерном комплексе МИМОЗА-НД // ВАНТ, серия: Математическое моделирование физических процессов, 2000. Вып. 1. С. 8.
3. Софронов И.Д., Афанасьева Е.А., Винокуров О.А., Воропинов А.И., Змушко В.В., Плетенёв Ф.А., Рыбаченко П.В., Сараев В.А., Соколова Н.В., Шамраев Б.Н. Комплекс

программ МИМОЗА для решения многомерных задач механики сплошной среды на ЭВМ Эльбрус-2 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов, 1990. Вып. 2. С. 3.

4. Zmushko V.V. Computation of convective flows and their realization in MIMOZA code // International Workshop New models numerical codes for shock wave processes in condensed media. Oxford. September 15–19, 1997.

5. Бельков С.А., Гаспарян П.Д., Кочубей Ю.К., Митрофанов Е.И. Модель среднего иона для расчета состояния многозарядной, многокомпонентной, нестационарной и неравновесной плазмы // ЖЭТФ, 1997. Вып. 111. С. 496.

6. Бельков С.А., Долголева Г.В. Модель среднего иона для расчета кинетики ионизации, населенностей возбужденных уровней и спектральных коэффициентов переноса излучения в программе СНДП // ВАНТ, серия: Математическое моделирование физических процессов, 1992. Вып. 1. С. 59.

3D SIMULATION OF SPECTRAL RADIATION TRANSFER USING MIMOZA-ND3D CODE

A.V. Babanov, S.A. Bel'kov, S.V. Bondarenko,
V.V. Vatulin, O.A. Vinokurov, I.N. Grechishkina,
V.V. Zmushko, T.B. Izmailova, E.I. Mitrofanov,
N.A. Raybikina, B.N. Shamraev

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

3D MIMOZA-ND3D code is meant for 3D geometry simulation of laser facility ISKRA-5 [1], LUCH and future facility UFL 2M. This technique is possible due to high-performance computing system MVK in mathematical department of VNIIEF. MIMOZA-ND3D is a generalization for 3D case of 2D code MIMOZA-ND [2] and allows simulation of the same physical processes: laser radiation absorption and scattering in corona, electronic and ionic heat conduction, spectral X-ray radiation transfer, thermonuclear reactions, α -particle energy transfer in thermonuclear reactions.

Computational grid has hexahedral cells in 3D simulation of MIMOZA-ND3D, and is regular in three directions. Lagrangian-Eulerian method, which is more efficient at present for large deformation continuum mechanics problems, is used for MIMOZA-ND3D gas dynamics integration. 2D programs for computational grid and re-computation [3] generalized to 3D case are used in MIMOZA-ND3D. The algorithm based on direction splitting and use of 1D algorithm of high accuracy, is used for convective flow simulation. The accuracy increase is achieved by introduction of re-calculated non-constant values distribution into each cell [4]. MIMOZA-ND3D code is meant for 3D parallel simulation. 3D geometric processor decomposition is used for parallel simulation.

The main equations are: three-temperature gas dynamics equation system; fourth-order smoothing operator; radiation spectral transfer equation in diffusion approximation; electronic and ionic heat conduction; equation system describing electron-ion relaxation. Moreover, the main three thermonuclear reactions are found. Kinetic equations of plasma ion excitation and ionization are solved in mean ion approximation [5] when calculating spectral plasma radiation and absorption coefficients, heat conduction and electron-ion relaxation coefficients, and electron equations of state.

A number of simulations were carried out for neutron generation when compressing a spherical glass capsule

filled with DT-gas. The first simulation is in 1D spherically symmetric formulation. MIMOZA-ND3D simulation results are compared with MIMOZA-ND and SNDP results [6]. Results of different codes show good agreement: maximum agreement in MIMOZA-ND3D and MIMOZA-ND simulation is $\approx 1.4 \cdot 10^3$, and $\approx 1.3 \cdot 10^3$ in SNDP; neutron yield in MIMOZA-ND3D code is $\approx 9.4 \cdot 10^7$, $\approx 1.0 \cdot 10^8$ in MIMOZA-ND, and $\approx 8.5 \cdot 10^7$ in SNDP; neutron yield difference does not exceed 11%. The second simulation was carried out in essentially 3D set up. Though the root-mean-square inhomogeneity of X-ray radiation is only 1.8% at average peak density of radiation, the full neutron yield is almost twice decreased and is $\approx 5.1 \cdot 10^7$.

References

1. Bel'kov S.A., Mkhitarian L.S., Vinokurov O.A. et al. Study of the shell's large-scale asymmetry influence on the dynamics using the ISKRA-5 facility // Laser and Particle Beams, 1999. Vol. 17. n. 3. P. 385.
2. Sofronov I.D., Bel'kov S.A., Vinokurov O.A., Mkhitarian L.S., Ryabikina N.A. Computational technique of spectral radiation transfer in 2D MIMOZA-ND code // VANT. Ser.: Mathematical Simulation of Physical Processes, 2000. Issue 1. P. 8.
3. Sofronov I.D., Afanasieva E.A., Vinokurov O.A., Voropinev A.I., Zmushko V.V., Pletenyov F.A., Rybachenko P.V., Sarayev V.A., Sokolova N.V., Shamraev B.N. MIMOZA code for multidimensional problems of continuum mechanics using Elbrus-2 computer // VANT. Ser. Mathematical simulation of physical processes, 1990. Issue 2. P. 3.
4. Zmushko V.V. Computation of convective flows and their realization in MIMOZA code // International Workshop New models numerical codes for shock wave processes in condensed media. Oxford. September 15–19, 1997.
5. Bel'kov S.A., Gasparyan P.D., Kochubey Yu.K., Mitrofanov E.I. Mean ion model for simulation of multi-charged unstable non-equilibrium plasma // ZhETF, 1997. Issue 111. P. 496.
6. Bel'kov S.A., Dolgoleva G.B. Mean-ion model for kinetics simulation of ionization, excitation level population and radiation spectral absorption coefficients in SNDP code // VANT, Ser.: Mathematical simulation of physical processes, 1992. Issue 1. P. 59.

6-23

ДВУХКАСКАДНАЯ КОНСТРУКЦИЯ ТЕРМОЯДЕРНОЙ МИКРОМИШЕНИ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО ТЯЖЕЛОИОННОГО СИНТЕЗА

Г.В. Долголева

ИПМ им. М.В. Келдыша, Москва, Россия

E-mail: dolgg@kiam.ru

В работе [1] аналитически и численно рассматривалось конструирование микромишеней для осуществления термоядерного синтеза, базируясь на концепцию безударного сжатия. Что дает безударное сжатие? Большие сжатия, большие плотности, их можно получить даже бесконечными, если иметь достаточную для сжатия энергию.

Основой таких мишеней могут служить цилиндрические, слоистые системы: однокаскадные (энергия вкладывается в один внутренний слой) и двухкаскадные (энергия вкладывается в два внутренних слоя) [1].

Использование двухкаскадной мишени способствует повышению «отбора» энергии сжимаемым DT-слоем, а это обстоятельство позволяет снизить величину вкладываемой энергии, необходимой для зажигания мишени.

При выводе закона энерговложения для безударного сжатия в двухкаскадной мишени возникли трудности, связанные с неоднозначностью решения системы: число искомых величин превышает число уравнений. В работе [2] рассматривались пути преодоления этих трудностей. Подтверждением правильности того или иного подхода в ликвидации неоднозначности является загорание мишени и величина выделившейся термоядерной энергии, а также величина вкладываемой энергии.

В настоящем исследовании рассматриваются двухкаскадные слоистые системы. Аналитически находится закон энерговложения во внутренний каскад с целью осуществления безударного сжатия рабочей DT-области, а во внешнем каскаде энерговложение выполняется по закону и известно.

Полученные аналитические построения закона энерговложения во внутренний каскад для безударного сжатия рабочей DT-области проверяются численными расчетами работы мишеней в полной математической постановке [3].

Литература

1. Долголева Г.В., Забродин А.В. Кумуляция энергии в слоистых системах и реализация безударного сжатия, М., ФИЗМАТЛИТ, 2004.
2. Долголева Г.В. Аналитическое и численное конструирование двухкаскадной цилиндрической мишени на основе безударного сжатия // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2011, № 4, ч. 3, с. 754–755.

ANALYTICAL AND NUMERICAL CONSTRUCTION OF TWO-STAGE CYLINDRICAL TARGETS BASED ON SHOCK-FREE AND SHOCK COMPRESSION

G.V. Dolgoleva

Keldysh Institute Applied Mathematics, Moscow, Russia

E-mail: dolgg@kiam.ru

In [1], both analytically and numerically examined micro targets design for fusion, based on the concept of shock-free compression. What makes a shock-free compression? Large compression, high density, they can get even infinite, if you have enough energy to compress.

The basis of these targets may be cylindrical, lamellar system: single-stage (the energy embedded in one inner layer) and two-stage (the energy embedded in the two inner layers) [1].

Using a two-stage target contributes to «selection» of energy DT-compressible layer, and this fact will reduce their amount deposited energy required to ignite the target.

In deriving the law of energy input for a two-stage shock-free compression of the target difficulties associated with the ambiguity of the solution of the system: the number of unknown quantities exceeds the number of equations. In [2] looked at ways to overcome these difficulties. Confirmation of the validity of an approach to eliminate ambiguity is illuminated and the amount emitted in thermonuclear energy, as well as the value of the input energy.

The present study examines-cascade layered system. Analytically is law input in the inner cascade to implement shock-free compression working DT-area and outside cascade the energy embedded under the energy embedded and know.

Received analytical constructing of law the energy embedded in inner cascade for shock compression working DT-field checked by numerical calculations work targets the full mathematical formulation.

References

1. Dolgoleva G.V., Zabrodin A.V. Cumulation energy in layered systems and realization of shock compression, M., FIZMATLIT, 2004.
2. Dolgoleva G.V. Analytical and numerical construction of a two-stage cylindrical targets based on shock-free compression. Bulletin of the Nizhniy Novgorod University. N.I. Lobachevsky, 2011, no. 4, part 3, p. 754–755.

6-24

РАСЧЕТ ВОЛНОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ МИШЕНЕЙ ПРИ ОДНОМЕРНОМ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ ДО 150 ГПа

В.В. Ким, А.А. Голышев, Д.В. Шахрай, А.М. Молодец

Институт проблем химической физики РАН,
Черноголовка, Россия

E-mail: molodets@icp.ac.ru

Как известно, значительная часть экспериментальных исследований в субмегабарной области давлений проводится в статических условиях в алмазных наковальнях. Для этих исследований характерен широкий спектр физических методов (спектроскопических, дифракционных, электрофизических и др.). Однако в настоящее время данная методика находится на пределе своих возможностей по давлению, которое ограничено прочностью алмаза и, по-видимому, предел здесь находится в районе 200–300 ГПа. Кроме этого методика алмазных наковален наиболее приемлема для изотермических условий, когда температуры не слишком высоки. Трудности быстро увеличиваются по мере увеличения температуры выше ~1000 К. В этой ситуации возрастает роль альтернативных перспективных методик создания субмегабарных давлений. Одной из таких методик является методика ступенчатого ударного сжатия. В этой методике образец, образно говоря, сам себя сдавливает и разогревает. Поэтому данная методика теоретически не имеет ограничения по давлению. Однако вместе с этим преимуществом методика содержит и проблемные задачи, например, определение температур ударносжимаемого образца и сложность диагностики истории нагружения, обусловленной использованием слоистых мишеней, приводящих к взаимодействию многочисленных волн сжатия и разгрузки в измерительной ячейке. Одним из возможных вариантов решения этих задач является разработка устойчивых газодинамических кодов, опирающихся на достоверные полуэмпирические уравнения состояния.

В данном докладе обсуждается газодинамический код, разработанный на основе [1] и опирающийся на полуэмпирические уравнения состояния [2]. Приведены примеры расчётов слоистых мишеней, состоящих из набора разнообразных пластин (LiH, TiH₂, W, тефлон, расплав натрия, нержавеющая сталь и др.) в диапазоне давлений до 150 ГПа.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН «Вещество при высоких плотностях энергии»

Литература

1. Ким В.В. Численное моделирование газодинамических процессов при высоких плотностях энергии модифицированным методом индивидуальных частиц: Диссертация к. физ.-мат. наук) Черногловка, 131, с. 2005.
2. Golyshev A.A., et al. High-temperature resistivity of shocked liquid sodium at pressures up to 230 GPa // Phys. Rev. B. 2011. V. 83. P. 094114.

CALCULATION OF WAVE INTERACTIONS AND THERMO-DYNAMIC STATE OF MULTILAYER TARGETS AT ONE-DIMENSIONAL SHOCK LOADING UP TO 150 GPa

V.V. Kim, A.A. Golyshev, D.V. Shakh-ray, A.M. Molodets

Institute of Problems of Chemical Physics,
Chernogolovka, Russia

E-mail: molodets@icp.ac.ru

As is known, the considerable part of experimental researches in pressure submegabar regions is carried out in the static conditions in diamond anvils cells. Broad spectrum of physical methods (spectroscopic, X-ray, electrophysical, etc.) is characteristic feature for these researches. However now the technique is on a limit of the pressure resource which is limited by strength of diamond. It seems the limit is in area 200–300 GPa. Besides the technique of diamond anvils is most comprehensible to isothermal conditions at temperatures are not too high. Difficulties quickly increase, when temperatures increases above ~1000 K. The role of alternative perspective techniques of creation submegabar pressure increases in this situation. One of such techniques is the technique of step shock compression. In this technique the sample figuratively speaking itself squeezes and warms up. Therefore this technique has no restriction on pressure theoretically. However together with this advantage the technique contains problems also. For example, it is determination of shock temperatures or also complexity of loading history diagnostics, caused by use of multilayered targets which lead to interaction of numerous compression and unloading waves in the measuring cell. Steady gasdynamic code design based on the reliable semiempirical equations of state is one of possible variants for the decision of these problems.

In the present report the gasdynamic code is discussed, which is developed on the basis of [1] and based on the semiempirical equations of state [2]. The examples of calculations for multilayered targets consisting of various plates sets (LiH, TiH₂, W, Teflon, liquid sodium, stainless steel and so on) are presented in a range of pressure up to 150 GPa.

Work was partially supported by the program of Presidium of the Russian Academy of Sciences «Matter at high density of energy».

References

1. Kim V.V. Numerical modeling of gasdynamic processes at high density of energy by the modified individual finite size particle in cell method. (Ph.D. Dissertation) Chernogolovka, 2005. P. 131.
2. Golyshev A.A., et al. High-temperature resistivity of shocked liquid sodium at pressures up to 230 GPa // Phys. Rev. B. 2011. V. 83. P. 094114.

6-25

УЧЕТ ЭНЕРГОБАЛАНСА ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

О.Н. Ульянов, Л.И. Рубина, М.А. Чашин

Институт математики и механики УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

E-mail: secretary@imm.uran.ru; rli@imm.uran.ru;
cma@imm.uran.ru

Представлена методика численного моделирования взаимодействия излучения с плоским слоем вещества, разрабатываемая для ряда физических и математических постановок задачи радиационного переноса в смесях веществ. Методика предполагает расчет вклада каждой учитываемой спектральной линии; вычисление населенностей уровней в соответствии с уравнениями кинетики населенностей; нахождение интенсивности излучения в соответствии с уравнением переноса с коэффициентами, вычисляемыми по населенностям уровней и электронной температуре. Методика основана на реализации двух методов (МАПИ и МПЛЧ) численного решения задачи переноса излучения. Метод МАПИ базируется на явном представлении интенсивности излучения, метод МПЛЧ – на использовании интерполяционных полиномов Лагранжа по узлам Чебышева. Ранее был создан комплекс программ для моделирования переноса излучения в смесях веществ с доплеровскими или фойгтовскими профилями излучения при заданной электронной температуре.

В докладе представлены результаты развития методики, полученные за период, прошедший со времени ЗНЧ-10. Основными из них являются:

- в физической, математической и вычислительной моделях рассматриваемых процессов учтен энергодобавок;
- разработаны метод и алгоритм решения уравнения энергодобавок;
- разработаны два алгоритма решения задач переноса излучения, в которых электронная температура удовлетворяет уравнению энергодобавок;
- создан комплекс программ для решения задачи радиационного переноса в плоском слое смеси веществ с учетом нескольких сотен спектральных линий;
- достигнуто приемлемое время расчетов достаточно сложных и физически содержательных задач.

Проведены серии расчетов на суперкомпьютерах URAN (ИММ УрО РАН, г. Екатеринбург) и МВС-100К (МЦ РАН, г. Москва). Проведено сравнение результатов расчетов, полученных по методикам МАПИ и МПЛЧ.

Представлены результаты численных экспериментов. Изучено влияние учета энергодобавки на результаты численного моделирования в однородных и неоднородных слоях. Изучено поведение интенсивности излучения и населенностей уровней при различных значениях заданной электронной температуры, а также с учетом энергодобавки. Исследована зависимость электронной температуры и населенностей уровней от параметров уравнения энергодобавки.

Работа выполнена при поддержке УрО РАН в рамках проекта 12-П-1-1023 Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Информационные, управляющие и интеллектуальные технологии и системы» и проекта 12-С-1-1001 Программы межрегиональных и межведомственных фундаментальных исследований УрО РАН.

**TAKING INTO ACCOUNT ENERGY BALANCE
EQUATION FOR NUMERICAL MODELING OF
INTERACTION OF RADIATION
WITH A SUBSTANCE**

O.N. Ulyanov, L.I. Rubina, M.A. Chaschin

Institute of Mathematics and Mechanics
of the Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia
E-mail: secretary@imm.uran.ru; rli@imm.uran.ru;
cma@imm.uran.ru

We present the technique of modeling the interaction of radiation with a flat layer of substance, which aimed to solve radiation transfer problems into mixture of substances for a number of physical and mathematical descriptions of problem. We calculate radiation intensity and contribution of every spectral line in radiation intensity from equation of radiative transfer, and we calculate level populations in account with kinetics equations. The technique is based on implementing two methods (MAPI and MPLCH) of the numerical solution of the radiation transfer problem. The MAPI method is based on an explicit representation of radiation intensity, and the MPLCH method is based on the use of Lagrange interpolation polynomials on Chebyshev nodes.

We present the results of developing the technique; which were obtained during the period following the ZST-10. The main results are the following.

- In physical, mathematical and calculation models of processes investigated we take into account energy balance;
- Method and algorithm for solving energy balance equation were developed;
- Two different algorithms of solving radiation transfer problems, in which electron temperatures was satisfied of energy-balance equation, were created;
- A software system was created for solving the problem of radiation transfer in a flat layer of a mixture of substances with several hundreds spectral lines taken into account;
- An acceptable calculation time was achieved in rather complex and physically interesting problems.

A series of computations using supercomputers was carried out. Calculation results obtained by different techniques (MAPI; MPLCH) were compared.

The results of numerical experiments are presented. Numerical experiments to study the influence of energy-balance on results of numerical modeling in a homogeneous and homogeneous layer were carried out. Behavior of intensity and level populations under various values of prescribed electron temperatures and under solving energy-balance equation was investigated. The influence of various parameters in energy-balance equation on electron temperature and level populations was studied.

6-26

**ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ
ОБЪЕКТА В ЗАДАЧАХ ПЕРЕНОСА
ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ**

С.А. Ульянов

Центральный научно-исследовательский институт химии
и механики, Москва, Россия

При трехмерном решении уравнений переноса ионизирующих излучений методом Монте-Карло расчетная геометрия объекта, как правило, задается в виде уравнений поверхностей второго порядка сложности. Стандартные подходы к визуализации такой геометрии сводятся к представлению объекта набором полигонов, получаемых в результате применения различных алгоритмов тесселяции: marching cubes, metaballs и пр. Известным недостатком данных алгоритмов является низкое значение показателя эффективности: соотношения вычислительной сложности и качества результата. В работе предложен метод построения 3d-модели объекта, в которой визуализация поверхностей второго порядка проводится с использованием оригинального алгоритма. Суть алгоритма заключается в следующем. На первом этапе с помощью аппарата математического программирования определяются эффективные границы составных частей объекта, что существенно снижает пространственную область анализа и, как следствие, повышает вычислительную производительность. На втором этапе с целью обеспечения высокого качества представления объекта для каждой поверхности второго порядка определяется ее уравнение в канонической системе координат. Затем в рамках границ, полученных на первом этапе, проводится аппроксимация данной формы регулярным набором треугольников. Завершением второго этапа является преобразование вершин полученных треугольников к исходной системе координат. Приводятся результаты применения предложенного способа для визуализации конкретной расчетной геометрии.

APPLICATION OF ANALYTICAL METHODS FOR THE DESIGN OF THREE-DIMENSIONAL OBJECT MODEL IN PROBLEMS OF OPTICAL RADIATION TRANSFER

S.A. Ulyanov

Central Research Institute of Chemistry and Mechanics,
Moscow, Russia

In three-dimensional solvers of optical radiation transfer using Monte Carlo the calculation geometry of objects is usually introduced by equations of quadric surfaces. Common approaches in visualization of such geometry can be reduced to an object representation by a set of polygons, applying of different tessellation algorithms: marching cubes, metaballs, etc. A well-known disadvantage of these algorithms is their low efficiency: the ratio of computational complexity and quality of the result. In this work we propose a design method of a 3d-object model, in which visualization of second-order surfaces is carried out by the original algorithm. The idea of the algorithm is as follows. In the first stage the effective border parts of an object are defined with the help of mathematical programming technique, which significantly reduces the spatial area of analysis and, consequently, increases the computational performance. In the second stage the equation in the canonical coordinate system is determined for each surface in order to ensure the quality of object representation. Then, within the borders obtained in the first stage, this form is approximated by the regular set of triangles. At the end of the second stage vertices of the triangles are transformed to the original coordinate system. An example of specific geometry visualization using the proposed method is given.

6-27

РАСЧЕТНЫЙ КОМПЛЕКС «TIS_1D». ОПИСАНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ НА ОДНОМЕРНЫХ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ

А.В. Мищенко, А.А. Серёжкин,
И.С. Меньшов, А.Б. Киселев
ВНИИА им. Н.Л. Духова, Москва, Россия
E-mail: 7sanches@rambler.ru

Для численного решения задач упругопластического деформирования твердых тел был разработан двумерный расчетный комплекс «TIS». В его основу были заложены метод Годунова [1] и метод разделения по физическим процессам [2]. Для описания процессов деформирования используются различные упругопластические модели [3, 4] и уравнения состояния [5]. Вместе с тем, существует ряд упругопластических задач, допускающих одномерную постановку. В частности, для некоторых из них возможно построить аналитическое решение. Для тестирования комплекса «TIS» на таких задачах была создана его одномерная версия «TIS_1D». Она обладает некоторыми преимуществами в сравнении с двумерной, такими как быстродействие, многообластная структура и простота в реализации подвижных сеток и внедрении моделей разрушения. Доклад посвящен

краткому описанию комплекса и его верификации.

Литература

1. Численное решение многомерных задач газовой динамики. / Под ред. С. К. Годунова. М.: Наука, 1976. 400 с.
2. Роч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980.
3. Киселев А.Б., Юмашев М.В. Деформирование и разрушение при ударном нагружении. Модель повреждаемой термоупругопластической среды // ПМТФ. 1990. № 5, с. 116–123.
4. Киселев А.Б., Математическое моделирование динамического деформирования и комбинированного микроразрушения термоупруговязкопластической среды // Вестн. Моск. ун-та Матем. Механ. 1998. № 6, с. 32–40.
5. Куликовский А.Г., Погорелов Н.В., Семенов А.Ю. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений. М.: Физматлит, 2001.

COMPUTING COMPLEX «TIS-1D». DESCRIPTION AND TESTING ON ONE-DIMENSIONAL ELASTOPLASTIC PROBLEMS

A.V. Mischenko, A.A. Sereyozhkin,
I.S. Menshov, A.B. Kiselev

All-Russia Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

Computing complex «TIS» was made to simulate processes of elastoplastic deformation solids in two-dimensional statement. The main foundations of «TIS» are Godunov finite volume method, method of separating physical processes and moving Euler mesh. At the same time there are a lot of problems which can be set in one-dimensional statement. And certain of them can be solved analytically. One-dimensional complex «TIS-1D» was made for testing on these problems. It has some advantages, such as speed of operation, multi-domain structure and simplicity in realization of moving grid and introduction of damage models.

6-28

АНАЛИТИЧЕСКИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ТИПА НЕСТАЦИОНАРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

А.Л. Казаков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики систем и теории управления Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

Математическое исследование задач фильтрации (диффузии) является актуальным в связи с наличием многочисленных приложений. Для описания процесса фильтрации обычно используют уравнение диффузии параболического типа. В линейном случае это уравнение давно известно и хорошо изучено, однако, если коэффициент фильтрации зависит от плотности, свойства уравнения существенно меняются и требуют дополнительного исследования. Уравнение нелинейной фильтрации (диффузии) в случае степенной зависимости коэффициента фильтрации от плотности является объектом рассмотрения в данной работе. Для него исследуется задача о распространении возмущения по

нулевому фону. При этом, поскольку искомая функция обращается в нуль, коэффициент перед старшими производными также зануляется, и параболический тип уравнения вырождается. Это с одной стороны, придает исследованию дополнительную сложность, с другой – позволяет использовать метод характеристических рядов для построения решений задачи. Доказаны новые теоремы существования и единственности решений рассмотренной задачи в классе аналитических функций, при этом коэффициенты рядов вычисляются рекуррентно, что позволяет применять построенные ряды для проведения расчетов и расчетов тестирования численных методик. Выполнено численное моделирование с использованием отрезков рядов и предложенной авторами разностной схемы.

Проведенное исследование развивает научные результаты академика А.Ф. Сидорова и его учеников, полученные начиная с 80-х годов прошлого столетия.

6-29

МЕТОД ТРЕХУРОВНЕВОГО РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ МЕТОДИКИ ТИМ-2D

А.А. Воропинов

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

Методика ТИМ-2D предназначена для решения задач механики сплошной среды на неструктурированных многоугольных лагранжевых сетках произвольной структуры. Для методики используется метод трехуровневого распараллеливания. На первом уровне осуществляется распараллеливание счета по математическим областям. На втором уровне производится распараллеливание счета внутри математической области по пара-областям. На первых двух уровнях используется модель распределенной памяти и интерфейс MPI. На третьем уровне осуществляется распараллеливание итераций счетных циклов в модели общей памяти с использованием интерфейса OpenMP. Уровни могут использоваться как по отдельности, так и в различных сочетаниях при решении одной задачи.

METHOD OF THREE-LEVEL PARALLELIZATION IN THE TIM-2D CODE

А.А. Voropinov

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

The TIM-2D code is intended for solving continuum mechanics problems on unstructured polygonal Lagrangian grids with arbitrary structures. The method of three-level parallelization is used in the code. At the first level the calculation is parallelized over mathematical domain. At the second level the calculation is parallelized within mathematical domain over para-domains. At the first two parallelization levels the model of distributed memory and the IMP interface are used. At the third level the calculation iterations in the model of common memory are parallelized using the OpenMP interface. The parallelization levels can

be employed both individually and at different combinations for solving one problem.

6-30

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДГОТОВКИ И РАСЧЕТА ДАННЫХ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВУМЕРНЫХ ЗАДАЧ. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «БАЗИС»

О.В. Беломестных, С.В. Гагарин, А.В. Галинова,
Н.В. Галицкая, Л.М. Зуева, С.И. Кузьмина,
О.А. Лисина, Д.В. Могиленских, А.А. Сыскова,
А.А. Ушкова, Е.Ю. Язова

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: s.v.gagarin@vniitf.ru

На протяжении многих лет в РФЯЦ–ВНИИТФ развивается технология численного моделирования сложных физических процессов по различным комплексам прикладных программ. Зачастую возникает необходимость вмешательства в расчет задачи с целью перестройки геометрии, расчетной сетки и выполнения интерполяции физических величин или же для передачи данных из одного комплекса программ в другой. Такие процессы являются трудоемкими и сложными. По этой причине и в связи с развитием методик численного моделирования постоянно остается актуальной задача повышения эффективности технологий всех этапов процесса подготовки и расчета данных с помощью разработки новых архитектур программных комплексов, новых интерактивных методов и графической поддержки. Несколько лет назад была поставлена задача – создать новый унифицированный программный комплекс (ПК), обеспечивающий повышение эффективности и информативности всех этапов подготовки данных для расчетов. Результатом этой работы стало создание ПК «БАЗИС». ПК разработан на платформе .NET Framework, языками программирования являются C# и C++.

Основные принципы функционирования ПК «БАЗИС»:

- согласованная интеграция всех этапов подготовки данных для расчета;
- унифицированное и информативное представление данных;
- клиент-серверная архитектура комплекса;
- подключение внешних модулей других разработчиков;
- применение предыдущего опыта и наработок.

В докладе представлен комплексный подход к решению задачи повышения эффективности подготовки данных на основе реализованной архитектуры и состава ПК. В состав ПК входят подсистемы: визуализации, построение геометрии и сеток, сборка задач, переинтерполяция физических величин, а также различные виды представления данных.

**COMPREHENSIVE APPROACH AND METHODS
OF EFFICIENCY ENHANCEMENT OF DATA
PREPARATION AND CALCULATION FOR
NUMERICAL SIMULATION OF 2D PROBLEMS.
PROGRAM COMPLEX «BASIS»**

O.V. Belomestnykh, S.V. Gagarin, A.V. Galinova,
N.V. Galitskaya, L.M. Zueva, S.I. Kuzmina,
O.A. Lisina, D.V. Mogilenskikh, A.A. Syskova,
A.A. Ushkova, E.Yu. Yazova

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

E-mail: s.v.gagarin@vniitf.ru

For years in RFNC–VNIITF developed are numerical simulation techniques for complex physical processes with various sets of applied programs. Often the necessity arises to force into calculations of a task with the aim to rearrange geometry or a computational grid and to fulfill interpolation of physical values, or to transfer data from one program complex to another. Such processes are labor-intensive and complex. For this reason and in the context of development of numerical simulation techniques, the problem about enhancement of techniques efficiency at all the stages of data preparation and calculation with development of new architectures of program complexes, new interactive techniques and graphic support persists in being urgent. Several years ago the problem was posed – to create a new unified program complex (PC) providing enhancement of efficiency and comprehension of all the stages of data preparation for calculations. This work resulted in creation of PC «BASIS». PC is developed on platform. NET Framework with C# и C++ as programming languages.

The main operation principles of PC «BASIS» are as follows:

- consistent integration of all the stages of data preparation for calculations;
- unified and comprehensive data representation;
- client-server architecture of the complex;
- connection of exterior plug-ins of other developers;
- application of previous experience and groundwork;

The paper presents a comprehensive approach to working out the problem on enhancement of data preparation efficiency based on the implemented architecture and PC set. PC includes the subsystems: visualizations, construction of geometry and grids, problems assembly, reinterpolation of physical values, and different types of data representation.

6-31

**ПОСТРОЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ
И ОБЪЕМНЫХ СЕТОК ВАРИАЦИОННЫМ
МЕТОДОМ С АДАПТАЦИЕЙ К КРИВИЗНЕ
ПОВЕРХНОСТИ**

В.А. Гаранжа¹, Л.Н. Кудрявцева¹, С.В. Утюжников²

¹ВЦ РАН, МФТИ, Москва, Россия

²Manchester University, Manchester, UK

E-mail: garan@ccas.ru; S.Utyuzhnikov@manchester.ac.uk

Предлагается вариационный метод построения объемных и поверхностных сеток с адаптацией к кривизне поверхности. Гексаэдральные расчетные сетки строятся посредством минимизации функционала, который является мерой отклонения от сетки с ячейками заданной формы и размера [1], [2]. При этом гарантируется ортогональность линий гексаэдральной сетки в нормальном направлении в пристеночных слоях. Движение точек сетки по границе реализуется в предположении, что граница области есть нулевая изоповерхность некоторой неявной функции, обобщенный градиент которой удовлетворяет некоторым условиям невырожденности в пристеночном слое [3]. Для адаптации сетки на поверхности тела задается метрика с шаровым тензором, пропорциональным средней кривизне поверхности. Предложенная адаптация позволяет резко сузить зоны «перетекания» ячеек сетки через острые ребра без существенного отклонения от ортогональности. Для вычисления дискретной средней кривизны используется тот факт, что векторная средняя кривизна есть оператор Бельтрами-Лапласа от координатного представления поверхности. Поскольку поверхность геометрической модели часто задается тесселяцией, т. е. совокупностью плоских треугольников, то размещение на ней точек регулярной сетки приводит к тому, что дискретное поле кривизны оказывается зашумленным, в нем могут возникать различные артефакты. При этом применяется специальный фильтр, с тем, чтобы шум в значениях дискретной средней кривизны не оказывал существенного влияния на характеристики сетки. Работа выполнена при поддержке гранта Правительства РФ по постановлению N 220 «О мерах по привлечению ведущих ученых в российские образовательные учреждения высшего профессионального образования» по договору № 11.G34.31.0072, заключенного между Министерством образования и науки РФ, ведущим ученым С.В. Утюжниковым и Московским физико-техническим институтом (государственным университетом).

Литература

1. Гаранжа В.А. Барьерный метод построения квазиизометричных сеток ЖВМ и МФ. 2000. Т. 40. № 11. С. 1685–1705.
2. Руденко Д.В., Утюжников С.В. Применение динамически адаптивных к решению сеток для моделирования пространственных нестационарных течений газа с большими градиентами // ЖВМ и МФ. 2002. Т. 42. № 3. С. 395–409.
3. Гаранжа В.А., Кудрявцева Л.Н. Построение сеток Делоне по неполным и противоречивым данным // ЖВМ и МФ. 2012. № 3.

6-32

ПОСТРОЕНИЕ ТЕТРАЭДРАЛЬНЫХ СЕТОК ПРИ НЕТОЧНОМ И ПРОТИВОРЕЧИВОМ ЗАДАНИИ ВХОДНЫХ ДАННЫХ

А.И. Белокрыс-Федотов, В.А. Гаранжа,
Л.Н. Кудрявцева

ВЦ РАН, МФТИ, Москва, Россия
E-mail: garan@ccas.ru

Когда во входных геометрических данных есть неточности и противоречия, то для приближенного задания расчетных областей удобно использовать нулевые изоповерхности некоторых функций, напоминающих функцию расстояния со знаком. Неявные функции можно строить по поверхностной триангуляции, по набору плоских сечений, по «супу» из точек, ребер и плоских граней, по сплайнам, и все это можно комбинировать с наборами примитивов при помощи булевых операций. Для построения тетраэдральных сеток в неявных областях в работе [1] предложен итерационный метод самоорганизации точек, который позволяет распределить их согласно заданной функции характерного размера. При этом острые ребра на поверхности автоматически приближаются ребрами Делоне, без использования специальных алгоритмов поиска острых ребер. Таким образом, одновременно строится объемная и поверхностная сетка. Этот алгоритм носит эвристический характер, но продемонстрировал работоспособность для достаточно сложных тестовых задач. В полученной сетке Делоне, как правило, присутствует небольшое число плоских тетраэдров. Для их удаления используется вариационный метод оптимизации с возможностью движения вершин сетки по границе области. В практических задачах часто возникает ситуация, когда объемная сетка должна быть согласована с сеткой на каких-то участках поверхности. В этом случае необходимо использовать алгоритмы восстановления заданной поверхностной сетки в процессе построения объемной, см., например, [2]. Эффективная реализация комбинации алгоритмов восстановления заданных граничных сеток и фактической реконструкции поверхности по неявной функции сталкивается с некоторыми трудностями, которые обсуждаются в данной работе. Работа поддержана программой Президиума РАН П-18.

Литература

1. Гаранжа В.А., Кудрявцева Л.Н. Построение сеток Делоне по неполным и противоречивым данным // ЖВМ и МФ. 2012. №3. С.499-520.
2. George P.-L. Ultimate robustness in meshing an arbitrary polyhedron // Int. J. Num. Methods. Engrg. 2003. V. 58. no. 7. P. 1061–1089.

6-33

ПАКЕТ ПРОГРАММ ЛОГОС. МЕТОДЫ ГРАФИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ЗАДАЧ

А.Л. Потехин, В.А. Никитин, И.В. Логинов,
М.Г. Кузнецов, А.И. Лопаткин, В.В. Жирнов,
П.В. Черенков, А.В. Ломтев

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

Развитие наукоемких отраслей промышленности: авиации, автомобилестроения, нефте- и газодобычи, атомной энергетики сегодня немыслимо без проведения компьютерного моделирования. Одним из важных этапов такого моделирования является этап анализа полученных результатов с помощью систем визуализации.

В рамках создания суперкомпьютерных и грид технологий в качестве одной из компонент для решения поставленных задач Институт теоретической и математической физики РФЯЦ–ВНИИЭФ разрабатывает параллельную систему постобработки ScientificView [1, 2]. Система позволяет проводить графический и числовой анализ результатов моделирования различных физических процессов, в том числе, аэро- и гидродинамики, теплопроводности, прочности в скалярном и параллельном режимах.

В докладе описан функционал системы, обеспечивающий чтение данных в различных файловых форматах, их фильтрацию, расчет экстремальных и интегральных характеристик, отображение. Приведены графики эффективности некоторых алгоритмов в зависимости от числа используемых процессоров.

Литература

1. Потехин А.Л., Логинов И.В., Тарасов В.И., Фирсов С.А., Никитин В.А., Кузнецов М.Г., Попова Н.В., Деманова А.К., Козачек Ю.В. ScientificView – параллельная система постобработки результатов, полученных при численном моделировании физических процессов // Вопросы атомной науки и техники. 2008. Вып. 4. С. 37–45.
2. Потехин А.Л. Методы быстрого формирования изображения в параллельной системе постобработки результатов научных вычислений ScientificView // Сборник трудов XX международной конференции по компьютерной графике и зрению Графикон. 2010. С. 273–279.

LOGOS CODE SYSTEM: METHODS FOR GRAPHICALLY PROCESSING RESULTS OF ENGINEERING PROBLEM SIMULATIONS

A.L. Potekhin, V.A. Nikitin, I.V. Loginov, M.G. Kuznetsov,
A.I. Lopatkin, V.V. Zhirnov, P.V. Cherenkov, A.V. Lomtev
Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Scientific Research
Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

Today, further development of science-intensive industries, such as aircraft and automobile building, oil and gas recovery, and nuclear power engineering, is impossible without computer simulation. One of the important simulation stages is analysis of the obtained results using viewing systems.

Institute of Theoretical and Computational Physics of RFNC–VNIIEF has been developing parallel post-processing system ScientificView [1, 2] within the project of developing supercomputer and Grid technologies as one of the components for resolving the tasks of the institute. ScientificView allows both graphical and numerical analysis of simulation results for various physical processes and phenomena, including aero- and hydrodynamics, heat conduction, and strength, in scalar and parallel modes.

The paper describes the system functional that provides data reading in different file formats, data filtering, calculating extreme and integral characteristics, and mapping. Plots of the efficiency of some algorithms versus the number of processors in use are given.

References

1. Potekhin A.L., Loginov I.V., Tarasov V.I., Firsov S.A., Niki-tin V.A., Kuznetsov M.G., Popova N.V., Demanova A.K., Kozachek Yu.V. ScientificView – a parallel post-processing system for results of numerical simulations of physical processes // *Voprosy Atomnoi Nauki i tekhniki*. 2008. Issue 4. pp. 37–45.
2. Potekhin A.L. Fast rendering methods in ScientificView – parallel system for post-processing scientific modeling // *Proceedings of XX International Conference on computer graphics and vision «Graphicon»*. 2010. P. 273–279.

6-34

МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ И РАСЧЕТА НАЧАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ РАЗВИТИЯ ПЛАТФОРМЫ SALOME

В.Л. Александров, Т.М. Егорова, Л.М. Зуева,
С.Е. Исмагулова, Д.В. Могиленских, А.И. Тайнов,
Н.Л. Фролова, Ю.В. Шуваева

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: d.v.mogilenskikh@vniitf.ru

Программные комплексы и методики для задания и расчета начальных данных (РНД) являются важным звеном в технологической цепочке прикладного численного моделирования. В связи с активным развитием в РФЯЦ–ВНИИТФ принципиально разных трехмерных комплексов численного моделирования назрела необходимость совершенствования технологии 3D РНД и создания соответствующего программного комплекса. За основу 3D РНД комплекса взята программная платформа в открытых кодах SALOME.

Проведен ряд работ по адаптации и расширению платформы: интеграция SALOME в процесс численного моделирования по форматам геометрических и сеточных данных, модификация существующих и внедрение новых методов построения сеток, разработка инструментов коррекции геометрических моделей и сеток, реализация алгоритмов расчета физических величин. Большое внимание уделено методам построения регулярных двумерных и трехмерных сеток, как шестигранной, так и листовой топологии.

За счет адаптации, расширения с помощью данной платформы можно решать задачи РНД с учетом особенностей численных методик. В докладе представлены созданные методики расчета начальных данных, примеры адаптации платформы SALOME и ряд сеточных моделей, полученных в представленном программном комплексе 3D РНД.

TECHNIQUES OF MODELS CONSTRUCTION AND INITIAL DATA CALCULATION FOR NUMERICAL SIMULATION BASED ON SALOME PLATFORM DEVELOPMENT

V.L. Aleksandrov, T.M. Egorova, L.M. Zueva,
S.E. Ismagulova, D.V. Mogilenskikh, A.I. Tainov,
N.L. Frolova, Yu.V. Shuvaeva

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

E-mail: d.v.mogilenskikh@vniitf.ru

Program complexes and techniques for initial data specification and calculation (IDC) are an important part in the flow of applied numerical simulation. In connection with active development of fundamentally different kinds of 3D complexes of numerical simulation in RFNC–VNIITF, ripe is the necessity to perfect 3D IDC technology and to create a relevant program complex. As a basis for 3D IDC complex assumed was the open-code software platform SALOME.

A number of operations on the platform adaptation and extension was conducted: SALOME integration into numerical simulation process by formats of geometric and grid data, modification of the current techniques of grid construction and introduction of new ones, development of correction instruments for geometric models and grids, implementation of calculation algorithms for physical values. Much attention is given to techniques of construction of regular 2D and 3D grids, both of hexahedral, and of sheet topology.

At the expense of adaptation and extension it is allowed to solve IDC with the given platform, taking into account the peculiarities of numerical techniques. The paper presents the created techniques of initial data calculation, the examples of SALOME platform adaptation and a number of grid models obtained in the proposed program complex 3D IDC.

6-35

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ИСКАЖЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ В СЛОЖНЫХ МЕТЕОУСЛОВИЯХ

А.А. Пахомов, А. А. Потапов

Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

E-mail: potapov@cplire.ru

Работа посвящена математическим основам теории некорректных обратных задач в оптике, а также

методам обработки и восстановления изображений по неполной информации об их Фурье-спектрах. Эта задача является частью общей задачи устранения влияния атмосферных и оптических искажений при обнаружении и регистрации удаленных объектов на большой дальности при плохих метеоусловиях. К числу оптических искажений относятся смазы и расфокусировки по дальности, а к числу атмосферных искажений – туман, сумерки, восходящие атмосферные потоки, водная среда и турбулентная атмосфера Земли. Большой интерес также представляют слабые астрономические изображения от удаленных космических объектов, которые представляют собой фактически поток фотонов, где на один кадр приходится от десяти до сотни фотонов. Конечным этапом задачи обработки является визуальное распознавание изображения или интересующего объекта. Фактически данная работа является продолжением теоретических исследований академика А.Н. Тихонова, которая известна в науке как Тихоновская регуляризация. В докладе развито новое направление для решения задач, связанных с устранением амплитудного смаза, дефокусировки, фазового смаза и т. д. Разработан общий регуляризирующий подход для решения таких задач при неизвестных параметрах искажений. Проведены многочисленные успешные экспериментальные исследования по обработке реальных изображений. Предложен новый метод обработки короткой серии ярких космических изображений для объектов, быстро меняющих свой ракурс. Программное обеспечение прошло испытания при сдаче ряда комплексов и принято заказчиком. Данный метод позволяет устранить не только влияние атмосферы, но и остаточные aberrации оптического регистратора. Рассмотрена задача оптимизации методов обработки очень слабых астрономических изображений в режиме счета фотонов и проведено испытание программного комплекса на реальных изображениях. Впервые предложены оригинальные цифровые методы обработки, позволяющие устранить нелинейный аддитивный фон. Подобные методы пригодны для подводных работ и при повышении безопасности полетов в условиях тумана. Работа отражает 25-летний опыт авторов по эксплуатации, созданию методик аттестации и обработки изображений, зарегистрированных на крупных телескопах России (станция Зеленчукская, САО РАН). Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 07-07-07005-д, № 07-08-00637-а, № 11-07-00203-а).

DIGITAL PROCESSING OF THE CORRUPTED IMAGES OBTAINED IN THE COMPLEX WEATHER CONDITIONS

A.A. Pakhomov, A.A. Potapov

V. A. Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Moscow, Russia

E-mail: potapov@cplire.ru

The work is devoted to mathematical foundations of the ill-posed inverse problems theory in optics and also to the methods of processing and restoration of images basing on

incomplete information about their Fourier spectrum. This problem is a part of the general problem of elimination of atmospheric and optic corruptions influence during detection and registration of remote objects at long distance with bad weather conditions. Smudges and distance defocusing can be considered as optical corruptions. Fog, twilight, ascending atmospheric flows, aqueous medium, and turbulent Earth atmosphere can be considered as atmospheric corruptions. Weak astronomical images from remote space objects which are a photon stream in fact and where are from ten to hundred photons per a frame are of big interest also. The final stage of processing problem is the visual recognition of image or the object under investigation. In fact, this work is a continuation of the academician A.N. Tikhonov theoretical investigations which are known as a Tikhonov regulation. The new way of solving the problems related to the elimination of amplitude smudge, defocusing, phase smudge etc. has been developed in the report. The general regularizing approach for resolving such problems with unknown parameters of corruptions has been developed. Numerous successful experimental investigations on the processing of real images have been carried out. The new method of processing of a short series of bright space images for objects which change its aspect angle fast has been proposed. The software has been proved when delivering of a series of sets and has been accepted by the client. This method allows eliminating not only the atmosphere influence but also the residual aberrations of optical monitor. The problem of optimization of very weak astronomical images processing methods in the mode of photon counting has been considered and the test of program set on the real images has been carried out. For the first time the original digital methods of processing which allow eliminating non-linear additive background have been proposed. Such methods are good for underwater works and for the flights safety increase in the presence of fog. The work reproduces the authors' 25 year long experience of operation, creation of validation methodology and methodology of processing of the images recorded on the big telescope of Russia (Zelenchuzhskaya stanitsa, SAO RAS). The work has been done with the financial support of the Russian Foundation of Basic Research (projects № 07-07-07005-д, № 07-08-00637-а, № 11-07-00203-а).

6-36

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ФРАКТАЛОВ И ЭФФЕКТОВ СКЕЙЛИНГА ПРИ ОБРАБОТКЕ МАЛОКОНТРАСТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И СВЕРХСЛАБЫХ СИГНАЛОВ В ИНТЕНСИВНЫХ ПОМЕХАХ

А.А. Потапов

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

E-mail: potapov@cplire.ru; www.potapov-fractal.com

В настоящее время в обработке сигналов и изображений преимущественно, привычно и повсеместно

используются целочисленные меры (интегралы и производные целого порядка), гауссовская статистика, марковские процессы и т. п. Работы по применению фракталов, дробных операторов и эффектов скейлинга в обработке многомерных сигналов были начаты автором в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН в начале 80-х гг. XX в. и в настоящее время приобрели большую известность в мире. С созданием в 70-х гг. XX в. фрактальной геометрии (Б. Мандельброт, 1924–2010 г.г.) в науку и технику начали стремительно проникать идеи дробных размерностей, дробных операторов, недифференцируемых функций, скейлинга. Данные математические понятия, объединенные с физикой фракталов, образуют новые «мостики», довольно неожиданные, между не только смежными дисциплинами, что зачастую приводит к эффективным методам решения задач, иногда трудно разрешимых на данном уровне развития классических научных направлений. Фрактальная обработка как нельзя лучше подходит для решения современных задач при обработке малоконтрастных изображений любого типа в интенсивных помехах. Цель доклада – дать обзор принципиально новых методов, предложенных автором и развиваемых им с учениками в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, с использованием текстурных и фрактальных сигнатур/мер на основе принципов детерминированного хаоса, скейлинга и дробных операторов для решения радиофизических, радиолокационных, радиоэлектронных и других задач в их современной постановке. В докладе приведены избранные примеры из радиофизики, радиолокации, электроники, материаловедения, электродинамики, медицины и т. д. Эти примеры получены в рамках нового фундаментального научного направления «Фрактальная радиофизика и фрактальная радиоэлектроника: проектирование фрактальных радиосистем», предложенного и развиваемого автором в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Рассмотрены принципы действия макета первого в мире фрактального непараметрического обнаружителя радиолокационных сигналов, созданного в 2005 г. Коренное отличие предложенных фрактальных методов от классических связано с принципиально иным подходом к основным составляющим сигнала и поля. Это позволяет перейти на новый уровень информационной структуры реальных немарковских сигналов и полей. По данному направлению опубликовано более 500 научных работ, в том числе 13 монографий.

**APPLICATION OF THE FRACTAL THEORY
AND SCALING EFFECTS DURING PROCESSING
OF LOW-CONTRAST IMAGES AND SUPER
WEAK SIGNALS IN THE PRESENCE
OF INTENSIVE NOISE**

A.A. Potapov

V. A. Kotel'nikov Institute of Radio Engineering
and Electronics RAS, Moscow, Russia

E-mail: potapov@cplire.ru

Currently, in the processing of signals and images, integer measures (integrals and derivatives of integer order), Gaussian statistics, markovian processes and so on are commonly mainly and all over used. The works

at application of fractals, fractional operators and scaling effects in the processing of multidimensional signals were begun in Kotelnikov IREE RAS by the author in the beginning of eighties of XX. At the moment these works have got the great popularity in the world. With creation of the fractal geometry in the seventies of XX (B. Mandelbrot 1924–2010) the conceptions of fractional dimensions, fractional operators, non-differentiable functions and scaling began to penetrate into the science and engineering. These mathematical ideas combined with the physics of fractals make new unexpected «bridges» between not only adjacent sciences. It often leads to the effective methods of solutions of problems which sometimes are hardly solvable for this level of development of the classical scientific directions. The fractal processing perfectly works for solving the modern problems of processing of the low-contrast images of every type in the presence of intensive noise. The report purpose is to do a review of truly new methods which were suggested and are being developed in Kotelnikov IREE RAS by the author and his pupils using the textural and fractal signatures/measures on the basis of principles of deterministic chaos, scaling and fractional operators for solution of radio physical, radar, radio electronic and other tasks in their up-to-date formulation. Selected samples from radio physics, radar, electronics, material science, electrodynamics, medicine etc. are presented in the report. These samples have been obtained within the framework of the new fundamental scientific direction «Fractal radio physics and fractal radio electronics: designing of the fractal radio systems» which was suggested and is being developed in Kotelnikov IREE RAS by the author. The principles of the world's first non-parametric fractal detector of the radar signals which was made in 2005 have been considered. The fundamental difference of suggested fractal methods from the classical ones is due to basically different approach to the main components of a signal and a field. It allows going to the new level of informational structure of the real non-markovian signals and fields. There are more than 500 scientific works published on this subject including 13 monographs. The well-known Moscow school of fractal methods was established. Author's web page: www.potapov-fractal.com.

6-37

**ВИЗУАЛЬНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССОВ ФИЗИКИ ВЗРЫВА И УДАРА
В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ MASTER
PROFESSIONAL НА СОВРЕМЕННЫХ
КОМПЬЮТЕРАХ**

В.В. Руденко

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

В докладе будет представлен пользовательский программный комплекс Master Professional, описаны его возможности. Комплекс представлен в качестве численного инструмента для широкого круга пользователей – от студентов и преподавателей ВУЗов до профессиональных исследователей.

Ориентирован как на проведение численных экспериментов, так и на преподавание курсов соответствующих специальностей. Содержит большое количество баз данных геометрических моделей, характеристик веществ, курсовых работ и монографий по нескольким разделам механики. Установлен в нескольких ВУЗах и ряде предприятий России. Проводится постоянное расширение ассортимента интегрированных численных методик и улучшение пользовательских качеств. Работает как на персональных ЭВМ, так и на специализированных компактных суперЭВМ в параллельном режиме. Является зарегистрированным в России коммерческим программным продуктом.

**VISUAL NUMERICAL MODELING OF
DETONATION AND SHOCK PHYSICS PROCESSES
IN THE MASTER PROFESSIONAL SUITE ON
MODERN COMPUTERS**

V.V. Rudenko

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

This report presents a user software suite called MASTER Professional and describes its features. The software suite is a numerical modeling tool intended for a wide range of users, from students and instructors at colleges and universities to professional researchers.

MASTER Professional serves for both numerical experiments and teaching of courses in respective areas of expertise. It contains a large number of databases of geometric models, material properties, term papers and monographs on a number of branches of mechanics. The software suite has been installed at a number of universities, institutes and companies in Russia. The range of integrated numerical techniques is constantly expanded, and user features are constantly improved. The software suite can be run on both PCs and special parallel desk-top supercomputers. MASTER Professional is a commercial software product registered in Russia.

6-38

**О НЕВЫРОЖДЕННОСТИ
ТРЕХМЕРНЫХ СЕТОК**

О.В. Ушакова

Институт математики и механики Уральского отделения РАН,
Екатеринбург, Россия

E-mail: uov@imm.uran.ru

Одним из главных требований, предъявляемых к вычислительным сеткам, используемым при моделировании задач математической физики, является требование невырожденности. Для построения трехмерных сеток (как структурированных, так и неструктурированных) очень часто используются шестигранные ячейки, являющиеся образами единичного куба при трилинейном отображении. В представляемой работе [1] исследуется надежность различных тестов, применяемых в теории и практике построения сеток для проверки не-

вырожденности указанных ячеек. Часть из исследованных тестов используется в коммерческих генераторах сеток. Исследование тестов начинается с подробной формулировки понятия невырожденности сетки, приводится ряд общих теорем для проверки невырожденности сеток. Результаты изучения различных тестов аналитическими средствами и с помощью специального численного эксперимента со случайными числами представляются в [1] как итог применения общих понятий и теорем. Большая часть исследованных тестов, в том числе и тесты, используемые в коммерческих пакетах построения сеток, оказались ненадежными. Перечисляются надежные тесты, указывается их экономичность, демонстрируются результаты тестирования трехмерных сеток.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 11-01-00835-а), Программы фундаментальных исследований Президиума УрО РАН (проект 12-С-1-2001), Проекта ориентированных фундаментальных исследований УрО РАН «Оптимизация алгоритмов генерации трехмерных сеток в блочных конструкциях».

Литература

1. Ushakova O.V. Nondegeneracy tests for hexahedral cells // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 200 (2011) 1649–1658.

**ON NONDEGENERACY
OF THREE-DIMENSIONAL GRIDS**

O.V. Ushakova

Institute of Mathematics and Mechanics
of the Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia

E-mail: uov@imm.uran.ru

One of the main requirements imposed on computational grids used in physical problem modeling is nondegeneracy requirement. For constructing three-dimensional grids (both structured and unstructured) hexahedral cells which are the images of the unit cube for a trilinear mapping are often used. In the presented work [1], the reliability of different tests used in the theory and practice of grid generation for estimating nondegeneracy of hexahedral cells is examined. The part of tests is used in commercial grid generation packages. The investigation starts with the formulation of the concept of nondegeneracy, a number of general theorems for the check of grid nondegeneracy is given. The results of investigations of different tests by analytical tools and by a special experiment with the help of random numbers are presented in [1] as an application of common concepts and theorems. The greater part of tests including those used in commercial packages turned out to be unreliable. Reliable tests are listed, their efficiency is estimated and the results of testing three-dimensional grids are given.

This work was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects 11-01-00835-a), the program of the fundamental research of the Ural Branch of RAS (12-C-1-2001) and the project of oriented fundamental research of the Ural Branch of RAS «Optimization of algorithms for generation of three-dimensional grids in block constructions».

Reference

1. Ushakova O.V. Nondegeneracy tests for hexahedral cells // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 200 (2011) 1649–1658.

quality of irradiation modified polymers. This is attainable if charging units are arranged equidistantly and closely to each other all around the irradiator to make use of as much of its emissions as possible.

6-39

**РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ
РАДИАЦИОННОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ
ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИЭТИЛЕНОВ**

Д.В. Алявдин

УЗПТ «Маяк», Озёрск, Россия
E-mail: ozersk@ozeu.ru

Излучение как технологическое средство применяется около 60 лет, однако, несмотря на большие успехи, достигнутые в создании облучательных устройств, излучение все еще остается слабоизученным процессом модификации полимеров. Одним из основных факторов, определяющим стоимость продукции, полученной радиационным путем, является производительность облучательных устройств, которая, в свою очередь, зависит от мощности источника излучения и эффективности его использования. Основные проблемы при эксплуатации облучательных установок – это, обычно, малый облучаемый объем и использование устаревших технологий. Данная работа относится к области изготовления изделий из полимерных материалов и может быть использована при модификации полимеров в производстве кабелей, труб, пленок и других термоусаживаемых изделий. Работа направлена на повышение эффективности использования ионизирующего излучения и производительности установки при сохранении качества изготовления облучаемых полимерных изделий. Указанный результат достигается тем, что в установке для радиационной модификации полимерных изделий грузочные устройства расположены вокруг облучателя равноудаленно от него и плотно друг к другу по всему периметру для максимально полного использования излучения облучателя.

**DEVELOPMENT OF IRRADIATION
MODIFICATION EQUIPMENT**

D.V. Aljavidin

UZPT «Majak», Ozersk, Russia
E-mail: ozersk@ozeu.ru

Radiation as a technological means has been used for about 60 years but despite great success in the development of irradiation facilities it remains a poorly studied process for modification of polymers. A key factor defining the cost of irradiation products is the output capacity of irradiation equipment, which, in turn, is dependent on source capacity and efficiency. Main operational problems are, as a rule, small irradiation volumes and out-of-date technology. What is discussed in the paper is related to the manufacture of polymeric articles and can be used to modify polymers for cables, pipes, film and other thermocontracting produce. The purpose is to make the use of ionizing radiation and irradiation equipment more efficient with no loss in the

6-40

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЙ
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВЗРЫВЧАТЫХ
СОСТАВОВ К УДАРУ**

И.Д. АХМАДИЕВ, В.Я. БАЗОТОВ,
Л.Х. БАДРЕТДИНОВА, А.Н. АНИСИМОВ

ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский
технологический университет», Казань, Россия
E-mail: scrfc@yandex.ru

В работе с помощью метода конечных элементов в явной постановке моделируются испытания чувствительности взрывчатых составов (ВС) к удару. Созданы конечно-элементные модели копра в трехмерной и двухмерной осесимметричной постановке. Создана трехмерная твердотельная модель высоконаполненного ВС на основе октогена. На основе трехмерной модели состава построена двумерная конечно-элементная сетка в осесимметричной постановке.

Проведены расчеты удара груза по ВС, получены распределение пластической деформации и температуры по частицам взрывчатого состава. Модель показывает влияние физико-механических характеристик флегматизатора на распределение пластической деформации и температуры в частицах октогена.

**MODELING OF IMPACT SENSITIVITY TEST
OF EXPLOSIVE COMPOUNDS**

I.D. Akhmadiev, V.J. Bazotov,
L.Ch. Badretdinova, A.N. Anisimov

Kazan National Research Technological University,
Kazan, Russia

In this work the impact sensitivity test of explosive compounds by explicit finite element method is modeling. For this 2D and 3D finite element meshes of impact machines were generated. Also a 3D solid model of explosive compound was built, on basis of which a 2D finite element mesh of compound was generated.

The calculations of the impact of the load on the explosive compound were performed. The distribution of the plastic strain and temperature in the particles of the compound were obtained. The model shows an influence of the mechanical properties of the retarder on the distribution of the plastic strain and temperature in the hmx particles.

6-41

РАВНОВЕСИЕ ТРУБЫ В ПОЛЕ СИЛ ТЯЖЕСТИ

В.В. Башуров¹, Н.А. Ваганова³, А.И. Кропотов¹,
М.В. Пчелинцев², Н.А. Скоркин²,
М.Ю. Филимонов³

¹Трехгорный технологический институт – филиал
Национального исследовательского ядерного университета
«МИФИ», Трехгорный, Россия

²Снежинский физико-технический институт – филиал
Национального исследовательского ядерного университета
МИФИ, Снежинск, Россия

³Институт математики и механики УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

Предложена нелинейная модель, описывающая перемещение трубопровода с движущейся по нему жидкостью, что позволило рассмотреть ряд практически интересных задач, не имеющих решения в линейной модели. Решена задача о равновесии трубы с движущейся по ней жидкостью в поле сил тяжести. Получено условие потери единственности положения равновесия трубы. Критерием устойчивости является достижение скорости жидкости в трубе определенного значения. Для нахождения критической скорости применен оригинальный метод, разработанный одним из авторов. Исследована устойчивость всех положений равновесия. Для нестационарной модели построено численное решение задачи о движении трубы в слабо сопротивляющейся жидкости.

THE EQUILIBRIUM OF THE PIPE IN A GRAVITY FIELD

V.V. Bashurov¹, N.A. Vaganova³, A.I. Kropotov¹,
M.V. Pchelintsev², N.A. Skorkin², M.Y. Filimonov³

¹Tryokhgorny Technological Institute – branch of the National
Nuclear Research University «MEPhI», Tryokhgorny, Russia

²Snezhinsk Institute of Physics and Technical – Branch
of National Nuclear Research University «MEPhI»,
Snezhinsk, Russia

³Institute Mathematics and Mechanics,
Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia

A nonlinear model describing the movement of a pipeline with its moving fluid was proposed thus enabling us to consider a number of interesting problems with no solution in the linear model. The problem of the tube balance in a gravity field with its moving fluid was solved. The condition of unicity loss of the tube balance position was received. The stability criterion is the achievement by the fluid of a certain velocity. To find the critical velocity used an original method developed by one of the authors. The stability of all balance positions was studied. For the nonstationary model was given numerical solution of the problem of motion in the tube slightly resistant fluid.

6-42

КОМПЛЕКС ПРОГРАММ «ВОЛНА»: МОДЕЛИ И МЕТОДЫ

Д.А. Варфоломеев, В.Ф. Куропатенко, М.Н. Якимова

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Излагаются модели и методы, реализованные в лагранжевом одномерном комплексе программ ВОЛНА, предназначенном для математического моделирования неустановившихся движений сжимаемых идеальных и неидеальных сред с широким спектром моделируемых свойств и процессов. В основе комплекса лежит неоднородный разностный метод Куропатенко, который выделяет в решении сильные и слабые разрывы: фронты ударных и детонационных волн, крайние характеристики волн разрежения, контактные границы, линии фазовых переходов.

Основные особенности комплекса. Применяется широкий набор уравнений состояния, учитывающих внутреннюю структуру материалов, потенциальные и тепловые компоненты давления и энергии, полиморфные фазовые переходы, плавление, испарение, диссоциацию, ионизацию, области стабильности и метастабильности фаз. В адиабатических непрерывных течениях энтропия сохраняется. Полностью решена задача о распаде произвольного разрыва для уравнений состояния общего вида при этом учитываются детонационные процессы, включая кинетику и химпик, а также возможное расщепление ударных волн и волн разрежения при фазовом переходе. При моделировании упругопластических свойств учитывается зависимость сдвиговых напряжений от степени деформации, скорости деформации, термодинамических параметров, изменений фазового состояния, включая учет истории фазовых превращений. При моделировании прочностных свойств учитываются кинетика роста и залечивания повреждений, разрушение, восстановление сплошности и прочности вещества, история фазовых превращений. Кинетика прямых и обратных фазовых превращений зависит от разности потенциалов Гиббса фаз и времени релаксации. Параметры смеси фаз определяются в приближении термомеханического равновесия. При учете лучистой теплопроводности ударная волна выделяется в виде разрыва сразу после ее отрыва от тепловой волны. Перечисленные процессы носят взаимосвязанный характер и оказывают влияние друг на друга.

Комплекс ВОЛНА в совокупности с системой визуализации Vizi_Volna является универсальным и эффективным математическим инструментом, предназначенным для исследования большого спектра физических процессов, математических моделей и методов решения. Комплекс активно используется как полигон для отработки новых моделей и алгоритмов, для подготовки и планирования экспериментов, интерпретации экспериментальной информации, а также для тестирования других комплексов.

Учет всех тонкостей моделируемых свойств и процессов обеспечивает существенно меньшее количество

подгоночных параметров, а расчеты носят предсказательный характер.

Работа выполнена при поддержке РФФИ ГРАНТ №10-01-00032.

VOLNA CODE PACKAGE: MODELS AND METHODS

D.A. Varfolomeev, V.F. Kuropatenko,
M.N. Yakimova

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

The paper describes models and methods implemented in the 1D Lagrangian code VOLNA which is used for modeling unsteady flows of compressible ideal and non-ideal media with a wide spectrum of properties and processes. The code basically implements the inhomogeneous difference method proposed by V.F. Kuropatenko, which discriminates between strong and weak discontinuities including shock and detonation fronts, rarefaction waves with their extreme characteristics in the fan, contact boundaries and phase transition lines.

The main features of the code are as follows. The code uses a wide range of equations of state which consider the inner structure of materials, potential and thermal pressures and energies, polymorphous phase transitions, melting, evaporation, dissociation, ionization, phase stability and instability regions. Entropy conserves in adiabatic continuous flows. Riemann's problems are completely solved for general equations of state with account for detonation processes including kinetics and chemical peak, and the possible decomposition of shock and rarefaction waves in phase transitions. Elastic-plastic properties are modeled with account for shear stresses dependent on strain degree, strain rate, thermodynamic parameters, and changes in the phase state including phase transformation history. Strength properties are modeled with account for damage growth and healing, failure, continuity and strength recovery including phase transformation history. Kinetics of direct and reverse phase transitions depends on the Gibbs phase potential difference and relaxation time. Parameters for mixed phases are determined in a thermo-mechanical equilibrium approximation. If radiative heat conduction is included, the shock wave is treated as a discontinuity right after it separates from the thermal wave. All the above processes are interrelated and influence each other.

VOLNA with its Vizi_Volna visualization system is a universal and effective mathematical tool for investigating a wide spectrum of physical processes, mathematical models and solution methods. It is intensively used to test and adjust new models and algorithms, design experiments, interpret experimental results, and test other codes.

Thorough accounting for all specific features of simulated properties and processes helps significantly reduce the number of adjustable parameters and make predictions more accurate.

The work was supported by RFBR GRANT 10-01-00032.

О МЕТОДАХ РАСЧЕТА ОТКОЛОВ

Д.А. Варфоломеев, В.Ф. Куропатенко

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

В результате взаимодействия встречных волн разрежения вещество может перейти в метастабильную область отрицательных давлений. В этой области на микроуровне происходит рост поврежденности кристаллической структуры вещества. Скорость роста микроповрежденности зависит как от величины отрицательного давления, так и от времени пребывания вещества в области отрицательных давлений. Если концентрация микропор или микротрещин превысит критическое значение – вещество разрушается. Методы расчета отколов, в основе которых лежит любой из однородных методов, обладают существенными недостатками. Из-за размытия слабых разрывов, ограничивающих волны разрежения, место и время образования первого откола определяется с низкой точностью. Из-за размытия ударных волн, возникающих в точке откола, в решение вносятся значительные погрешности при их формировании, что приводит к искажению картины в целом. Методы расчета отколов, в основе которых лежит один из неоднородных разностных методов, лишены этих недостатков, т.к. выделяют в решении сильные и слабые разрывы, тем самым четко разграничиваются зоны влияния сжатия и разрежения.

Предлагается новый метод расчета отколов, принципиальным отличием которого от других методов является учет всех особенностей течения при разрушении. Предприняты шаги по повышению точности определения момента и координаты образования трещины. В момент откола рассчитываются ударные волны, фронты которых отслеживаются в последующем счете. Происходит раскрытие трещины. Проводится анализ течения в окрестности трещины. Созданы методы для расчета уединенной трещины и для случая, когда в окрестности трещины происходит дробление вещества.

Построены аналитические решения задач с образованием уединенной трещины и откола с последующим дроблением вещества. На примере расчета эталонных решений показано преимущество нового метода перед другими методами. Исследована сходимость метода при измельчении пространственной сетки и проведено сравнение с результатами расчетов отколов однородными методами.

Работа выполнена при поддержке РФФИ ГРАНТ №10-01-00032.

SPALL SIMILATION METHODS

D.A. Varfolomeev, V.F. Kuropatenko

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

The interaction of meeting rarefaction waves in matter may make it metastable under negative pressures and cause micro-scale in its crystalline structure. The rate with which the damages grow depends both on the magnitude

of the negative pressure and on the time of its action. If the concentration of microcracks and micropores increases a critical value, the matter fails. The paper considers several approaches to spall modeling. The methods which are based on any of homogeneous techniques exhibit severe shortcomings. Due to the smearing of weak discontinuities which bound rarefaction waves, the position of the first spall and the time of its formation are determined with poor accuracy. The smearing of shockwaves which travel from the spallation point induces large errors which distort the pattern of flow on whole. Methods based on one of the inhomogeneous difference schemes are free from these shortcomings because they identify strong and weak shocks in the solution which allows clear discrimination between compression and rarefaction zones.

We propose a new method for spall simulation, which differs from others in its consideration of all peculiarities in material flow during cracking. Certain steps were taken to attain higher accuracy in the determination of the time when a crack forms and its coordinates. At the time when a spall occurs, the code computes shock whose fronts are tracked in further simulation. Crack opening is modeled. Flow near a crack is analyzed. It is also possible to simulate isolated cracks if material near them goes into fragments.

Analytical solutions are derived for problems which involve the formation of an isolated crack and spall with further fragmentation. Advantages of the new method are demonstrated through the calculation of standard test problems. Its convergence for spatial mesh refining is investigated and comparison with homogeneous methods is provided.

This work was done under support of Russian Basic Research Foundation Grant 10-01-00032.

6-44

**ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТОВ
ГАЗОДИНАМИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ
ПО ПРОТОННОЙ РАДИОГРАФИИ**

И.В. Храмов, С.Ю. Седов, Р.С. Вахмистров,
К.Л. Михайлюков, В.Б. Титова, Ю.В. Янилкин,
И.Н. Павлуша, Т.В. Семенова, С.В. Потапов,
И.А. Страбыкина, Е.Ю. Храмова, В.Р. Крутько,
М.В. Вершинин, Е.А. Маврина, Г.С. Фирсова,
Р.И. Козлова, В.А. Аринин, Б.И. Ткаченко

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

Проведена работа по тестированию существующих математических комплексов с использованием метода протонной радиографии.

С этой целью в осенней сессии 2010 г. на базе ускорителя У-70 (Протвино) были проведены два эксперимента по сжатию медной оболочки с помощью ВВ. Оба эксперимента проводились в одинаковой постановке, в первом из них изучалась стадия распространения детонации в ВВ, во втором – сжатия медной оболочки.

Проведена серия 2D и 3D расчетов газодинамики с использованием различных математических комплексов ВНИИЭФ. Получены расчетные протонные радио-

граммы, которые сравниваются с экспериментальными изображениями.

На основе протонных изображений (расчетных и экспериментальных) проведена трехмерная реконструкция оболочек. Данная реконструкция является протонным вариантом известной из рентгенографии задачи $\rho(r)$.

**VERIFICATION OF FLOW DYNAMICS
SIMULATIONS USING RESULTS OF PROTON
RADIOGRAPHY EXPERIMENTS**

I.V. Khramov, S.Yu. Sedov, R.S. Vakhmistrov,
K.L. Mikhaylyukov, V.B. Titova, Yu.V. Yanilkin,
I.N. Pavlusha, T.V. Semenova, S.V. Potapov,
I.A. Strabykina, E.Yu. Khramova, V.R. Krut'ko,
M.V. Vershinin, E.A. Mavrina, G.S. Firsova, R.I. Kozlova,
V.A. Arinin, B.I. Tkachenko

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

Verification of existing CFD packages of VNIIEF using proton radiography method has been fulfilled.

For this purpose two experiments on explosive compression of copper sphere shell at the 70-GeV proton accelerator of the IHEP has been conducted in autumn 2010. Both experiments have been carried out in the same manner formulation. During the first experiment has been devoted to studying detonation wave propagation stage, the second one has been dedicated to copper shell compression final stage.

2D and 3D computer simulations series has been performed using different CFD packages of VNIIEF. Proton radiograph images are calculated and compared with experimental ones.

3D reconstruction of shells has been fulfilled based on proton radiograph images (calculated and experimental). This reconstruction is a proton version of the well-known X-ray radiography problem $\rho(r)$.

6-45

**ОБ АЛГОРИТМЕ РЕШЕНИЯ
ТРЕХМЕРНОЙ ЗАДАЧИ ПОТЕНЦИАЛА
ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ
ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

А.В. Горшков

Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: alex.gorshkov@usu.ru

Многие задачи математической физики сводятся к решению задачи потенциала. Поэтому актуально повышение скорости и точности решения. Одно из направлений повышения скорости вычислений – уменьшение размерности системы разрешающих уравнений. Использование метода граничных элементов позволяет существенно понизить порядок системы, особенно для трехмерных задач.

Другой путь повышения скорости и точности – максимально возможное использование аналитических вычислений.

В данной работе предложен алгоритм решения задачи потенциала, основанный на методе граничных элементов. Входящие в алгоритм интегралы вычислены аналитически. В качестве контрольного примера решена задача Дирихле для куба.

**ABOUT THE ALGORITHM DECISION
OF A THREE-DIMENSIONAL PROBLEM
OF POTENTIAL NUMERICALLY-ANALYTICAL
METHOD OF BOUNDARY ELEMENTS**

A.V. Gorshkov

Institute of Engineering Science of Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

E-mail: alex.gorshkov@usu.ru

Many problems of mathematical physics are reduced to the decision of a problem of potential. Therefore increase of speed and accuracy of the decision is actual. One of directions of increase of speed of calculations – reduction of dimension of system of the resolving equations. Use of a method of boundary elements allows to lower essentially a system order, especially for three-dimensional problems.

Other way of increase of speed and accuracy – the greatest possible use of analytical calculations.

In the given work the algorithm of the decision of a problem of the potential, based on a method of boundary elements is offered. The integrals entering into algorithm are calculated analytically. As a control example the problem of Dirichlet for a cube is solved.

6-46

**ДВИЖЕНИЕ РОТОРА
В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ**

О.Н. Дементьев

Челябинский государственный университет,
Челябинск, Россия

E-mail: dement@csu.ru

Методом прямого численного интегрирования системы уравнений, описывающих распределение давления в тонком слое вязкого газа решается задача о движении вращающегося твердого неуравновешенного цилиндра в цилиндрической камере, которая имеет конечную длину и заполнена вязким газом. На внутренний круговой цилиндр-ротор действуют периодически меняющиеся во времени внешние силы. Расчеты траекторий движения ротора проведены для значений скорости его вращения в интервале от 50 до 2000 об/сек при изменении относительного дисбаланса от 0,5 до 0,9. Выяснено, что существует ограниченная зона скоростей вращения ротора для фиксированного значения дисбаланса, где возможно движение ротора без возникновения контакта с неподвижной круговой цилиндрической камерой.

Малая эллиптичность камеры приводит к расширению зоны формирования устойчивых эллиптических траекторий за счет увеличения наибольшей критической скорости вращения.

**THE ROTOR'S MOTION IN A CYLINDRICAL
CHAMBER**

O.N. Dementyev

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: dement@csu.ru

The problem of rotor's movement in a circular cylindrical chamber having finite length and filled with gas is solved by the method of direct numerical integration of the set of equations describing pressure distribution in a thin layer of viscous gas and the motion of rotating statically disbalanced cylinder. The rotor moving in the gravitational field is influenced by the impressed forces which vary periodically in time. Trajectories of cylindrical motion are computed for different velocity values (50–2000 rev/s), value of disbalance 0.5–0.9. Values of the problem parameters are determined which are responsible for rotating cylinder trajectories. There is a limited interval of rotating velocities for a fixed disbalance value, where stable rotor movement is possible.

Small ellipticity of the chamber causes increase of stability. With increasing rotating velocity the diameter of stationary orbit increases greatly.

6-47

**ДВУМЕРНЫЕ ТЕЧЕНИЯ МЕЛКОЙ ВОДЫ,
ПРИМЫКАЮЩИЕ К ГРАНИЦЕ УРЕЗА**

С.Л. Дерябин, А.П. Садов

Уральский государственный университет путей сообщения,
Екатеринбург, Россия

E-mail: SDeryabin@math.usurt.ru; alsadov@yandex.ru

Для описания распространения длинных волн используются все модели, от классических уравнений мелкой воды до полной модели идеальной жидкости [1]. В работе [2] проведены исследования для классических уравнений мелкой воды и был получен закон движения границы уреза и значения скорости жидкости на ней.

В настоящей работе в рамках модели мелкой воды по методологии [3] исследованы три различных конфигурации двумерных течений, возникающих при выходе волны на берег. Во всех случаях решения поставленных начально-краевых задач построены в виде рядов, сходящихся в окрестности границы уреза. Найдены законы движения границы уреза и моменты времени, до которых сохраняется непрерывная картина течения и после которых возникает другая конфигурация течения. Также построены законы движения границы уреза с угловой точкой.

Для описания вертикальных распределений параметров волны исследовалась одномерная модель газовой динамики для политропного газа с показателем политропы равным 7 [4]. Решение, описывающее волну, построено в виде сходящихся рядов, в окрестности свободной поверхности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №№ 11-01-00198).

Литература

1. Хакимзянов Г.С., Шокин Ю.И., Барахнин В.Б., Шокина Н.Ю. Численное моделирование течений жидкости с поверхностными волнами. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 394 с.
2. Баутин С.П., Дерябин С.Л., Хакимзянов Г.С., Соммер А.Ф. Исследование решений уравнений мелкой воды в окрестности подвижной линии уреза // Вычислительные технологии: Новосибирск: 2010. Т. 15. № 6. С. 19–41.
3. Баутин С.П., Дерябин С.Л. Математическое моделирование истечения идеального газа в вакуум. Новосибирск: Наука, 2005. 390 с.
4. Нигматуллин Р.И., Болотнова Р.Х. Широкодиапазонное уравнение состояния воды и пара. Метод построения // Теплофизика высоких температур, 2008. т. 46, № 2. С. 206–218.

TWODIMENTIONAL SMALL WATER FLOWS BORDERED ON CUTTING FRONTIER

S.L. Deryabin, A.P. Sadov

The Ural State University of Railway Transportation,
Yekaterinburg, Russia

E-mail: SDeryabin@math.usurt.ru; alsadov@yandex.ru

All models from classic small water equations up to the full perfect liquid model are used for describing long waves' extending [1]. Studies for classic small water equations are conducted in work [2] and the law of cutting frontier movement and liquid velocity on it are got.

This work using methodology [3] in the context of small water model three different configurations of twodimensional flows springing up wave's takeoff ashore. In all cases decisions of initial-boundary problems are built in the form of series converging in the neighbourhood of a cutting frontier. Laws of a cutting frontier movement and periods of time up to which continuum flow view is kept and after which another flow configuration appears are found. Laws of a cutting frontier movement with an extreme point are built as well.

For description of vertical wave parameters distributions the one-dimentional gas dynamics model for polytropic gas with polytropic exponent of 7 [4] is studied. The solution that describes the wave is built in series converging in the neighbourhood of a free surface.

The work is done close to support of RFFI (№ 11-01-00198).

References

1. Khakimzianov G.S., Shokin Yu.I., Barakhnin V.B., Shokina N.Yu. The numerical modeling of liquid flows with surface waves. Novosibirsk: SD RAS, 2001. P. 394.
2. Bautin S.P., Deryabin S.L., Khakimzianov G.S., Sommer A.F. The study of solutions of small water equations in the neighbourhood of a moving cutting line // The calculation technologies: Novosibirsk: 2010. Vol. 15. № 6. P. 19–41.
3. Bautin S.P., Deryabin S.L. The mathematical modeling of ideal gas outflow to vacuum. Novosibirsk: Science, 2005. 390 p.
4. Nigmatullin R.I., Bolotova R.H. The wide-range constitutive equation of water and steam. The building method // Thermal physics of high temperatures, 2008. Vol. 46, № 2. P. 206–218.

6-48

РАВНОВЕСИЕ ТРУБЫ, ЗАПОЛНЕННОЙ ДВИЖУЩЕЙСЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТЬЮ, В ПОЛЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИВ.В. Башуров¹, А.С. Доросев², М.В. Пчелинцев²,
Н.Д. Скоринова², Н.А. Скоркин²¹Трехгорный технологический институт – филиал
Национального исследовательского ядерного университета
МИФИ, Трехгорный, Россия²Снежинский физико-технический институт – филиал
НИЯУ МИФИ, Снежинск, РоссияE-mail: cetm@atlint.ru; n.a.scorkin@rambler.ru,
mvpchelintsev@mail.ru

В работе рассматривается система нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка с краевыми условиями, описывающая равновесие трубы с движущейся по ней вязкой жидкостью. Из первых интегралов системы выводится дифференциальное уравнение первого порядка, допускающее аналитическое решение. Определение констант интегрирования, обеспечивающих выполнение краевых условий, сводится к решению системы нелинейных алгебраических уравнений с избыточным числом неизвестных. Исследование этой системы дает представление о положениях равновесия трубы. Профиль трубы строится численно.

BALANCE OF PIPE, FILLED WITH MOVING VISCOUS LIQUID, IN THE GRAVITY FIELDV.V. Bashurov¹, A.S. Dorosev², M.V. Pchelintsev²,
N.D. Scorinova², N.A. Scorkin²¹Trehkgorny Technological Institute – Branch of National
Nuclear Research University MEFHI²Snezhinsk Institute of Physics and Technology – Branch
of National Research Nuclear University «MEPHI»E-mail: cetm@atlint.ru; n.a.scorkin@rambler.ru;
mvpchelintsev@mail.ru

A set of simultaneous nonlinear differential quadric equations with edge conditions, describing the pipe balance with viscous liquid moving along it, is considered in the given paper. The first order differential equation which admits analytical solution is derived from the first integrals of simultaneous equations set. The constants of integration determination supporting the performance of the edge conditions amounts to solving a set of nonlinear algebraic equations with abundant number of unknown. Investigation of the given set gives an idea of the pipe equilibrium position. The pipe shape is constructed numerically.

6-49

РЕШЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТОДОМ УСРЕДНЕННЫХ КОСИНУСОВ

А.С. Егорова, Н.Г. Карлыханов

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики
им. академ. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

Предложен метод решения кинетического уравнения переноса излучения, основанный на усреднении исходного уравнения по угловой переменной. Для полученных уравнений построены разностные схемы на основе неявных TVD-подходов. Применимость предлагаемого метода исследовалась на решении ряда методических задач.

Ключевые слова: перенос излучения, TVD-подход, одномоментные уравнения переноса с усредненными косинусами.

THE SOLUTION OF KINETIC RADIATIVE TRANSFER EQUATION BY THE METHOD OF AVERAGE COSINES

A.S. Egorova, N.G. Karlykhanov

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

The method of solution of kinetic radiative transfer equation, based on the averaging of the input equation on an angular variable, is offered. For the received equations difference schemes, based on implicit TVD-approaches, were constructed. The applicability of the offered method was researched by the solutions of several methodical problems.

Keywords: radiative transfer, TVD-approaches, the one-moment transfer equations with average cosines.

6-50

ПЕРВОПРИНЦИПНЫЕ РАСЧЕТЫ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ С ГОРЯЧИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

П.А. Жилиев, В.В. Стегайлов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Объединенный институт высоких температур,
Москва, Россия

E-mail: PeterZhilyaev@gmail.com

При воздействии ультракороткого лазерного излучения металл переходит в двухтемпературное (2Т) состояние, в котором температура электронной подсистемы (T_e) на порядки превышает температуры ионов. 2Т стадия является важной для понимания механизмов лазерной абляции, так как на ней происходит передача лазерной энергии ионам и формируется слой прогрева, который определяет дальнейшую динамику системы. Для численного моделирования лазерной абляции необходимы кинетические коэффициенты металла с горячими электронами. Однако, в литературе применяются

феноменологические зависимости, коэффициенты в которых определяются из асимптотик при низких и высоких T_e . Таких недостатков лишены первопринципные методы в которых нет подгоночных параметров. В работе представлен первопринципный расчет коэффициента теплопроводности металла с горячими электронами, вычисленный по формуле Кубо-Гринвуда. Расчет проводится для жидкого алюминия в интервале T_e от 0 до 6 эВ. Полученная зависимость коэффициента теплопроводности от T_e хорошо согласуется с расчетами из кинетического уравнения [1].

Литература

1. Иногамов Н.А., Петров В.Ю. Теплопроводность металлов с горячими электронами // ЖЭТФ. Москва, 2010. Т. 134. № 3. С. 505–529.

AB-INITIO CALCULATIONS OF THE THERMAL CONDUCTIVITY METALS WITH HOT ELECTRONS

P.A. Zhilyaev, V.V. Stegailov

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: PeterZhilyaev@gmail.com

The interaction of ultra-short laser with metal result in the two-temperature (2T) state in which the temperature of the electronic subsystem (T_e) by orders of magnitude greater than the ion temperature. Description of 2T state is important for understanding the mechanisms of laser ablation, since at this stage number of relevant phenomenon occurs: transfer of laser energy to the ions, creation of warm layer which determine the future dynamics of the system. The numerical simulation of laser ablation requires the kinetic coefficients of the metal with hot electrons. However, phenomenological dependencies are mostly used with contains adjustable parameters determined from the asymptotic behavior at low and high T_e . Ab-initio methods don't have such deficiencies, because there are no adjustable coefficient. This paper presents a ab-initio calculation of the thermal conductivity of the metal with hot electrons, calculated from the Kubo-Greenwood formula. The calculation is performed for liquid aluminum in the range of T_e from 0 to 6 eV. The dependence of thermal conductivity is in a good agreement with calculations from kinetic equation [1].

Reference

1. Inogamov N.A., Petrov V.Y. Thermal conductivity of metals with hot electrons // JETP. Moscow, 2010. V. 134. № 3. p. 505–529.

6-51

**АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ
ТИПОВ ИСКУССТВЕННОЙ ДИССИПАЦИИ
В МЕТОДАХ СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
SPH ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ
ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ**

А.Д. Зубов, М.А. Зубов

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики
им. академ. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия
E-mail: adzubov@mail.ru

В докладе приводятся некоторые результаты расчетов газодинамических задач по методу сглаженных частиц SPH (см., напр., [1–3]) с применением различных типов искусственной вязкости и искусственной теплопроводности, используемых обычно в конечно-разностных методах [4–8].

Как и в случае с разностными методами, в численных расчетах по методам, в том числе и по методу SPH, использующим частицы, возникают значительные нефизические осцилляции. Они уменьшаются при увеличении числа частиц, однако последнее увеличивает и время счета. Поэтому приходится прибегать к использованию различного рода псевдовязкостей. Исключение представляет SPH-метод Годуновского типа [2], не требующий искусственной вязкости. В вычислительных SPH-программах общепринятой является форма псевдовязкости, предложенная в [1], однако она не обладает достаточно удовлетворительными свойствами для погашения осцилляции. В нашей работе для SPH-метода применены и проанализированы несколько, предложенных в литературе для конечно-разностных схем, видов псевдовязкости и искусственной теплопроводности (в первую очередь следует отметить недавно предложенную в [7] форму адаптивной искусственной вязкости).

Литература

1. Monaghan J.J.. Particle methods for hydrodynamics. / J. Comput. Phys. Rep., 1985, v. 3. – P. 71–124.
2. Зубов А.Д., Соколовская В.Л. Об одном варианте SPH-метода частиц на основе задачи Римана / Препринт СГФТА № 1/2002, Снежинск, 2002, 15 с.
3. Зубов А.Д., Лебедев А.М. Метод сглаженных частиц SPH для расчетов газодинамических задач со сферической и цилиндрической симметриями / ВАНТ, сер. «Матем. модел. физич. процессов», 2009, вып. 1, с. 19–28.
4. J. von Neumann, Richtmyer R.D. A method for numerical calculation of hydrodynamics shocks / J. Appl. Phys., v. 21, 1950. – P. 232–257.
5. Самарский А.А., Арсенин В.Я. О численном решении уравнений газодинамики с различными типами вязкости. / ЖВМиМФ, т. 1, 1961.
6. Куропатенко В.Ф. Метод построения разностных схем для численного интегрирования уравнений газодинамики / Изв. вузов, сер. Математика, 1962, № 3, с. 75–83.
7. Попов И.В., Фрязинов И.В. Конечно-разностный метод решения уравнений газовой динамики с введением адаптивной искусственной вязкости / Матем. моделирование, 2008, т. 20, № 8, с. 48–60.
8. Noh W.F. Errors for calculations of strong shocks using an artificial viscosity and an artificial heat flux / J. of Comput. Phys., 1978, v. 72. – P. 78–120.

**THE ANALYSIS OF USE OF VARIOUS TYPES
ARTIFICIAL DISSIPATION IN METHODS
OF SMOOTHED PARTICLES SPH FOR THE
NUMERICAL SOLUTION OF GAS-DYNAMIC
PROBLEMS**

A.D. Zubov, M.A. Zubov

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

The paper presents some calculations which were done with the method of Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) (see, for example, [1–3]) with different types of artificial viscosity and heat conductivity which are usually used in finite-difference methods [4–8].

Considerable non-physical oscillations arise both in finite-difference calculations and in calculations with methods which use particles such as SPH does. They decrease as the number of particles increases, but this also increases calculation time. It is therefore becomes necessary to use different types of pseudo-viscosity. The only exception is Godunov's type SPH [2] where artificial viscosity is not required. SPH codes usually implement the pseudo-viscosity offered in [1], but it is not strong enough to suppress oscillations. Several types of pseudo-viscosity and artificial heat conductivity proposed for finite-difference schemes are applied and analyzed (first of all the additive artificial viscosity proposed recently in [7]).

References

1. Monaghan J.J. Particle methods for hydrodynamics / J. Comput. Phys. Rep., 1985, v. 3. – P. 71–124.
2. Zubov A.D., Sokolovskaya V.L. About one variant of a SPH-method of particles on the basis of Riemann problem / Preprint MEFPhI (Moscow Engineering and Physical Institute), № 1/2002, Snezhinsk, Russia, 2002, 15 p. (In Russian).
3. Zubov A.D., Lebedev A.M. A method of smoothed particles SPH for calculations of a gas-dynamic problems with spherical and cylindrical symmetries / VANT, ser. Mathem. model, of phys. proa, 2009, N. 1, p. 19–28. (In Russian).
4. Neumann J. von, Richtmyer R.D. A method for numerical calculation of hydrodynamics shocks. / J. Appl. Phys., V. 21, 1950. – P. 232–257.
5. Samarsky A.A., Arsenin V.Ya. About the numerical solution of the gas-dynamic equations with various types of viscosity / J. Comp. Math, and Math. Phys., t. 1, 196L (In Russian).
6. Kurapatenko V.F. A construction method difference schemes for numerical integration of the gas-dynamic equations / Izvestiya VUZov, ser. Matematika, 1962, № 3, p. 75–83. (In Russian).
7. Popov I.V., Fryazinov I.V. Finite-difference method for computation of the gas dynamics equations with artificial viscosity / Mathem. Modelling, 2008, v. 20, № 8, p. 48–60. (In Russian).
8. Noh W.F.. Errors for calculations of strong shocks using an artificial viscosity and an artificial heat flux. / J. of Comput. Phys., 1978, v.72. – P. 78–120.

6-52

**ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ
МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СРЕД
В КОЛЬЦЕВЫХ СОПЛАХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ**

А.Л. Карташев, М.А. Карташева

Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

В современных ракетных двигателях на твердом топливе нашли широкое применение металлизированные ракетные топлива. В этом случае течение продуктов сгорания в сопле ракетного двигателя представляет собой течение многокомпонентной среды. Различие в траекториях движения газа и частиц конденсированной фазы, связанное с инерционностью частиц, вызывает их осаждение на поверхности сопла, приводящее к потерям удельного импульса тяги вследствие передачи (частично или полностью) импульса частиц стенкам сопла (в дальнейшем «импульса осаждения частиц»).

Течение многокомпонентной среды в кольцевом сопле приводит к осаждению частиц конденсированной фазы на стенки сопла: внешнюю обечайку и центральное тело. Определение потерь тяги вследствие осаждения частиц представляет собой одну из основных задач исследования газодинамики многокомпонентных течений в кольцевых соплах.

Проведено математическое моделирование течения многокомпонентных сред в кольцевых соплах. Получены значения величины импульса осаждения частиц конденсированной фазы на центральное тело и внешнюю обечайку кольцевого сопла. Исследованы траектории движения частиц полидисперсной конденсированной фазы в условиях различных геометрических конфигураций кольцевых сопел. Форма траекторий частиц конденсированной фазы в многокомпонентном потоке существенно зависит от размера частиц. Предельные траектории частиц, определяющие место их выпадения на стенки сопла, таковы, что каждая фракция имеет свою область осаждения.

Частицы конденсированной фазы оказывают эрозионное воздействие на конструкционные материалы сопла, минимальный размер фракции, начинающей оказывать заметное разрушающее воздействие составляет $\sim 0,5 \div 1$ мкм. Одним из возможных способов снижения разрушающего воздействия конденсированной фазы на поверхности сопла является управление движением конденсированной фазы. В качестве способа управления движением конденсированной фазы рассмотрена закрутка многофазного потока, истекающего из кольцевого сопла внешнего расширения. Проведено математическое моделирование движения многофазного потока, закрученного относительно оси сопла. По результатам исследований предложен способ улучшения тягово-импульсных характеристик кольцевых сопел, позволяющий значительно снизить потери импульса из-за осаждения частиц и расширить области применения кольцевых сопел, в которых в качестве рабочего тела используются многокомпонентные продукты сгорания ракетного топлива.

**RESEARCHES OF FLOWS
OF MULTICOMPONENT MEDIUMS
IN AN ANNULAR NOZZLES OF AIRCRAFTS**

A.L. Kartashev, M.A. Kartasheva

South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: al_kartashev@mail.ru

In modern rocket engines on solid propellant have found broad application of metallized rocket propellants. In this case flow of combustion products in a rocket engine nozzle represents flow of multicomponent medium. Distinction in trajectories of motion of gas and particles of a condensed phase, bound with a sluggishness of particles, calls their precipitation on a surface of a nozzle, resulting in to losses of specific impulse of thrust owing to transfer (partially or completely) impulse of particles to walls of a nozzle (hereinafter «of an impulse of a deposition of particles»).

The flow of multicomponent medium in an annular nozzle results in a deposition of particles of a condensed phase on walls of a nozzle: external cover and centerbody. The definition of losses of thrust owing to a deposition of particles represents one of primal problems of research of a gasdynamics of multicomponent flows in an annular nozzles.

The mathematical modelling of flow of multicomponent mediums in an annular nozzles is conducted. The values of quantity of an impulse of a precipitation of particles of a condensed phase on a centerbody and outer cowling of annular nozzle are obtained. The trajectories of a motion of particles of a polydisperse condensed phase in requirements of different geometrical configurations of annular nozzles are explored. The shape of trajectories of particles of a condensed phase in a multicomponent stream essentially depends on the size of particles. The boundary trajectories of particles, defining place of their dropout on walls of a nozzle, are those, that each fraction has the field of a precipitation.

The particles of a condensed phase render erosive action on constructional material of a nozzle, the minimum size of a fraction initial to render noticeable destructive effect makes $\sim 0.5 \div 1$ micron. One of possible method of a decrease of destructive effect of a condensed phase on a surface of a nozzle is the traffic control of a condensed phase. As an method of a traffic control of a condensed phase the swirl of a polyphase flow elapsing from an annular nozzle of external expansion is considered. The mathematical modelling of a motion of a polyphase flow, swirling relatively an axis of a nozzle is conducted. By results of researches the method of improving of thrust-pulse characteristic of annular nozzles permitting considerably to reduce losses of an impulse because of a precipitation of particles and to expand areas of application of annular nozzles, in which one as a propulsive mass the multicomponent combustion products of a propellant will be used, is proposed.

6-53

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО
КОЛЬЦЕВОГО СОПЛА ЛЕТАТЕЛЬНОГО
АППАРАТА С МНОГОКОМПОНЕНТНЫМ
РАБОЧИМ ТЕЛОМ**

С.Д. Ваулин, А.Л. Карташев, М.А. Карташева

Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

E-mail: al_kartashev@mail.ru

Рассматривается задача построения оптимальной (обеспечивающей максимальное значение тяги) конфигурации кольцевого сопла с многокомпонентным рабочим телом. Поиск оптимальной конфигурации кольцевого сопла проводится путем решения вариационной задачи с применением прямых методов вариационного исчисления.

Рассматриваемая вариационная задача, при постановке которой в число оптимизируемых параметров включаются геометрические характеристики сопла, сводится к задаче нелинейного программирования. Основными элементами данного подхода являются прямые расчеты поля течения и метод поиска экстремума функций многих переменных, что делает его применимым ко всем газодинамическим задачам, для которых известны методы расчета поля течения, в том числе и для кольцевых сопел с многокомпонентными потоками.

Процедура оптимизации геометрической конфигурации кольцевого сопла представляет собой сочетание аналитических методов построения оптимизируемого функционала и задания геометрического профиля кольцевого сопла, с методами поиска экстремума целевой функции, являющейся функцией нескольких переменных, и прямыми расчетами поля течения с помощью численных методов.

В настоящей работе такой подход применен для поиска оптимальных кольцевых сопел различных конфигураций с многокомпонентным рабочим телом, проектируемых в условиях жестких габаритных ограничений. Основное внимание уделено задаче построения оптимальной конфигурации кольцевого сопла внешнего расширения с укороченным центральным телом, реализующего максимальную тягу при заданных ограничениях на геометрические характеристики сопла.

В результате решения поставленных вариационных задач и проведенной с помощью прямого метода оптимизации геометрии кольцевых сопел построены оптимальные конфигурации кольцевых сопел с многофазным полидисперсным рабочим телом при заданных геометрических параметрах кольцевого сопла и параметрах многофазной смеси. Проведено сравнение оптимальных по тяге кольцевых сопел с многофазным рабочим телом с оптимальными для чистого газа кольцевыми соплами. Построены оптимальные кольцевые сопла для смеси газа и полидисперсного конденсата при различных условиях, ограничивающих осаждение частиц конденсированной фазы на стенки сопла. Построено оптимальное по тяге кольцевое сопло с многофазным рабочим телом при ограничениях, задаваемых с помощью барьерных функций.

**DESIGNING OF THE OPTIMUM
ANNULAR NOZZLE OF AIRCRAFT WITH
MULTICOMPONENT WORKING MEDIUM**

S.D. Vaulin, A.L. Kartashev, M.A. Kartasheva

South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia

E-mail: al_kartashev@mail.ru

The problem of construction optimum (providing the maximal value of propulsion) configurations of annular nozzle with a multicomponent working medium is considered. Search of an optimum configuration of annular nozzle is carried out by the decision of a variation task with application of direct methods of calculus of variations.

The considered variation task at which statement the number of optimized parameters includes geometrical characteristics of nozzle, is reduced to a task of nonlinear programming. Basic elements of the given approach are direct calculations of a field of flow and a method of search of an extremum of functions of many variables that makes its applicable to all gas-dynamic problems for which methods of calculation of a field of flow including for annular nozzle with multicomponent flows are known.

Procedure of optimization of a geometrical configuration of annular nozzle represents a combination of analytical methods of construction optimized functional and definition of a geometrical profile of annular nozzle, with methods of search of an extremum of the criterion function being function of several variables, and direct calculations of a field of flow with the help of numerical methods.

In the present work, such approach is applied for search optimum of annular nozzles of various configurations with a multicomponent working medium, projected in conditions of rigid dimensional restrictions. The basic attention is given to a problem of construction of an optimum configuration of annular nozzle of external expansion with the short central body, realizing the maximal propulsion at the set restrictions on geometrical characteristics of nozzle.

As a result of the decision of the put variation tasks and carried out with the help of a direct method of optimization of geometry of annular nozzles optimum configurations annular nozzles with a multiphase polydisperse working medium at the set geometrical parameters annular nozzle and parameters of a multi-phase mix are constructed. Comparison optimum on propulsion annular nozzle with a multiphase working medium with optimum annular nozzle for pure gas is carried out. The optimum annular nozzles for a mix of gas and a polydisperse condensate under the various conditions limiting precipitation of particles of the condensed phase on walls of nozzle are constructed. The optimum on propulsion annular nozzle with a multiphase working medium at the restrictions set with the help of barrier functions is constructed.

6-54

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ
И КОМБИНИРОВАННОГО
МИКРОРАЗРУШЕНИЯ ТЕРМОУПРУГОВЯЗКО-
ПЛАСТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ**

Д.К. Ильницкий¹, А.Б. Киселев²

¹ВНИИА им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: denisilnitskiy@gmail.com

Приведены результаты численного моделирования процесса соударения пластин, а также разгона и разрушения оболочек, нагружаемых детонацией сферического слоя взрывчатого вещества. Показано, что применение модели термоупруговязкопластической среды с двумя параметрами поврежденности позволяет описать основные особенности экспериментальных результатов.

**MATHEMATICAL MODELLING
OF DYNAMICAL DEFORMING AND
COMBINED MICROFRACTURE OF
THERMOELASTOVISCOPLASTIC MEDIUM**

D.C. Ilnitskiy¹, A.B. Kiselev²

All-Russia Research Institute of Automatics (VNIIA),
Moscow, Russia

Mechanics and Mathematics Faculty of Moscow
M.V. Lomonosov State University, Moscow, Russia

E-mail: denisilnitskiy@gmail.com

Thermomechanical processes, which proceed in deformable solids under intensive dynamic loading, consist of mechanical, thermal and structural ones, which correlate themselves. The structural processes involve the formation, motion and interaction of defects in metallic crystals, phase transitions, the breaking of bonds between molecules in polymers, the accumulation of microstructural damages (pores, cracks), etc. Irreversible deformations, zones of adiabatic shear and microfractures are caused by these processes.

Dynamic fracture is a complicated multistage process including an appearance, evolution and confluence of microdefects and a formation of embryonic microcracks, pores their grow up to the break-up of a bodies with division into separate parts.

The present work include new results in the next scopes:

1) development the thermodynamically correct mathematical models of damageable thermoelastoviscoplastic medium (microfracture);

2) development the methods for determination of «non-standart» constants of medium models, connected with microfracture of material;

3) numerical simulation of destruction (fragmentation) of constructions (macrofracture);

4) numerical investigation of some problems for damageable solids and structures (plates collision, spherical shells acceleration and fracture under explosive loading).

6-55

**РАВНОВЕСИЕ ТРУБЫ, ЗАПОЛНЕННОЙ
ДВИЖУЩЕЙСЯ ИДЕАЛЬНОЙ
ЖИДКОСТЬЮ, В ПОЛЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ**

В.В. Башуров¹, Д.А. Кошутин², З.Ю. Матвеевко²,
М.В. Пчелинцев², Н.А. Скоркин²

¹Трехгорный технологический институт – филиал
Национального исследовательского ядерного университета
«МИФИ» Трехгорный, Россия

²Снежинский физико-технический институт – филиал
«МИФИ», Снежинск, Россия

E-mail: cetm@atlint.ru; n.a.scorkin@rambler.ru;
mvpchelintsev@mail.ru

В работе рассматривается система нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка с краевыми условиями, описывающая равновесие трубы с движущейся по ней вязкой жидкостью. Из первых интегралов системы выводится дифференциальное уравнение первого порядка, допускающее аналитическое решение. Определение констант интегрирования, обеспечивающих выполнение краевых условий, сводится к решению системы нелинейных алгебраических уравнений с избыточным числом неизвестных. Исследование этой системы дает представление о положениях равновесия трубы. Профиль трубы строится численно.

**BALANCE OF PIPE, FILLED WITH MOVING
IDEAL LIQUID, IN THE GRAVITY FIELD**

V.V. Bashurov¹, D.A. Coshutin², Z.U. Matveenko²,
M.V. Pchelintsev², N.A. Scorkin²

¹Trehkgorny Technological Institute – Branch of National
Nuclear Research University MEPHI

²Snezhinsk Institute of Physics and Technology – Branch
of National Research Nuclear University «MEPhI»

E-mail: cetm@atlint.ru

A set of simultaneous nonlinear differential quadric equations with edge conditions, describing the pipe balance with ideal liquid moving along it, is considered in the given paper. The problem admits analytical solution. The constants of integration determination supporting the performance of the edge conditions amounts to solving a set of nonlinear algebraic equations. Complete investigation of the given set gives a comprehensive idea of the pipe equilibrium position.

6-56

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯВЛЕНИЙ
ВЫСОКОСКОРОСТНОГО УДАРА И ВЗРЫВА
В СКАЛЬНОМ ГРУНТЕ**

А.В. Городничев, А.Г. Иоилев, А.А. Краюхин

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

В работе приведены результаты численного моделирования явлений высокоскоростного удара и взрыва

в скальном грунте с помощью программного комплекса ЭГАК [1]. Для описания деформирования и разрушения скального грунта использовалась обобщенная квазиупругопластическая (ОКУП) модель [2]. Эта модель была разработана и широко применялась в ЦФТИ МО РФ для моделирования механического действия взрыва на скальный грунт. Для возможности численного моделирования обоих явлений (удара и взрыва) при определении среднего размера фрагментов после сдвигового разрушения вместо использовавшейся в исходной формулировке ОКУП модели эмпирической формулы в данной работе применялась модель хрупкого откола Грейди [3], в которой этот параметр зависит только от скорости деформации среды. Также без потери функциональности ОКУП модели мы использовали более простой подход для описания откольного разрушения. Для сравнения с результатами численного моделирования были выбраны данные, полученные при проведении камуфлетных ядерных взрывов в гранитных массивах [4] (эксперименты Hardhat, Shoal, Pile Driver, Hoggar), опытов со взрывами небольших зарядов ВВ в граните [5] и экспериментов по высокоскоростному прониканию компактных ударников в мишени из гранита [6]. Результаты расчетов показали хорошее согласие со всем объемом опытных данных.

Литература

1. Янилкин Ю.В. и др. Комплекс программ ЭГАК++ для моделирования на адаптивно-встраиваемой дробной счетной сетке // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов, 2003. Вып.1. С. 20–28.
2. Замышляев Б.В., Евтерев Л.С. Модели динамического деформирования и разрушения грунтовых сред. М.: Наука, 1990.
3. Grady D.E. The spall strength of condensed matter // J. Mech. Phys. Solids, 1988. Vol.36. P. 353–384.
4. Simulation of an underground explosion in granite: Preprint / LLNL; Antoun T.H., Vorobiev O.Y., Lomov I.N., Glenn L.A.; UCRL-JC-134523 Rev.1. Livermore, 1999. [Электронный ресурс: <http://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/235748.pdf>].
5. Ляхов Г.М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах. М.: Недра, 1976.
6. Ai H.A., Ahrens T.J. Simulation of dynamic response of granite: A numerical approach of shock-induced damage beneath impact craters // Int. J. Impact Engng., 2006. Vol. 33. P. 110.

NUMERICAL SIMULATION OF HIGH-SPEED IMPACT AND BURST IN ROCKY GROUND

A.V. Gorodnichev, A.G. Ioylev, A.A. Krayukhin

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

The paper presents the results of numerical simulation of high-speed impact and burst in rocky ground using the EGAK program complex [1]. Generalized quasi-elastic-plastic model (OKUP) [2] was used for the description of ground rock damage and fracture. This very model was developed in CFTI, RF Ministry of Defense, and has been widely used for the simulation of mechanical impact of a blast on rocky ground. To provide the possibility of numerical simulation of both phenomena (impact and burst), when determining the mean size of fragments

after shear fracture, in this work we used Grady's model of brittle spallation [3] (instead of the empirical formula in the source OKUP formulation), in which the mentioned parameter depends on the strain rate of the medium. Without any loss of the OKUP model capability, we used a simpler approach to describe spallation. We chose the data obtained at camouflet nuclear blasting of granite monolith [4] (Hardhat, Shoal, Pile Driver, Hoggar experiments), at minor bomb blasting in granite [5] and at experiments on high-speed intrusion of compact piston into granite targets [6] for the comparison with our simulation results. The simulations agree well with all experimental data.

References

1. Yanilkin Yu.V. et al. EGAK++ program complex for simulations on adaptively embeddable refined grids // Voprosy atomnoy nauki i tehniki. Series Mathematical simulation of physical processes, 2003. Issue 1. P. 20–28.
2. Zamyshlyayev B.V., Evtrev L.S. Models of subterranean dynamic deformation and fracture. M.: Nauka, 1990.
3. Grady D.E. The spall strength of condensed matter // J. Mech. Phys. Solids, 1988. Vol. 36. P. 353–384.
4. Simulation of an underground explosion in granite: Preprint / LLNL; Antoun T.H., Vorobiev O.Y., Lomov I.N., Glenn L.A.; UCRL-JC-134523 Rev.1. Livermore, 1999. [Internet resource: <http://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/235748.pdf>].
5. Lyakhov G.M. Fundamentals of shock wave dynamics in ground and rock. M.: Nedra, 1976.
6. Ai H.A., Ahrens T.J. Simulation of dynamic response of granite: A numerical approach of shock-induced damage beneath impact craters // Int. J. Impact Engng., 2006. Vol. 33. P. 110.

6-57

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РАССМОТРЕНИЕ РАЗВИТИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ ПЛОТНОСТИ, В СХОДЯЩЕЙСЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ

К.Е. Городничев

ВНИИА им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

E-mail: vniiia@vniia.ru

Поверхность с благоприятным направлением ускорения, тоже может быть неустойчивой, если сама она сокращается [1], поэтому наличие начальных возмущений на поверхности сферической оболочки приводит к их росту при ее сжатии. В работе рассмотрено влияние начальных возмущений плотности (возмущение давления отсутствует) в оболочке на процесс ее сферического сжатия. Из-за наличия ускорения, направленного в центр оболочки, эта неоднородность приводит к появлению поверхностных колебаний, подобных гравитационным волнам, распространяющимся по поверхности жидкости в поле силы тяжести.

В данной работе система гидродинамических уравнений решалась с использованием прямого и обратного преобразования Лапласа. В результате проведена оценка амплитуды возникающих колебаний, для ускорения 10^{12} м/с² и начального возмущения плотности равного 1% получается значение порядка 2 мкм. Далее, используя связь между амплитудой поверхностных колебаний

сферической оболочки и ее радиусом, приведенную в [1], можно оценить темпы роста поверхностных неоднородностей.

Литература

1. Заббахин Е.И. Некоторые вопросы газодинамики взрыва // Снежинск, 1997.

ANALYTICAL CONSIDERATION OF INHOMOGENEITIES EVOLUTION IN COLLAPSING SPHERE SHELL

K.E. Gorodnichev

FSUE All-Russia Research Institute of Automatics (VNIA),
Moscow, Russia

E-mail: vniia@vniia.ru

Surface with profitable direction of acceleration can be unstable, if it reduces [1], therefore existence of initial non-uniformities on the surface of spherical shell results in its rise when shell collapses. In this work influence of initial density non-uniformities in shell on the process of its spherical compression is considered. Inhomogeneities result in appearance of surface oscillations similar gravitational waves propagating on the surface of liquid in the gravity field, since there is acceleration directed to the centre of shell in the system.

Laplace transforms is used for solution of the system of hydrodynamics equations in this work. In result magnitude of surface oscillation is estimated. For acceleration rate 10^{12} m/s² and initial density non-uniformities about 1% magnitude is about 2 μ m. Further, using formula cited in [1], we can evaluate growth of surface inhomogeneities.

References

1. Zababakhin E.I. Some questions about fluid dynamics of explosion // Snezhinsk (in Russian), 1997.

6-58

ЯВНЫЕ И НЕЯВНЫЕ РАЗНОСТНЫЕ СХЕМЫ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ

Н.Я. Моисеев

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Заббахина,
Снежинск, Россия

E-mail: nyamoiseyev@vniitf.ru

Рассматривается подход к построению явных и неявных разностных схем предиктор-корректор повышенной точности для решения линейных уравнений переноса с постоянными коэффициентами методом Годунова с антидиффузией. На основе теоремы Годунова о монотонных схемах построена новая функция-ограничитель антидиффузионных потоков. Повышение точности в неявных разностных схемах достигается за счет выбора шага интегрирования по времени для вычисления численных потоков по безусловно устойчивой неявной схеме. На гладких решениях уравнений переноса с постоянными коэффициентами схема имеет второй порядок

точности. Разностные неявные схемы для многомерных уравнений переноса построены на основе методов Годунова и расщепления по пространственным переменным. Приведены сравнения численных и точных решений уравнений переноса, а также уравнений переноса излучения в вакууме. Результаты сравнений подтверждают эффективность подхода и повышение точности в явных и неявных схемах предиктор-корректор.

HIGH-ORDER ACCURATE EXPLICIT AND IMPLICIT DIFFERENCE SCHEMES FOR SOLVING LINEAR ADVECTION EQUATIONS

N.Ya. Moiseev

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

E-mail: nyamoiseyev@vniitf.ru

An approach to the construction of high-order accurate explicit and implicit difference schemes predictor-corrector for solving linear equations with constant coefficients by Godunov's method with antidiffusion is proposed. Godunov's theorem on monotone schemes is used to construct a new antidiffusion flux limiter in high-order accurate difference schemes. The smooth solutions of advection equations with constant coefficients, the scheme is second order accurate. Implicit difference schemes for multidimensional advection equations are constructed on the basis of Godunov's method with splitting over spatial variables. The numerical solutions obtained for advection equations and the radiative transfer equations in a vacuum are compared with their exact solutions. The comparison results confirm that the approach is efficient and that the accuracy of the explicit and implicit predictor-corrector schemes is improved.

6-59

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ ВАНАДИЯ

Н.В. Савельева^{1, 2}, Ю.В. Баяндин^{2, 1}, О.Б. Наймарк^{2, 1}

¹Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

²Институт механики сплошных сред УрО РАН,
Пермь, Россия

В работе численно исследуется процесс откольного разрушения ванадия. Наиболее часто используемым экспериментальным методом исследования откола является эксперимент по высокоскоростному соударению двух пластин [1]. В ходе эксперимента проводится регистрация волнового профиля. Данные о структуре и эволюции волновых профилей ударного сжатия содержат информацию о динамике протекающих в веществе релаксационных процессов. На основе этих данных проводится процедура верификации математических моделей, разрабатываемых для описания деформирования и разрушения материалов при ударно-волновом нагружении.

Основой большинства моделей поведения металлов при различных видах нагружения является теория

описания изменения внутренней структуры. В данной работе моделирование явления откола проводится на основе структурно-кинетической модели, полученной на основе статистико-термодинамического подхода и описывающей различные стадии эволюции дефектов – дисперсное накопление мезоскопических дефектов, локализацию разрушения, влияние на релаксационные свойства [2]. В рамках данного подхода неупругое деформирование трактуется как процесс эволюции микротрещин, микросдвигов, включающий зарождение, рост и взаимодействие мезодефектов. Модель включает две структурные переменные: тензор плотности дефектов и параметр структурного скейлинга, зависящий от отношения двух структурных масштабов: характерного размера дефектов и расстояния между ними [3].

Математическая постановка была записана в приближении плоского удара. Уравнения описывают кинетику структурных (тензор плотности дефектов, параметр структурного скейлинга), кинематических (тензоры упругих и пластических скоростей деформации) и силовых переменных. На поверхности соударения был задан входящий трапециевидный импульс. Система уравнений решалась методом конечных разностей, основанном на многошаговом методе интегрирования по времени с автоматическим выбором шага (метод прогноза-коррекции) [4].

В результате решения сформулированной задачи были построены профили скорости свободной поверхности для образца ванадия. Полученные профили отражают стадийность процесса развития разрушения, его связь с релаксационными свойствами. Анализ профилей скоростей свободной поверхности и сопоставление с данными регистрации с использованием системы VISAR показал, что модель описывает особенности откольного разрушения ванадия.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 11-01-96005-р_урал_а, № 11-05-96005-р_урал_а, № 11-01-96010-р_урал_а, № 11-01-00712-а).

Литература

1. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин Л.В., Фортон В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах / М.: «Янус-К», 1996. 408 с.
2. Наймарк О.Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения // Физическая мезомеханика, 2003. Т. 6. № 4. С. 45–72.
3. Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б., Уваров С.В. Численное моделирование откола, индуцированного мезодефектами при ударно-волновом нагружении металлов // Вычислительная механика сплошных сред, 2010. Т. 3. № 1. С. 13–23.
4. Мэтьюз Д.Г., Финк К.Д. Численные методы. Использование MATLAB, 3-е изд.: пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. 702 с.

NUMERICAL SIMULATION OF SPALL FRACTURE IN VANADIUM

N.V. Savelieva^{1,2}, Yu.V. Bayandin^{2,1}, O.B. Naimark^{2,1}

¹State National Research Politechnical University of Perm, Perm, Russia

²Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia

In this paper, the process of spall fracture in vanadium is modeled numerically. The experimental method commonly used to investigate spallation is that of high-velocity collision of two plates [1]. The wave profile records measured during experiments provide data on the structure and evolution of the wave profiles, which allow us to gain insight into the dynamics of the relaxation processes occurring in the substance. These data are used to verify the mathematical models, which have been developed to describe deformation and failure of materials under shock-wave loading.

Most of the models of material behavior under different types of loading conditions is based on the theory, which describes variation in the internal structure. In this paper, the process of spall fracture is simulated in the framework of the structural-kinetic model developed on the basis of the statistical-thermodynamic approach. It is used to describe different stages of the defect evolution- disperse accumulation of mesoscopic defects, fracture localization, and their influence on the relaxation properties [2]. In the framework of the applied approach the inelastic deformation is interpreted as the process of evolution of microcracks and microshears involving the stages of nucleation growth and interaction of meso-defects. The model includes two structural variables-tensor of defect density and structural scaling parameter, which depends on the ratio of two structural scales, namely, on the ratio of the characteristic defect dimensions to the interdefect space [3].

The problem is formulated mathematically in terms of the plane shock wave approximation. The equations describe the kinetics of structural (tensor of the defect density, structural scaling parameter), kinematic (tensors of elastic and plastic strain rates) and force variables. A trapezoidal input shock pulse is applied to the collision surface. The system of equations is solved by the finite difference method based on the multi-step time integration with automatic choice of the step size (the predictor-corrector method) [4].

Solution of the stated problem allowed us to construct the velocity profiles of the free surface for the vanadium specimen. The obtained profiles reflect the stage nature of the fracture process and its relation with the relaxation properties. The analysis of the velocity profiles of the free surface and their comparison with the data recorded with the use of VISAR system have shown that the model adequately describes the specific features of spall fracture in vanadium.

The study is supported by RFBR (under grants № 11-01-96005-р_урал_а, № 11-05-96005-р_урал_а, № 11-01-96010-р_урал_а, № 11-01-00712-а).

References

1. Kanel G.I., Rozorenov S.V., Utkin L.V., Fortov V.E. Shock-wave effects in condensed media / М.: «Yanus-K», 1996. P. 408.
2. Naimark O.B. Collective properties of the defect ensemble and some non-linear problems of plasticity and fracture // Physical mesomechanics, 2003. V. 6. № 4. P. 45–72.
3. Bayandin Yu.V., Naimark O.B., Uvarov S.V. Numerical simulation of spall fracture, induced by mesodefekt in metals under shock wave loading // Computational continuum mechanics, 2010. V. 3. № 1. P. 13–23.
4. Metuev D.G., Fink C.D. Numerical methods. The use of MATLAB, 3-d-edition, translated from English. – М.: «Williams» publishers, 2001. P. 702.

6-60

МЕТОД РАЗДЕЛЕНИЯ ПО ФИЗИЧЕСКИМ ПРОЦЕССАМ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

А.А. Серёжкин

ВНИИА им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

Рассматриваются задачи динамического деформирования и разрушения твердых тел в двумерной постановке. Для их численного решения используется метод разделения по физическим процессам, включающий в себя два этапа, описывающих, соответственно, гидродинамические и упругопластические процессы [1]. Моделирование гидродинамических процессов осуществляется с помощью метода конечного объема, для аппроксимации численных потоков используется метод С. К. Годунова с точным или приближенным решением задачи Римана [2]. Для описания процессов упругопластического деформирования используются модели Пэжины и Прандтля-Рейса [3, 4]. В качестве уравнений состояния рассмотрены двучленное уравнение состояния, Ми-Грюнайзена и «логарифмическое» уравнение состояния твердого тела [5]. Вычисления ведутся на подвижных адаптивных расчетных сетках [2]. На основе данных принципов создан вычислительный комплекс под названием «ТИС». Проведена валидация и верификация комплекса на двумерных задачах гидродинамики и упругопластики.

Литература

1. Роч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980.
2. Численное решение многомерных задач газовой динамики. / Под ред. С. К. Годунова. М.: Наука, 1976. 400 с.
3. Киселев А.Б., Юмашев М.В. Деформирование и разрушение при ударном нагружении. Модель повреждаемой термоупругопластической среды // ПМТФ. 1990, №5, с. 116–123.
4. Киселев А.Б., Математическое моделирование динамического деформирования и комбинированного микро-разрушения термоупруговязкопластической среды // Вестн. Моск. ун-та Матем. Механ., 1998, № 6, с. 32–40.
5. Куликовский А.Г., Погорелов Н.В., Семенов А.Ю. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений. М.: Физматлит, 2001.

METHOD OF SEPARATING PHYSICAL PROCESSES FOR MODELING OF DEFORMATION AND FRACTURE OF SOLIDS

А.А. Серёжкин

Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: LyzhnikAS@yandex.u

To solve the problems of the mechanics of deformation and fracture of solids is proposed a method of separating physical processes. We consider the problem in the hydrodynamic and elasto-plastic approximations. For the simulation of elastoplastic deformation, the models of Prandtl-Reuss and model of Sokolovsky-Perzina are used. As the equations of state used the equation of state of MieGruneisen and equation of state of solids. The calculations are carried out on two-dimensional Euler dynamically adaptive grids.

6-61

КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ТРЕНЕР ДЛЯ МАССОВО-ПАРАЛЛЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОМЕРНЫХ ЗАДАЧ ПЕРЕНОСА НЕЙТРОНОВ

С.Б. Серов

Независимый разработчик, Снежинск, Россия

E-mail: sbserov@yandex.ru

В последнее время стала особенно актуальной задача моделирования переноса нейтронов в 3D кинетической постановке. Данная модель переноса оказывается существенно более точной по сравнению с различными приближенными моделями меньшей размерности. Не случайно, что в последнее время получило усиленное развитие численное моделирование переноса частиц различного сорта на основе метода Монте-Карло. Соответствующие программы обычно называют реперными. Одной из альтернативных возможностей для решения кинетического уравнения является метод дискретных ординат или DS_n-метод [1]. Он относится к детерминистским конечно-разностным методикам.

В данном докладе представлено краткое описание комплекса программ ТРЕНЕР [2], предназначенного для массово-параллельного моделирования многомерных задач переноса нейтронов. Приведены результаты расчетов пяти задач, имеющих отношение к оценке критпараметров α и $K_{эф}$ ядерных реакторов различных типов.

TRENER MASSIVELY PARALLEL DETERMINISTIC MULTIDIMENSIONAL NEUTRON TRANSPORT CODE SYSTEM

S.B. Serov

Independent developer, Snezhinsk, Russia

E-mail: sbserov@yandex.ru

Recently the problem of neutron transport modeling in 3D kinetic statement has especially become actual. Given model of transport is essential more precise in comparison

with different approximate models of lesser dimensionality. Definitely, that lately Monte Carlo computational modeling of neutron transport for particles of different kinds has intensively developed. Corresponding codes usually are called frame. One of the alternative possibilities for neutron kinetic equation solving is a method of discrete ordinates or DS_n-method. It is related to deterministic finite differences ones.

In this paper one is represented a concise description of TRENTER code system, which is destined for massively parallel modeling of multidimensional neutron transport problems. It is given results of computations for 5 problems dealing with estimating of critical parameters α and K_{eff} of different types nuclear reactors.

For the heat equation the relationship between various parameters of the equation are examined and the series of exact solutions are constructed. Also an initial boundary value problem for this equation is solved. The conditions are found under which the nonlinear heat equation is identically satisfied for a subset of solutions specially constructed first order PDE.

Boundary problem posed by LG Loitsyanskii for stream function equation in the boundary layer is solved.

This work was supported by the Program for Fundamental Researches, which is implemented at Presidium of the RAS «Fundamental problems of nonlinear dynamics in the mathematical and physical sciences» and the UB RAS (project 12-П-1-1009).

6-62

РЕШЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

О.Н. Ульянов, Л.И. Рубина

Институт математики и механики УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

E-mail: secretary@imm.uran.ru; rli@imm.uran.ru

Ранее предложенным геометрическим методом исследуются нелинейные уравнения в частных производных: уравнение теплопроводности, описывающее режимы с обострением, и уравнение для функции тока в пограничном слое.

Для уравнения теплопроводности рассмотрены различные зависимости между параметрами уравнения и построена серия точных решений. Решена одна начально-краевая задача. Найдены и изучены условия, при выполнении которых рассматриваемому нелинейному уравнению тождественно удовлетворяет некоторое подмножество решений специальным образом построенного уравнения в частных производных первого порядка.

Для уравнения для функции тока в пограничном слое решена краевая задача, поставленная Л.Г. Лойцяным.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные проблемы нелинейной динамики в математических и физических науках» (проект 12-П-1-1009) при поддержке УрО РАН.

SOLVING NONLINEAR PARTIAL DIFFERENTIAL EQUATIONS USING GEOMETRIC METHOD

O.N. Ulyanov, L.I. Rubina

Institute of Mathematics and Mechanics of the Ural Branch
of RAS, Yekaterinburg, Russia

E-mail: secretary@imm.uran.ru; rli@imm.uran.ru

Geometric method for solving nonlinear partial differential equations (NPDEs) suggested before is discussed. Using this method, two NPDEs are studied: heat equation, which describes blow-up regimes, and equation for the stream function in the boundary layer.

6-63

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ ПРИ НАЛИЧИИ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Н.А. Ваганова, М.Ю. Филимонов

Институт математики и механики Уральского отделения РАН,
Екатеринбург, Россия

Рассматривается новая математическая модель распространения тепла в вечномерзлых грунтах с учетом различных климатических и физических факторов. К первой группе факторов относится учет солнечного излучения, сезонное изменение температуры воздуха, приводящее к периодическому протаиванию (промерзанию) грунта, и возможный снежный покров. Ко второй группе факторов, учтенной в предлагаемой модели, относятся неоднородность грунта (не обязательно по горизонтальным слоям) и различные инженерные сооружения, расположенные в рассматриваемой области. Среди инженерных сооружений могут быть добывающие скважины, магистральные трубопроводы, сваи, фундаменты, отсыпки и сезонные охлаждающие устройства. Оценка радиуса растепления вечной мерзлоты от различных источников тепла является важной задачей при проектировании добывающих скважин, магистральных трубопроводов и инженерных сооружений в зоне вечной мерзлоты.

Учет перечисленных факторов приводит к решению для трехмерного квазилинейного уравнения теплопроводности (квазилинейность уравнения обусловлена зависимостью теплофизических параметров от температуры) задачи Стефана в прямоугольном параллелепипеде, но уже с нелинейным краевым условием на поверхности грунта, связанным с солнечным излучением. Предполагается, что боковые грани расчетной области теплоизолированы и выбраны достаточно далеко от места расположения инженерных конструкций, учет которых приводит к необходимости построения расчетной сетки большой размерности, сгущающейся к источникам тепла (холода) по определенным законам. В докладе приводятся результаты численных расчетов, полученных на основе созданного комплекса программ, который был использован при проведении проектных работ на нескольких нефтегазовых месторождениях России, расположенных в зоне вечной мерзлоты.

Работа поддержана грантами РФФИ-УРАЛ № 10-08-96014, программой поддержки фундаментальных исследований Президиума РАН и программой интеграционных проектов между УрО РАН, СО РАН и ДВО РАН.

SIMULATION OF THERMAL FIELDS IN PERMAFROST WITH PRESENCE OF ENGINEERING CONSTRUCTIONS

N.A. Vaganova, M.Yu. Filimonov

Institute of Mathematics and Mechanics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

A new mathematical model of heat distribution in permafrost soils is considered taking into account different climatic and physical factors. The first group of factors includes consideration of solar radiation, seasonal changes of air temperature, leading to periodic thawing (freezing) of soil, and possible snow layers. The second group of factors is the heterogeneity of the soil (not only in horizontal layers) and different engineering constructions located in this area. Engineering constructions may include production wells, pipelines, piles, foundations, backfilling and seasonal cooling devices. Estimation of radius of permafrost defrosting around different heat sources is an important task in designing production wells, pipelines and engineering constructions in permafrost.

Taking into account these factors leads to the solution of three-dimensional quasilinear heat distribution equation (quasilinear equation due to the dependence of the thermophysical parameters on temperature) of the Stefan problem in a rectangular parallelepiped, but also with a nonlinear boundary condition at the soil surface associated with solar radiation. It is assumed that the side faces of the computational domain are insulated and are chosen sufficiently far from the location of engineering structures, and a computational grid of large dimension to be used, with adaptation to the heat (cold) sources. Computational codes is designed for numerical simulation of thermal fields in permafrost and melted soil, taking into account thermal diffusion properties of the soil and heat exchange between the soil and air, including also due to heat loss by radiation. The presentation is devoted to the results of numerical simulations carried out for the project work in several oil and gas fields in Russia, located in the permafrost zone.

This work is partially supported by Russian Foundation for Basic Research – URAL 10-08-96014, by the Program of Presidium of RAS and the Program of Integrative Projects between Ural Branch, Siberian Branch, and Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences.

6-64

РАЗДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВА КАК СПОСОБ ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПЕРЕНОСА ЧАСТИЦ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

С.А. Фролов, С.А. Бреднихин, С.И. Лежнин

Институт проблем безопасного развития ядерной энергетики РАН, Москва, Россия

E-mail: lstanislav.a.frolov@gmail.com

Геометрические вычисления при моделировании переноса частиц методом Монте-Карло занимают значительную часть времени расчета. Такие вычисления имеют много общего с задачей трассировки лучей из компьютерной графики, многие алгоритмы оптимизации которой могут быть использованы с соответствующими модификациями и при моделировании переноса частиц. Одним из таких оптимизационных алгоритмов является разделение пространства. Пространство делится на ячейки, для каждой из которых производится поиск объектов, находящихся в ней. Поскольку известно, в какой ячейке находится луч, пересечения производятся только с теми объектами, которые пересекаются с ней, что значительно уменьшает количество необходимых вычислений. Также данный алгоритм оптимизации легко совмещается с использованием вложенности геометрических объектов.

В данной работе рассматривается семейство алгоритмов разделения пространства, адаптированных для моделирования переноса частиц методом Монте-Карло. Такие алгоритмы состоят из двух частей – предварительные вычисления расположения объектов в ячейках и, собственно, отбор геометрических объектов для пересечения с заданной траекторией. Если вторая часть алгоритма достаточно очевидна, хотя и не лишена особенностей, первая часть может стать наиболее сложной при его реализации. По этой причине приводится ряд алгоритмов вычисления наличия пересечений между ячейками и геометрическими объектами, как простых, но наименее точных, так и более сложных, к примеру, алгоритм Гилберта-Джонсона-Керти [1]. Также описана и вторая часть алгоритма разделения пространства, связанная с перебором объектов в ячейке и вычислением переходов между ними. Помимо этого рассматриваются различные методы разделения пространства и их особенности.

Для демонстрации возможностей был реализован алгоритм равномерного разбиения пространства. Указанный алгоритм, несмотря на то, что зачастую не является оптимальным, легко реализуем и позволяет быстро вычислять не только начальную ячейку, в которой находится частица, но и переходы между ними. Приведены приблизительные формулы для оптимальных параметров такого рода разбиения. Экспериментально показано значительное ускорение работы геометрического блока, причем лучшее ускорение достигнуто при вычисленных оптимальных параметрах разбиения.

Литература

1. Gilbert E.G., Johnson D.W., Keerthi S.S. A fast procedure for computing the distance between complex objects in three-dimensional space. IEEE Journal of Robotics and Automation 1988. v. 4. № 2. p. 193–203.

**OPTIMIZATION OF MONTE-CARLO PARTICLE
TRANSPORT GEOMETRIC CALCULATIONS
WITH SPACE PARTITION**

S.A. Frolov, S.A. Brednikhin, S.I. Lezhnin
Nuclear Safety Institute RAS, Moscow, Russia
E-mail: lezhnin@itp.nsc.ru

It is well-known that geometric computations take appreciable amount of time in Monte-Carlo particle transport modeling. Such computations have very much in common with the task of ray tracing in computer graphics. Many of its optimization algorithms can be adopted for particle transport. One of these algorithms is space partition. Briefly, space is divided into cells, then for each of those all the objects that are inside are found. As far as it is known which cell is intersected by the trajectory one should search for intersections only for objects that are inside that cell. That can greatly reduce the number of computed intersections. Also the algorithm can be easily combined with geometric object nesting.

A family of space partition algorithms adapted to Monte-Carlo particle transport modeling is discussed. In common, such algorithms consist of two parts, which are preliminary computations of object location in cells and, actually, selection of objects for intersection with a given trajectory. As the second part is quite obvious, although it has some peculiarities, the first part may become the most challenging in algorithm implementation. For that reason a number of algorithms for testing for intersection between cells and geometric models. These algorithms range from simple and inaccurate to very complex, such as Gilbert-Johnson-Keerthi algorithm [1]. Also the second part of space partition algorithm connected with geometric object search and cell traversing is considered. In addition various space partitioning methods and their features are discussed.

To demonstrate the algorithm capabilities a uniform space partition algorithm was implemented. Despite the fact that it is often not optimal the algorithm mentioned is easy to implement and allows for fast cell traversing. Approximate formulas for optimal parameters of the partition are given. Significant speed-up of geometric calculations is demonstrated experimentally with better speed-up near calculated optimal parameters.

References

1. Gilbert E.G., Johnson D.W., Keerthi S.S. A fast procedure for computing the distance between complex objects in three-dimensional space. IEEE Journal of Robotics and Automation 1988. v. 4. № 2. p. 193–203.

6-65

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ДВУХФАЗНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ОПИСАНИЯ
УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В ГАЗОВЗВЕСЯХ С УЧЕТОМ
МЕЖЧАСТИЧНЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ**

Т.А. Хмель, А.В. Федоров

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

Теоретические исследования ударно-волновых и детонационных процессов в газовзвесах твердых частиц проводятся, как правило, в рамках механики гетерогенных сред (МГС) [1]. Для плотных смесей необходимо учитывать силы плавучести и столкновения частиц. Попытки введения хаотического давления частиц предпринимались в [1, 2]. Последнее время развиваются молекулярно-кинетические подходы для описания столкновений частиц. В [3] на основе точного анализа интегралов столкновений определены хаотическое давление, вращательная и поступательная энергии и законы их генерации и диссипации с учетом неэластичности и шероховатости частиц. Однако не рассматривалось взаимодействие с несущим газом и тепловая динамика частиц. Для ударно-волновых и детонационных процессов необходимо развитие модели и согласование с моделями газовой динамики.

В работе представлена согласованная столкновительная модель для системы газ–несжимаемые частицы, основанная на подходах МГС с описанием межчастичных столкновений в соответствии с [3]. Проведен анализ системы ОДУ для решений в классе бегущих волн, получены выражения для основных характеристик. Выделен класс сред, для которых система имеет дивергентный вид. Проведен анализ условий на сильном разрыве. Установлено два типа комбинированных разрывов: без генерации и с генерацией столкновительной энергии на скачке. Установлено, что объемная концентрация в столкновительном скачке однозначно определяется лишь начальным значением и параметрами реституции и шероховатости. Получены аналитические решения для столкновительных скачков. Построены карты решений: в плоскости параметров реституции и шероховатости; в плоскости параметров скорость УВ – начальная концентрация частиц. На основе анализа представлений для хаотического давления и энергии столкновений найдена зависимость равновесной скорости звука от параметров смеси и гидродинамических характеристик для условий экспериментов Б.Е. Гельфанда (1986). Получено качественное соответствие экспериментальным данным.

Литература

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. М., Наука, 1987, 464 с.
2. Федоров А.В. Структура комбинированного разрыва в газозвесьях при наличии хаотического давления частиц // ПМТФ, 1992, № 5, с. 36–41.
3. Goldshtein A., Shapiro M. Mechanics of collisional motion of granular materials. Part I. General hydrodynamics equations // J. Fluid Mech, 1995. Vol. 282. P. 75–14.

**MATHEMATICAL MODEL OF TWO-PHASE
MEDIUM FOR DESCRIBING SHOCK-WAVE
PROCESSES IN GAS SUSPENSIONS
WITH REGARD FOR PARTICLE COLLISIONS**

T.A. Khmel, A.V. Fedorov

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

E-mail: khmel@itam.nsc.ru

Theoretical studies of shock wave and detonation processes in gas suspensions of solid particles are generally held within the framework of mechanics of heterogeneous continuum (MHC) [1]. For dense mixtures must take into account buoyancy forces and particle collisions. Attempts of introduction the chaotic pressure of the particles were taken in [1, 2]. Recently molecular-kinetic approaches have been developed to describe the collisions of particles. In [3] based on a precise analysis of the collision integrals defined the chaotic pressure, rotational and translational energy and the laws of their generation and dissipation, taking into account the particle inelasticity and roughness. However, no interaction was seen with a carrier gas and thermal dynamics of the particles. For the shock wave and detonation processes necessary to develop the model and the agreement with the models of gas dynamics.

In this work a consistent model for the collision of gas – incompressible particle-based approaches to the description of the MHC taking into account particle collisions in accordance with [3]. The analysis of the ODE system for solutions in the class of traveling waves, the expressions for the basic characteristics is performed. Mixtures are determined, for which the system has divergent form. The conditions for a strong discontinuity are obtained. Two types of combined discontinuities without and with generation of the collision energy at the shock are determined. It is established that the volume concentration of the collisional shock is uniquely determined by only the initial value and parameters of restitution and roughness. Analytical solutions for the collisional shocks are obtained. Maps of solutions are framed: in the plane of the parameters of restitution and roughness parameters and in the plane of the SW velocity – initial concentration of particles. Based on the analysis of formulas for chaotic pressure and collisional energy the equilibrium sound speed dependence on the parameters of the mixture and the hydrodynamic characteristics is obtained for the experiments by B.E. Gelfand (1986). A qualitative agreement with experimental data is obtained.

References

1. Nigmatulin R.I. Dynamics of Multi-phase Flows, Vol. 1. Moscow: Nauka, 1987. 464 pp.

2. Fedorov A.V. Structure of combined rupture in gas suspensions in the presence of chaotic particle pressure // J. of Appl. Mech. and Tech. Physics, 1992. V. 5, pp. 36–41.
3. Goldshtein A., Shapiro M. Mechanics of collisional motion of granular materials. Part I. General hydrodynamics equations // J. Fluid Mech, 1995. Vol. 282. P. 75–14.

6-66

**ОБОСНОВАНИЕ ВЕСОВЫХ МЕТОДОВ
МОНТЕ-КАРЛО ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ СРЕДНЕГО
ЗНАЧЕНИЯ НЕБОЛЬЦМАНОВСКИХ
ФУНКЦИОНАЛОВ**

Е.А. Цветков

ФГУП Центральный научно-исследовательский институт
химии и механики, Долгопрудный, Россия

E-mail: tsvetkov_egor@mail.ru

Как известно [1], при моделировании приборов, работающих по схемам совпадений, применение весовых методов Монте-Карло затруднительно. В связи с этим в большинстве работ разыгрывание траекторий частиц ведется аналоговыми методами, что приводит к существенным затратам машинного времени.

В работе [1] предложена концепция супертреков, которая является универсальным весовым методом для вычисления среднего значения небольшиемановских функционалов $q(S)$, заданных на множестве ветвящихся траекторий. Небольцмановскими функционалами описывается, например, количество совпадений и энергия, оставленная частицей в чувствительном объеме детектора. Однако строгое математическое обоснование концепции супертреков автором работы [1] не приведено. В настоящей работе концепция супертреков выведена из общих принципов построения весовых методов Монте-Карло и обобщена на случай, когда на отклик детектора могут влиять несколько частиц, относящихся к разным траекториям.

Пусть для каждой траектории S определена физическая плотность вероятности ее реализации $p(S)$. Пусть задана функция детектора $q(S)$. Классический метод Монте-Карло предлагает вычислить среднее по большому количеству случайных траекторий S величины

$$Q = q(S),$$

которое будет сходиться при увеличении количества испытаний к своему математическому ожиданию

$$MQ = \int q(S) p(S) dS.$$

Обозначим через $p'(S)$ смещенную плотность вероятности, в соответствии с которой разыгрываются траектории. Для каждой траектории S будем вычислять величину $Q^* = q(S)w(S)$, где $w(S)$ – статистический вес траектории S . Усредняя по всем траекториям, получаем

$$MQ^* = \int q(S)w(S)p'(S)dS.$$

Для несмещенности весовой оценки ($MQ^* = MQ$) достаточно выбрать статистический вес равным

$$w(S) = \frac{p(S)}{p'(S)}.$$

В случае расщепления исходная траектория расщепляется на m новых траекторий S_i , $i = 1, 2, \dots, m$, которые совпадают до момента расщепления. Весовая оценка в этом случае записывается в виде

$$Q^* = \sum_{i=1}^m q(S_i) w_i(S_i),$$

где $w_i(S_i)$ – веса новых траекторий. Под изложенную схему попадают такие весовые методы, как разыгрывание со смещенной плотностью вероятности, расщепление, русская рулетка и DXTRAN [2].

В случае вычисления среднего функционалов вида $q(S_1, S_2, \dots, S_k)$ может быть использована весовая оценка

$$Q^* = \sum_{i_1=1}^{m_1} \sum_{i_2=1}^{m_2} \dots \sum_{i_k=1}^{m_k} q(S_{1i_1}, S_{2i_2}, \dots, S_{ki_k}) w_{i_1}(S_{1i_1}) w_{i_2}(S_{2i_2}) \dots w_{i_k}(S_{ki_k})$$

где каждая из траекторий S_i в результате моделирования расщепилась на m_i траекторий S_{ij} с весами $w_j(S_{ij})$, $j = 1, 2, \dots, m_i$.

Литература

1. Booth, T.A. Monte Carlo Variance Reduction Approach for Non-Boltzmann Tallies // Nuclear Science and Engineering, 1994. Vol. 116. P. 113–124.
2. MCNP. A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 4C: Manual LA-13709-M / Ed. by J. Briesmeister: Los Alamos National Lab., NM (United States), 2000.

PROOF OF THE VARIANCE REDUCTION TECHNIQUES FOR ESTIMATING OF NON-BOLTZMANN TALLIES

E.A. Tsvetkov

FSUE Central Scientific Research Institute of Chemistry and Mechanics, Dolgoprudny, Russia

E-mail: tsvetkov_egor@mail.ru

Well known [1] that Monte Carlo variance reduction techniques are hardly applicable for estimating the number of detected coincidences. In many researches the sampling of trajectories is performed with analogue Monte Carlo techniques, which consume a lot of computer time.

In [1] supertrack approach was introduced. Supertrack approach is a common technique for estimating the average of non-Boltzmann tallies, that are represented by functionals $q(S)$ defined for every branching trajectory S . For example, number of detected coincidences or amount of energy, deposited by particle in the selected volume, is described as Non-Boltzmann tally. There is no strong evidence of unbiasedness of supertrack approach in [1]. In present work the supertrack approach is obtained as a sequence of common principles of Monte Carlo technique and generalized for the case when two particles from different trajectories can produce collective effect on the detector response.

Let us designate the probability density function of trajectory S as $p(S)$, and the detector function as $q(S)$. According to usual Monte Carlo we need to take average over large number of random trajectories S of the score

$$Q = q(S),$$

while increasing the number of trajectories the average approaches stochastically to its mathematical expectation

$$MQ = \int q(S) p(S) dS.$$

Let us sample trajectories in accordance with biased probability density function $p'(S)$. For every trajectory S the quantity $Q^* = q(S)w(S)$ should be computed, where $w(S)$ is stochastic weight of trajectory S . Averaging over all trajectories one can get

$$MQ^* = \int q(S) w(S) p'(S) dS.$$

To make the estimation unbiased ($MQ^* = MQ$) it is enough to choose

$$w(S) = \frac{p(S)}{p'(S)}.$$

When the splitting variance reduction techniques are used the source trajectory is split into m new trajectories S_i , $i = 1, 2, \dots, m$, that coincide together before the split point. The unbiased statistical estimation of average detector response in this case can be written as

$$Q^* = \sum_{i=1}^m q(S_i) w_i(S_i),$$

where $w_i(S_i)$ are the weights of new trajectories. Under described approach fall such variance reduction techniques, as biased sampling, splitting, Russian roulette and DXTRAN[2].

If it is needed to estimate the average of functional like $q(S_1, S_2, \dots, S_k)$ one can average the following score

$$Q^* = \sum_{i_1=1}^{m_1} \sum_{i_2=1}^{m_2} \dots \sum_{i_k=1}^{m_k} q(S_{1i_1}, S_{2i_2}, \dots, S_{ki_k}) w_{i_1}(S_{1i_1}) w_{i_2}(S_{2i_2}) \dots w_{i_k}(S_{ki_k}),$$

where each trajectory S_i is split into new m_i trajectories S_{ij} with weights $w_j(S_{ij})$, $j = 1, 2, \dots, m_i$.

References

1. Booth T.A. Monte Carlo Variance Reduction Approach for Non-Boltzmann Tallies // Nuclear Science and Engineering, 1994. Vol. 116. P. 113–124.
2. MCNP. A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 4C: Manual LA-13709-M / Ed. by J. Briesmeister: Los Alamos National Lab., NM (United States), 2000.

6-67

СЕДЬМАЯ ЗАДАЧА ФЛЕКА

А.А. Шестаков

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

E-mail: aashestakov@vniitf.ru

Тестовые задачи Флека многократно решались при разработке методик переноса излучения. Создание новых многомерных программ потребовало применение дополнительных более сложных тестов. Задачи Флека рассматривались в простейшем случае для одномерной

плоской геометрии без учета рассеяния и газодинамического движения вещества. В данной работе приведен более сложный тест, который использует все варианты задач Флека, дополнительно учитывает рассеяние и газодинамическое движение вещества. Так как тест построен на основе шести задач Флека, для краткости он назван седьмой задачей Флека.

SEVENTH FLECK PROBLEM

A.A. Shestakov

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

E-mail: aashestakov@vniitf.ru

Fleck's problems are often used as tests for radiative transfer methods and codes. More sophisticated tests are needed for advanced multidimensional codes. The problems were earlier solved for simple cases in 1D plane geometry with no scattering and hydrodynamic motion of matter. The paper presents a test which combines all Fleck's problems and considers scattering and hydrodynamic motion of matter. The test is based on six Fleck's problems and is referred to as seventh Fleck's problem.

6-68

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В НАПОЛНЕННЫХ ГАЗОМ НЕЙТРОННЫХ ТРУБКАХ

Д.К. Шестаков

ВНИИА им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

E-mail: vniia@vniia.ru

Важной задачей при конструировании нейтронных трубок (НТ) для обеспечения максимального тока на мишени является формирование ионных пучков с малой расходимостью и высокой интенсивностью. Решение проблемы возможно в том случае, если будут учтены все факторы, влияющие на процесс извлечения ионов из ионного источника (ИИ). Прежде всего, это огромное количество параметров, которые необходимо учитывать при создании аналитической системы: геометрия разряда, ток и напряжение, давление, газовый состав, настройка ионной оптики для переноса ионов из источника в мишень и многие другие параметры, которые необходимо оптимизировать. Все это делает крайне трудной разработку аналитической системы без ее теоретической модели.

Представленная работа является попыткой построения теоретической модели по оптимизации работы данного класса приборов. Компьютерное моделирование работы ГНТ можно рассматривать как совокупность нескольких модельных задач: по расчету электрического поля, движения потока заряженных частиц, объемного заряда пучка и т. д., самосогласованное решение которых является физико-математической моделью исходной трубки.

Моделировались физические процессы в источнике Пеннинга. В результате решения «балансных» уравне-

ний были рассчитаны концентрации ионов, «холодных» и «горячих» электронов, а также падение потенциалов на анодном и катодном слое в источнике Пеннинга. Кроме того, учитывалось влияние конфигурации мениска на величину плотности тока. Численные расчеты распределения электрического поля (потенциала) и поверхностной плотности заряда около электродов в ИИ трубки осуществлялись посредством компьютерной программы Comsol Multiphysics 3.5. Зная положение и форму мениска, производился расчет траекторий частиц. Варьируя напряжение и геометрию электродов, возможен выбор параметров, при которых происходит максимальное число «замыканий» траекторий ионов на мишени НТ. Тем самым возможно производить оптимизацию ионно-оптической системы НТ.

NUMERICAL MODELING OF PHYSICAL PROCESS IN THE GAS FILLED NEUTRON TUBES (GNT)

D.K. Shestakov

All-Russia Research Institute of Automatics (VNIIA),
Moscow, Russia

E-mail: vniia@vniia.ru

This work describes a universal physical and analytical model of the gas filled tubes (GNT). Simulation was carried out on real tubes which at this moment are developed in VNIIA. Results of numerical calculations performed by means of Comsol Multiphysics 3.5. Moreover using this product have been calculated electromagnetic fields, plasma concentration, the thickness of the anode and the cathode layers in the discharge source (PIG). The theoretical value of current at the anode and cathode layers are compared with experimental data obtained VNIIA. By varying the geometry and charge voltage in analytic model was selected optimal parameters of the real systems.

6-69

ПРИБЛИЖЕНИЕ ВПЕРЕД-НАЗАД. НЕЙТРОНЫ

В.М. Шмаков

Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

Приближением вперед-назад является простейшей моделью переноса нейтронов. В рамках этого приближения можно получить аналитические решения многих простых задач. Модель переноса в приближении вперед-назад может быть абсолютно точно реализована в методах Монте-Карло. В этом случае аналитические решения могут быть использованы в качестве тестов для программ Монте-Карло.

Выделим три основных момента, заложенных в приближение вперед-назад. Это переход к однопучковому описанию взаимодействия нейтронов с веществом. Второй момент – это переход к одномерной геометрии. И третий шаг – это ограничение на возможные направления движения нейтронов, что собственно и является приближением вперед-назад.

Договоримся, что в одномерных геометриях (плоская, цилиндрическая и сферическая) в приближении вперед-назад нейтронам разрешено двигаться только в двух направлениях вдоль некоторых прямых линий. Для плоской геометрии этими линиями являются нормали к поверхности плоскости. Для цилиндрической геометрии – это нормали к поверхности цилиндра. Для сферической геометрии – это нормали к поверхности сферы. Те же ограничения на направление движения нейтронов распространяются и на источники нейтронов и на нейтроны, возникающие при делении и рассеянии.

В приближении вперед-назад используются одногрупповые константы. Это поглощение с сечением σ_a , рассеяние с

$$\sigma_s(\mu' \rightarrow \mu) = \sigma_s[(1-q)\delta(\mu - \mu') + q\delta(\mu + \mu')],$$

где q – вероятность рассеяния нейтрона назад, деление

$$\sigma_f(\mu' \rightarrow \mu) = \nu_f \sigma_f \left[\frac{1}{2} \delta(\mu - \mu') + \frac{1}{2} \delta(\mu + \mu') \right],$$

где ν_f среднее число вторичных нейтронов деления и групповая скорость v . Угловые распределения рассеянных нейтронов и нейтронов деления описываются через дельта-функцию Дирака. Косинусы углов между направлением движения нейтрона и соответствующей нормалью могут принимать только два значения $\mu' = \pm 1$ и $\mu = \pm 1$.

В рамках этих соглашений была получена система дифференциальных уравнений относительно потоков и токов нейтронов, которая эквивалентна одногрупповому интегро-дифференциальному уравнению переноса.

В докладе представлены аналитические решения задачи на собственное значение k_{eff} шара с центральной вакуумной полостью. Решена задача на временную постоянную размножения нейтронов λ и др. Приведено сравнение аналитических решений этих задач с расчетами Монте-Карло как с одногрупповыми, так и со спектральными константами БАС, ENDF/B-V и ENDL-82. Аналитика с одногрупповыми константами, в сравнении с расчетами Монте-Карло со спектральными константами, хорошо передает качественное поведение зависимости $k_{eff}(\rho R)$ и $\lambda(\rho R)$ урановых шаров. Аналитические решения с одногрупповыми константами для $k_{eff}(\rho R)$, $\lambda(\rho R)$ и их собственных функций полностью совпадают с расчетами Монте-Карло с теми же одногрупповыми константами.

NEUTRONS: BACK AND FORTH APPROXIMATION

V.M. Shmakov

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

The back and forth approximation is a simple neutron transport model which helps get analytical solutions for many simple problems. A transport model based on this approximation allows an absolutely accurate implementation in the Monte Carlo methods. In this case the analytical solutions can be used as tests for Monte Carlo codes.

There are three fundamental assumptions in the approximation: (1) nuclear interaction with matter is treated in

a one-group approximation; (2) neutrons are tracked in 1D geometry; and (3) the motion of neutrons is limited to only back and forth directions which is properly the back and forth approximation.

Assume that in 1D geometries (plane, cylinder and sphere) neutrons are allowed to move only in two directions along some straight lines. In the planar geometry, these are normals to the plane. In the cylindrical geometry, these are normals to the cylindrical surface. In the spherical geometry, these are normals to the spherical surface. The same limitation on neutron directions is applied to source, fission and scattered neutrons.

The following interactions with one-group cross-sections are used in the approximation. These are absorption with σ_a , scattering with

$$\sigma_s(\mu' \rightarrow \mu) = \sigma_s[(1-q)\delta(\mu - \mu') + q\delta(\mu + \mu')],$$

where q is a probability for a neutron to scatter back, and fission with

$$\sigma_f(\mu' \rightarrow \mu) = \nu_f \sigma_f \left[\frac{1}{2} \delta(\mu - \mu') + \frac{1}{2} \delta(\mu + \mu') \right],$$

where ν_f is the average number of secondary fission neutrons and v is the group velocity. The angular distributions of scattered and fission neutrons are described by the Dirac delta-function. Cosine angles between the neutron direction and the normal are only allowed to be $\mu' = \pm 1$ and $\mu = \pm 1$.

With these assumptions we obtained a system of differential equations for neutron fluxes and currents, which is equivalent to the one-group integro-differential transport equation.

The paper presents analytical solutions for the k_{eff} of a sphere with vacuum in the center, for the α eigenvalue, and other problems. The solutions were compared with Monte Carlo calculations which were done both with one-group cross-sections and with continuous-energy cross-sections from the BAS, ENDF/B-V and ENDL-82 nuclear data libraries. Analytically with one-group cross-sections excellently agree with Monte Carlo one-group calculations and reproduce quite well the qualitative behavior of $k_{eff}(\rho R)$ and $\alpha(\rho R)$ for uranium spheres from Monte Carlo continuous-energy calculations. The one-group analytical solutions for $k_{eff}(\rho R)$ and $\alpha(\rho R)$, and their eigenfunctions completely agree with one-group Monte Carlo calculations.

6-70

БИБЛИОТЕКА ЕФР ДЛЯ МАСШТАБИРУЕМОГО ДОСТУПА К ФАЙЛОВЫМ ДАННЫМ НА МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ ЭВМ

К.К. Олесницкая, И.А. Антипин, М.А. Шубина

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

E-mail: kalmykova@vniief.ru

В рамках общего интерфейса создаваемого в математическом отделении РФЯЦ-ВНИИЭФ разрабатывается библиотека ЕФР[1]. Библиотека представляет

собой инструмент разработчика программных математических комплексов, позволяющий в кратчайшие сроки создавать программы формирования результатов расчетов в виде единого файлового разреза (ЕФР) и обеспечивает:

- обмен данными между различными пакетами прикладных программ на основе стандартизированного представления сеточных данных;
- единый интерфейс взаимодействия с сервисными программами для постобработки и визуализации сеточных данных;
- проблемно-ориентированный масштабируемый ввод-вывод информации на многопроцессорных ЭВМ.

В математическом отделении РФЯЦ–ВНИИЭФ библиотека ЕФР является составной частью программ общего сервиса (препроцессор, постпроцессор) таких как ЛОГОС.ПРЕПОСТ и неотъемлемым компонентом технологии проведения расчетов на многопроцессорных ЭВМ.

Библиотека ЕФР включает в себя:

- универсальные форматы представления сеточных данных, позволяющие описывать оптимальным образом топологию как регулярных, так и неструктурированных двумерных и трехмерных сеток (характерная особенность: ячейка нерегулярной трехмерной сетки может быть произвольным многогранником с неплоскими гранями);
- гибкую модель представления данных, которая позволяет сохранять все необходимые данные как для продолжения счета («контрольная точка») в рамках одного пакета программ, так и для передачи в другой пакет программ для полномасштабных последовательных расчетов. Также позволяет сохранять выборочный набор данных для визуализации, табличного анализа или в результате предобработки. Во всех случаях данные в формате ЕФР пригодны для постобработки, табличного анализа и визуализации программами общего сервиса;
- алгоритмы распределенного хранения сеточных данных сверхбольшого объема на многопроцессорных ЭВМ;
- уникальный механизм эффективного масштабируемого доступа к распределенным данным, позволяющий работать с распределенными данными на произвольном числе процессоров;
- необходимый функционал для работы с распределенными данными в многопроцессорном режиме.

Библиотека ЕФР является кроссплатформенной. Внешний интерфейс библиотеки ориентирован на языки Фортран 90 и C/C++, являющиеся основными языками программирования для программ общего сервиса.

Формат файлового разреза, создаваемого с помощью библиотеки ЕФР, имеет бинарное представление и максимально скрыт от пользователей. Обращение к файловому разрезу осуществляется через внешние функции и процедуры прямого доступа, входящие в библиотеку. Для логической организации данных в файловом разрезе за основу взят объектно-ориентированный подход, таким образом, с точки зрения пользователя разрез представляет собой иерархическую многоуровневую структуру объектов данных.

Неотъемлемым компонентом библиотеки является кроссплатформенная программа-утилиты EFR-Tools, основной целью которой является ускорение и упрощение процесса внедрения возможностей библиотеки EFR в программы общего сервиса. Данная программа имеет удобный графический интерфейс, предназначенный для просмотра и редактирования разрезов в формате ЕФР. Помимо этого EFR-Tools предлагает ряд средств полезных для разработчиков при отладке собственных программных комплексов, отладке новых возможностей и для решения проблем связанных с постобработкой программами общего сервиса. Такие как:

- средство для создания базовых разрезов в формате ЕФР;
- средство для восстановления «битых» разрезов в формате ЕФР;
- средство для локализации и коррекции узких мест в объектах данных разреза в формате ЕФР.

Литература

1. Волгин А.В., и др. Библиотека ЕФР для универсального представления расчётных данных // Труды РФЯЦ–ВНИИЭФ. Научно-исследовательское издание. Саров: ФГУП РФЯЦ–ВНИИЭФ. Выпуск 11. 2007. С. 130–135.

6-71

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ДИРАКА ДЛЯ СОСТОЯНИЯ 0+ УГЛЕРОДОПОДОБНЫХ ИОНОВ ТРАНСУРАНОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А.А. Садовой, А.С. Ульянов

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

В работе проведено релятивистское обобщение известного метода многомерных угловых кулоновских функций. Построены двухкомпонентные многомерные угловые функции, по которым раскладывается многоэлектронная волновая функция многочастичного уравнения Дирака. Для амплитуд разложения получена система обыкновенных дифференциальных уравнений, коэффициенты которой выражаются через матричные элементы различных операторов, входящих в уравнение Дирака. Произведен расчет энергии связи углеродо-подобных ионов трансуранических элементов ($Z = 92-101$). Построены волновые функции основного и возбужденных состояний углеродо-подобного иона урана.

Развитый метод позволяет учитывать многочастичные эффекты при расчете свойств релятивистских многоэлектронных систем, описываемых многочастичным уравнением Дирака с кулоновскими взаимодействиями.

Полученные результаты могут найти применение при уточнении вероятностей переходов, пробегов в процессах с высокой плотностью энергии.

ANALYTICAL SOLUTION OF THE DIRAC EQUATION FOR STATE 0+ OF CARBON-LIKE IONS OF TRANSURANIUM ELEMENTS

A.A. Sadovoy, A.S. Ul'yanov

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

The paper presents relativistic generalization of the well-known method of multidimensional angular Coulomb functions. Two-component multidimensional angular functions have been constructed and they are used as a basis for expanding in series the many-electron wave function of the many-particle Dirac equation. A system of ordinary differential equations which factors are expressed in terms of matrix elements of various operators of the Dirac equation has been obtained for the expansion amplitudes. The binding energy of carbon-like ions of transuranium elements has been calculated ($Z = 92-101$). Wave functions have been constructed for the ground and excited states of a carbon-like ion of uranium.

The developed method allows taking into account the many-particle effects during the calculation of relativistic many-electron systems which are described by the many-particle Dirac equation with Coulomb interactions.

The obtained results can be applied to specify the probability of transitions and particle paths in high energy-density processes.

6-72

ТРЕХУДАРНЫЕ КОНФИГУРАЦИИ ПРИ ОТРАЖЕНИИ УДАРНЫХ ВОЛН В РЕАЛЬНЫХ ГАЗАХ

Л.Г. Гвоздева, С.А. Гавренков

Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Москва, Россия

E-mail: gvozdevalg@mail.ru, gavrenkov@gmail.com

В работе было исследовано влияние реальности газа на картину течения при стационарном маховском отражении. Впервые было найдено, что для сильных ударных волн при больших числах Маха M_1 и низких показателях адиабаты γ возникают новые трехударные конфигурации с отрицательным углом отражения. Их появление может привести к неустойчивости всего течения.

Аналитическим методом ударных поляр были определены границы и области существования режимов с отрицательным углом отражения, в широком диапазоне начальных параметров газа. Показано, что для $\gamma \geq 1,4$ существование отрицательного угла невозможно. Именно поэтому до сих пор конфигурации с отрицательным углом отражения в стационарном сверхзвуковом потоке не наблюдались, так как эксперименты проводились на аэродинамических трубах, где рабочим газом является воздух с $\gamma = 1,4$.

Исследование новых типов отражения проводилось численно, с применением программного продукта STAR-CCM+ v. 5.02. В программе заложен метод осреднения уравнений Навье-Стокса (RANS –

Reynolds-averaged Navier-Stokes equations). В качестве модельной принята задача об отражении ударной волны от плоскости симметрии при взаимодействии скачков уплотнения, генерируемых двумя помещенными в сверхзвуковой поток симметричными клиньями. Предварительно проведена верификация расчетной программы, получено хорошее совпадение с экспериментом. Численно получена конфигурация с отрицательным углом отражения при малом значении отрицательного угла. Показано, что новая конфигурация является неустойчивой и ее появление может критически сказаться на работе летательных аппаратов.

THREE SHOCK WAVE CONFIGURATIONS AT THE REFLECTION OF SHOCK WAVES IN REAL GASES

L.G. Gvozdeva, S.A. Gavrenkov

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (JIHT RAS), Moscow, Russia

E-mail: gvozdevalg@mail.ru, gavrenkov@gmail.com

The effect of real gas properties on the flow patterns in a stationary Mach reflection has been investigated. It has been found for the first time that for strong shock waves at high Mach numbers M_1 and low adiabatic index γ there appear the new three shock wave configurations with a negative angle of reflection. Their appearance can lead to the instability of the flow.

The boundaries of the existence of regimes with a negative angle of reflection have been determined, in a broad range of initial parameters of the gas. It has been shown that for $\gamma \geq 1.4$ the existence of a negative angle is impossible. That's why the configurations with a negative angle of reflection in steady supersonic flow were not still observed, since the experiments were conducted in wind tunnels, where the working gas is air with $\gamma = 1.4$.

Investigation of the new types of reflection has been carried out numerically, using the software STAR-CCM v. 5.02. The program incorporated the method of Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS). The problem of shock wave reflection from a plane of symmetry of the interaction of shock waves generated by the two placed in a supersonic flow of a symmetric wedge was adopted as a model. Verification has been carried out with the program, a good agreement with experiment has been obtained. Configuration with a negative angle of reflections at low values of negative angle has been obtained numerically. It has been shown that the new configuration is unstable and its occurrence leads to the radical change of flow.

6-73

АНАЛИЗ ДВУХДИАПАЗОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТЕПЛОВОЙ СТРУКТУРЫ ПРОТОЗВЕЗДНЫХ ОБЛАКОВ

П.Б. Исакова¹, А.Г. Жилкин^{1, 2},
Я.Н. Павлюченков²

¹Челябинский государственный университет,
Челябинск, Россия,

²Институт астрономии РАН, Москва, Россия
E-mail: e-mail: isakovapb@list.ru

На начальных стадиях сжатия протозвездные облака являются прозрачными к собственному инфракрасному излучению пыли. Тепловая структура облака на этих стадиях определяется процессами нагрева и охлаждения газа и пыли, а также переносом межзвездного ультрафиолетового излучения. Газ может нагреваться за счет космических лучей и фотоэффекта, а охлаждаться за счет излучения в линиях молекул. Нагрев и охлаждение пыли определяется процессами поглощения и переизлучения межзвездного излучения пылинками. Кроме того, на эти процессы влияет обмен энергией между газом и пылью за счет столкновений. При больших плотностях на поздних стадиях сжатия излучение пыли начинает эффективно поглощаться, в результате чего в центре облака формируется непрозрачное ядро (протозвезда). Для описания тепловой структуры протозвездных облаков в работе используется двухдиапазонная модель. Основной идеей этой модели является разделение всего диапазона частот излучения на низкочастотную (инфракрасную) и высокочастотную (ультрафиолетовую) части. Для расчета переноса в высокочастотной части, описывающей межзвездное дилутированное излучение, можно пренебречь собственным излучением пыли. Перенос излучения в низкочастотной части можно моделировать в диффузионном приближении. Модель включает четыре взаимодействующие компоненты: газ, пыль, инфракрасное и ультрафиолетовое излучение. Поскольку в рамках используемой модели на тепловую структуру облака оказывают влияние достаточно большое количество физических процессов, имеет смысл более детально изучить роль каждого отдельного процесса. В работе исследованы процессы установления теплового равновесия между газом и пылью, а также между пылью и инфракрасным излучением. Кроме того, проведено сравнение соответствующих характерных временных шкал, что позволяет выделить доминирующие процессы, определяющие тепловое состояние в данной области протозвездного облака на любой стадии его эволюции. Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект 10-02-00612).

ANALYSIS OF THE TWO-WAVELENGTH MODEL DEVELOPED TO SIMULATE THE THERMAL STRUCTURE OF PROTOSTELLAR CLOUDS

P.B. Isakova¹, A.G. Zhilkin^{1, 2},
Ya.N. Pavlyuchenkov²

¹Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia,

²Institute of astronomy RAS, Moscow, Russia

E-mail: isakovapb@list.ru

At the initial stages of contraction, the protostellar clouds are transparent to their own infrared dust emission. The thermal structure of the clouds at these stages are determined by heating and cooling of gas and dust as well by radiative transfer of interstellar ultraviolet emission. The gas can be heated by cosmic rays and photoeffect while be cooled by molecular line emission. The heating and cooling of dust proceeds via absorption and reemission of interstellar radiation by dust grains. In addition, the collisions between gas and dust are important to provide the energy exchange between these components. At later stages of cloud contraction when density becomes high enough, the dust emission is absorbed resulting in formation of the opaque core (protostar) in the center of the cloud. To describe the thermal structure of protostellar clouds we use two-wavelength model. The basic idea behind this model is to split the whole radiation spectrum on the low-frequency (infrared) and high-frequency (ultraviolet) bands. The high-frequency band is devoted for the diluted interstellar radiation where the dust thermal emission can be neglected. The radiative transfer in the low-frequency band can be modeled using diffusion approximation. The model includes four interacting components: gas, dust, infrared and ultraviolet emission. Since many physical processes are involved in the model it makes sense to study their relative role in more detail. Here we study the process of thermal accommodation between gas and dust, as well as between dust and infrared emission. In addition, we compare the correspondent timescales to identify the dominant processes which determine the thermal structure of protostellar cloud at any stage of its evolution. This work is supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 10-02-00612).

6-74

ПАКЕТ ПРОГРАММ ЛОГОС. МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ПАРАЛЛЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ

И.В. Логинов, А.Л. Потехин, В.А. Никитин

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

Для развития наукоемких отраслей промышленности страны проводятся ОКР по теме «Разработка технологий проектирования и имитационного моделирования для супер-ЭВМ на основе базового программного обеспечения». Проект получил название «Пакет программ ЛОГОС».

С целью обеспечения проекта средствами графического анализа в ИТМФ РФЯЦ–ВНИИЭФ развивается параллельная система постобработки ScientificView [1, 2], сегодня как отдельное приложение, а в ближайшей перспективе как основной модуль постобработки в составе пакета программ ЛОГОС.

Причиной развития системы ScientificView послужило то, что на момент начала ее создания ни одна программа визуализации (ParaView, LS-PrePost, Star-CD и т.д.) не могла полностью удовлетворить все потребности пользователей математического отделения, а реализация в таких программах новых возможностей сопряжена с различными трудностями.

До недавнего времени в системе ScientificView были распараллелены только процедуры чтения и обработки данных. Отображение результатов проводилось на клиентской стороне программы ресурсами ПЭВМ пользователя. Однако, в последнее время все чаще начали появляться задачи, расчетная сетка в которых содержит миллиарды ячеек. Объем графических данных для отображения таких задач могут превышать несколько гигабайт.

Данную проблему можно решать путем реализации возможности параллельного рендеринга. Параллельный рендеринг – это формирование изображений в параллельном режиме, в том числе и на высокопроизводительных ЭВМ с распределенной памятью.

Данный доклад освещает основные моменты реализации возможности параллельного рендеринга в системе ScientificView. Приводятся задачи, которые необходимо решить для функционирования системы в указанном режиме: инициализация контекста OpenGL под ОС Linux; обеспечение механизма передачи и обработки команд пользователя на серверной стороне программы; обеспечение интерактивного режима работы; реализация механизма параллельного формирования изображений и передачи результатов на клиент.

В заключение доклада приводятся некоторые результаты, полученные при использовании параллельного рендеринга в системе ScientificView по сравнению со обычным параллельным режимом работы программы.

Литература

1. Потехин А.Л., Логинов И.В., Тарасов и др. ScientificView – параллельная система постобработки результатов, полученных при численном моделировании физических процессов // Вопросы атомной науки и техники. 2008. Вып. 4. С. 37–45.
2. Потехин А.Л. Методы быстрого формирования изображения в параллельной системе постобработки результатов научных вычислений ScientificView // Сборник трудов XX международной конференции по компьютерной графике и зрению Графикон. 2010. С. 273–279.
3. Цибереv К.В., Артамонов М.В., Авдеев и др. Параллельный пакет программ ЛЭГАК-ДК для расчета задач гидродинамики и прочности на неструктурированных сетках в лагранжево-эйлеровых переменных // Сборник трудов XI международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» – Саров, 2009.

LOGOS SOFTWARE PACKAGE. PARALLEL IMAGING METHODS

I.V. Loginov, A.L. Potekhin, V.A. Nikitin

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

At present design and development activities are being carried out under the subject “Development of design and imitational simulation technology for supercomputer with reference to basic software” for domestic science-consuming industries. The Project is called «LOGOS software package».

For the purposes of providing the Project with graphical analysis tools, a parallel system of post-processing – ScientificView[1, 2] – is being developed at ITMF RFNC–VNIIEF as a separate application, which in the near future will turn into the principal module of the post-processing tool within the LOGOS software package.

By the time of the ScientificView development non of the available visualization programs (ParaView, LS-PrePost, Star-CD, etc.) were able to entirely meet the mathematicians’ requirements, while the realization of new features in such programs is quite a complex task; so this was the inducement for our programmers to creating a different visualization tool.

Up to this time, in the ScientificView system, only the data reading and processing procedures were parallelized. The results were represented on the client program side with the user’s computer resources. However, not long ago we started facing the problems with billions of computation cells in the grids. The graphical data volume for such problems to be visualized may exceed several Gigabytes.

This issue can be resolved by the realization of parallel rendering. Parallel rendering means the parallel imaging, which can also be carried out on high-performance computers with distributed memory.

This paper covers the major aspects of parallel rendering realization in the ScientificView system. The issues to be resolved to provide the system functioning in the specified mode are discussed: initiation of the OpenGL context on the Linux OS; providing the mechanism of user’s command transition and processing on the program server side; providing the interactive operation mode; realization of parallel imaging and results transition to the client mechanism.

In the Conclusions section several results obtained at parallel rendering in the ScientificView system are shown and compared with the results of conventional parallel program operation.

References

1. Potekhin A.L., Loginov I.V., Tarasov V.I., et al. ScientificView – parallelized post-processing system for the results obtained at numerical simulation of physical processes. // Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki. 2008. Issue 4. P. 37–45.
2. Anton L. Potekhin. Fast rendering methods in ScientificView – parallel system for post-processing scientific modeling. // Proceedings of the XX international conference on computer graphics and vision Graphicon 2010. P. 273–279.
3. Tsiberev K.V., Artamonov M.V., Avdeev et al. Parallel software package – LEGAK-DK for the calculation of hydrodynamics and strength problems on unstructured grids in Eulerian-Lagrangian variables // Proceedings of the XI international conference “Supercomputing and computer modeling” – Sarov, 2009.

«Молодые у нас – очень талантливые люди. И я вижу свою задачу в том, чтобы им не мешать. Я вижу и чувствую, что их полёт может быть очень высоким...».

Е.И. Забабахин

**ЛУЧШИЕ СТУДЕНЧЕСКИЕ
НАУЧНЫЕ РАБОТЫ**

**THE BEST RESEARCH PAPERS
BY UNDERGRADUATE STUDENTS**

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ

И.В. Лавренюк

Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

E-mail: ivan.lavrenyuk@gmail.com

В работе представлен обзор моделей откольного разрушения, выбрана разностная схема, обладающая малыми дисстракцией и амплитудой первой осцилляции на волне разрежения. Точность схемы проверена на аналитическом решении задачи об отколе. Представлены результаты численного эксперимента по соударению пластин.

ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ СКЛЕЙКИ КИНЕТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ С P_1 ПРИБЛИЖЕНИЕМ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ

Н.Г. Карлыханов¹, Н.В. Селиванова²

¹Российский федеральный ядерный центр –
ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Россия

²Томский государственный университет, Томск, Россия
E-mail: nikolai@snezhinsk.ru, natalya-selivanova@mail.ru

Для расчета ряда практических задач переноса излучения приходится решать кинетическое уравнение. Расчет кинетического уравнения требует больших вычислительных ресурсов. Довольно часто встречаются случаи, когда рассчитываемая система состоит из чередующихся оптически прозрачных и оптически плотных областей. Решать такую систему в кинетической постановке нецелесообразно, а решение уравнения в P_1 приближении может давать неудовлетворительный результат. Весьма полезным оказывается подход, при котором в каждой области рассчитывается то уравнение, которое обеспечивает приемлемую точность при минимальных затратах машинных ресурсов. В процессе счета оптическая толщина может меняться в широком диапазоне, как в пространстве, так и во времени, поэтому требуется разработка простых и надежных критериев применимости уравнений в P_1 приближении. При организации таких вычислений необходимо провести склейку кинетического уравнения с уравнением в P_1 приближении. Для этого нужно корректно поставить внутренние граничные условия и учесть консервативность алгоритма. Исследованию указанных проблем посвящена данная работа.

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СЖАТИЯ НА ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД В НИТРИДЕ КРЕМНИЯ

В.А. Кудакина¹, В.В. Якушев²,
А.Н. Жуков², А.И. Рогачёва²

¹Московский Государственный Университет
им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт Проблем Химической Физики РАН,
Черноголовка, Россия

E-mail: vera257@list.ru

Проведено исследование превращения нитрида кремния в γ -фазу в условиях высокотемпературного ударного сжатия (метод ВТУС [1]) при давлении 36 ГПа с использованием в качестве добавок в образец солей KBr, KCl. Для сравнения проведены эксперименты с добавками медного порошка (см. также [2, 3]), и с образцом из чистого нитрида кремния без добавок. Рентгенографическим методом Ритвелда определен количественный фазовый состав нитрида кремния в сохраненных образцах и его структурные особенности. Произведены расчеты температур ударного сжатия образцов и температур их охлаждения в разгрузке. С помощью методики манганиновых датчиков показано, что в образцах, заключенных в ампулы сохранения, достигается максимальное давление, равное давлению в крышке ампулы в момент столкновения с ударником (36 ГПа). Установлено, что метод ВТУС обеспечивает более высокую степень превращения нитрида кремния в γ -фазу по сравнению с методикой, когда в качестве добавки в образец используется медный порошок.

Литература

1. Курдюмов А.В., Бритун В.Ф., Боримчук Н.К., Ярош В.В. Мартенситные и диффузионные превращения в углероде и нитриде бора при ударном сжатии. Киев: Куприянова О.О. 2005. 192 с.
2. Sekine T., He Hongliang, Kobayashi T., Zhang Ming, and Xu Fangfan. Shock-induced transformation of β - Si_3N_4 to high-pressure cubic-spinel phase. // Appl. Phys. Letters. 2000, v. 76, no. 25, p. 3706–3708.
3. Юношев А.С. Ударно-волновой синтез кубического нитрида кремния. //Физика горения и взрыва. Т. 40. № 3. 2004. С. 132–135.

THE INFLUENCE OF HIGH TEMPERATURE SHOCK COMPRESSION ON SILICON NITRIDE PHASE TRANSFORMATION

V.A. Kudakina¹, V.V. Yakushev²,
A.N. Zhukov², A.I. Rogacheva²

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Institute of Problems of Chemical Physics RAS,
Chernogolovka, Russia

E-mail: vera257@list.ru

The research of silicon nitride transformation to its γ -phase under high temperature shock compression (HTSC method [1]) was conducted at a pressure of 36 GPa using alkali halides (KBr, KCl) as additives into the samples. The same experiments were fulfilled with samples containing copper powder additives (see also [2, 3]), and those with pure silicon nitride for the comparison. Quantitative phase

analysis and structure features of the recovered silicon nitride were carried out by X-ray Rietveld refinement. It was calculated samples' heating temperatures during the shock compression and their cooling in the release wave. The experiments with manganin gages confirmed that the pressure in samples, enclosed in recovery ampoules, achieves its maximum value of 36 GPa before coming of the release wave. It was showed that HTSC method provides higher transformation degree of silicon nitride to its γ -phase in comparison with that when copper powder additive is used.

References

1. A. V. Kurdyumov, V. F. Britun, N. I. Borimchuk, V. V. Yarosh. Martensitnie i diffusionnie prevrascheniya v uglerode i nitride bora pri udarnom shtatii. Kiev: Kupriyanova O.O. 2005. 192 pages.; A. V. Kurdyumov, V. F. Britun, V. V. Yarosh et al. Phase transformations of carbon-black in high-temperature shock compression. // Journal of Superhard Materials 2009, v. 31, no. 5, pp. 311–317.
2. Sekine T., He H., Kobayashi T., Zhang Ming, and Xu Fangfan. Shock-induced transformation of β - Si_3N_4 to high-pressure cubic-spinel phase. // Appl. Phys. Letters. 2000, v. 76, no. 25, pp. 3706–3708.
3. Yunoshev A.S. Shock Wave Synthesis of Cubic Silicon Nitride. // Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2004, v. 40, no. 3, pp. 370–373.

СВАРКА ВЗРЫВОМ: ПРОЦЕССЫ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ, НЕ ИМЕЮЩИХ ВЗАИМНОЙ РАСТВОРИМОСТИ (ЖЕЛЕЗО-СЕРЕБРО)

А.Ю. Волкова, Б.А. Гринберг, А.В. Иноземцев

Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: Alyonka_wolf@mail.ru

Сварка взрывом – это явление прочного соединения соударяющихся под некоторым углом поверхностей металлических тел, по крайней мере, одно из которых разгоняется до скоростей 150–1000 м/с продуктами детонации взрывчатого вещества. Центральной проблемой сварки является перемешивание в переходной зоне вблизи границы раздела. Особенно остро эта проблема стоит для свариваемых пар, имеющих ограниченную взаимную растворимость. Для изучения этой проблемы были выбраны серебро и железо, которые в жидком состоянии образуют несмешивающиеся взвеси.

Параметры сварки взрывом: $\gamma = 15,6^\circ$, $V_k = 1910$ м/с, $V_c = 520$ м/с (γ – угол соударения, V_k – скорость точки контакта, V_c – скорость соударения), энергия, затраченная на пластическую деформацию, $W_2 = 0,73$ МДж/м².

Выявлено, что граница соединения является волнообразной и неоднородной: содержит выступы одного металла в другой. Они обеспечивают взаимное проникновение материалов друг в друга. Обнаружены области серого цвета – зоны локального расплавления. ТЭМ исследования показали, что они состоят из частиц железа и возникших при затвердевании сферолитов серебра, имеющих наноразмеры. Предположено, что серая зона – это застывшая «коллоидная система» из двух несмешивающихся фаз: дисперсная фаза – мелкодробленое

вещество (Fe), а дисперсионная среда – Ag. Такое наноструктурирование зоны локального расплавления обеспечивает упрочнение всего соединения. С помощью СЭМ исследования выявлено, что вдоль нерасплавленной части границы имеются частицы серебра внутри полос железа.

Считаем, что наблюдение частиц железа в зонах локального расплавления и частиц серебра внутри полос железа являются результатом фрагментации типа дробления (ФТД). Полагается, что ФТД представляет собой бездиффузионный процесс разбиения на разориентированные микрообъемы. Слабая связь между фрагментами делает возможным повороты и перемещение фрагментов, вылет одного металла в другой.

Плавление серебра происходило не только в серых зонах, но и дальше от границы, о чем свидетельствует обширная дендритная область.

Таким образом, такие процессы, как волнообразование, образование выступов и ФТД определяют получение прочного сварного соединения. Определено, что отсутствие взаимной растворимости не препятствует образованию прочного неразъемного соединения, однако влияет на формирование структуры переходной зоны. Выступы играют роль «гвоздей», сшивающих два металла, а перемешивание происходит в серых зонах.

EXPLOSION WELDING: THE MIXING PROCESS METALS NOT HAVE MUTUAL SOLUBILITY (IRON-SILVER)

A.Yu. Volkova, B.A. Greenberg, A.V. Inozemtsev

Institute of Metal Physics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

E-mail: Alyonka_wolf@mail.ru

Explosion welding is a phenomenon strong connection of surfaces of metals, which collide at an angle, one of which is accelerated to velocities of 150–1000 m/s detonation products of explosives. The central problem of welding is mixing in the transition zone near the interface. Particularly acute this problem is to be welded couples with limited mutual solubility. Silver and iron form immiscible liquid suspension, so they were selected to study this problem.

The parameters of explosion welding were as follows: $\gamma = 15,6^\circ$, $V_k = 1910$ m/s, $V_c = 520$ m/s (γ – the collision angle, V_k – velocity of the contact point, V_c – impact velocity), the energy expended on plastic deformation, $W_2 = 0.73$ MJ/m².

It was revealed that the boundary of a compound is undulating and heterogeneous, contains projections of one metal to another. They provide mutual penetration of material. «Gray areas» is found – the zones of local fusion. TEM studies have shown that they consist of iron particles and spherulites of silver with nanometer. It is suggested that gray area – it's frozen «colloidal system» of two separate phases: a dispersed phase – the finely divided material (Fe), and a dispersion medium – Ag. This nanostructuring zones of local fusion provide hardening of the compound. With the help of SEM studies it's revealed that particles of silver are in bands of iron along unmelted border.

We believe that the observation of iron particles in gray areas and silver particles within the bands of iron are a result of the fragmentation-type cleavage (FTC). It is believed that FTC is a diffusionless process of partitioning on disoriented microvolumes. Weak link between the fragments makes it possible to rotate and move the fragments departure of one metal to another.

Melting of silver was not only in the gray areas, but further from the border, as evidenced by extensive dendritic area.

Thus, processes such as wave formation, the formation of projections and FTC determine to obtain a strong welded joint. It was determined that the lack of mutual solubility does not prevent the formation of strong permanent connection, but the effect on the structure of the transition zone. The projections act as «nails», cross-linking the two metals, and mixing occurs in the gray areas.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Абакумов С.А. 18, 44
Абаржи С. 51
Абросимов С.А. 193
Авдеев К.А. 113
Аверин А.Н. 80
Адарченко В.А. 126
Аддессио Ф.Л. 294
Адуев Б.П. 103, 105, 106, 109, 110
Азизов Э.А. 243
Акимов А.В. 139, 168, 169
Аксенов В.С. 113
Александров В.Л. 310
Александров С.И. 249
Алексеев Н.Н. 244, 265
Алукер Э.Д. 100, 101, 102
Алюшин В.М. 269
Алявдин Д.В. 314
Аминов Ю.А. 69, 72, 73, 74
Ананьин А.В. 75, 86
Андреев А.М. 49, 50
Андреев Н.Е. 134
Аникеев А.В. 142
Анисимов А.Н. 63, 314
Аношин М.А. 204
Антипина Н.Р. 289
Антипин И.А. 335
Антонюк Л.К. 94
Анфалова О.В. 250
Апрелков О.Н. 18
Аринин В.А. 175, 193, 317
Арюткин М.Ю. 39
Астафьев В.В. 206, 239
Аульченко В.М. 71
Афанасьева Н.Г. 274
Афанасьева С.А. 186
Афонин В.И. 159
Ахлюстин И.А. 95
Ахмадиев И.Д. 63, 314
Ахметов А.Р. 139, 168, 169
Ахметов И.З. 114

Б

Бабанов А.В. 301
Баврина А.П. 111
Багаветдинов Н.Г. 96, 97
Багрянский П.А. 142
Бадретдинова Л.Х. 63, 314
Бадюков Д.Д. 207
Бажулин А.П. 193
Базаров П.С. 139, 168, 169, 170, 236
Базогов В.Я. 63, 80, 115, 314
Байдаков В.Г. 180, 181, 224
Байдин Г.В. 158
Байшев А.И. 49, 50
Бак П.А. 139, 168, 169
Балабин С.И. 184, 233
Баландин В.В. 229
Бамбуров В.Г. 245
Барахвостов С.В. 149, 166
Баренбаум А.А. 22

Барнаков Ч.Н. 106
Барышева Н.М. 244, 266
Басс Л.П. 26
Батаев А.А. 212, 213
Батаев И.А. 212, 213
Батазова М.А. 139, 168, 169
Батраков А.М. 139, 168, 169
Баутин С.П. 28, 32, 283
Башуров В.В. 315, 319, 324
Баяндин Ю.В. 194, 231, 295, 326
Бекетов А.Р. 244
Беклемишев А.Д. 141
Беленовский Ю.А. 67, 68, 80, 95, 96
Беликов О.В. 139, 168, 169
Белова Е.Д. 283
Белов Н.Н. 186
Белокрыс-Федотов А.И. 309
Белокуров Г.М. 105, 109
Беломестных О.В. 307
Бельков С.А. 301
Бельхеева Р.К. 227
Беляев С.П. 289
Бисикало Д.В. 300
Бобров К.С. 180
Богатко Т.В. 48
Богданов А.Н. 53
Богданов Р.В. 265, 266, 268
Бойко М.М. 196
Боймельштейн Ю.М. 139, 168, 169
Болтачев Г.Ш. 122
Болховитянов Д.Ю. 139, 168, 169
Большов А.А. 249
Бондаренко С.В. 301
Бордзиловский С.А. 218
Борискин А.С. 41
Бородин И.Н. 189
Борщевский А.О. 233
Бочкарев М.Б. 149, 166
Бояркина А.В. 102
Боярников Д.С. 201
Брагин А.А. 184
Брагин В.А. 83, 84, 216
Брагов А.М. 185, 229
Браун Л.С. 120
Бреднихин С.А. 142, 330
Брезгина Л.П. 236
Бричиков С.А. 184, 201
Бродова И.Г. 187, 203, 206, 239
Брушлинский К.В. 127
Бугаенко И.Л. 49, 233
Бугров С.Ю. 103, 110
Бузин В.Н. 175
Бураков Б.Е. 260
Бурдаков А.В. 141
Бурцев В.В. 18
Бутенко Е.А. 81
Быченков В.Ю. 156
Бычков В.Б. 232
Бычков В.В. 232

В

Вавилова И.Г. 263
 Ваганова Н.А. 315, 329
 Ваганов Н.В. 274
 Вагина В.М. 171
 Важенин А.В. 271, 272, 274, 276, 277
 Важенина Д.А. 274
 Важенин И.А. 271, 276
 Важов В.Ф. 81
 Валешный С.И. 111
 Валиев Х.Ф. 13
 Ван Янпин 23, 195
 Варенникова А.А. 274
 Варфоломеев Д.А. 67, 70, 315, 316
 Василенко А.М. 170
 Васильева Е.Б. 274
 Васин Б.Д. 244
 Ватулин В.В. 301
 Ваулин С.Д. 323
 Вахидов Р.М. 80
 Вахмистров К.С. 39, 41
 Вахмистров Р.С. 317
 Вербицкая О.В. 255, 256, 257, 259
 Веретехина С.В. 41
 Вершинин М.В. 317
 Виденькин М.А. 39, 41
 Вильданов В.Г. 100
 Виноградова Н.И. 215
 Винокуров О.А. 301
 Вихляев Д.А. 137, 159, 160
 Власова А.В. 171
 Власов В.В. 100
 Власов Ю.В. 41
 Волкова А.Ю. 344
 Волков В.М. 80
 Волков И.А. 254
 Волков Н.Б. 122, 149, 166
 Волобуев П.В. 265
 Воробьев А.В. 99, 100
 Воронин М.С. 190
 Воронов В.В. 193
 Воропинов А.А. 307

Г

Габзетдинова Л.Я. 204
 Гавренков С.А. 337
 Гаврилов Д.С. 136, 137, 159, 160
 Гагарин С.В. 307
 Галахов В.Р. 209, 237, 238
 Галинова А.В. 307
 Галицкая Н.В. 307
 Галямова Ю.В. 271, 276
 Гаранжа В.А. 308, 309
 Гаранин В.А. 75
 Гарифуллин Р.Ш. 115
 Гафаров А.М. 171
 Гвоздева Л.Г. 337
 Герасимов А.В. 29
 Гижевский Б.А. 209, 237, 238
 Гладуш Г.Г. 243
 Гладуш М.Г. 119
 Глазырин В.П. 36

Глазырин И.В. 52, 157
 Глазырин С.И. 29, 56
 Глебов В. 7
 Глушков Д.А. 54
 Говрас Е.А. 156
 Голубев А.А. 87
 Голубкова Е.Ф. 296
 Гольшев А.А. 225, 303
 Гольдич А.С. 127
 Гонтаренко А.С. 212
 Горбатов В.И. 182
 Гордеев Д.Г. 218, 296
 Горелов А.М. 251
 Горельский В.А. 34
 Городничев А.В. 324
 Городничев К.Е. 41, 325
 Городнов А.В. 96
 Горохов С.А. 137, 160
 Горошин С. 17
 Горшков А.В. 317
 Горячев И.А. 147
 Горячев Э.Ю. 251
 Графутин В.И. 235
 Грачев А.Н. 100
 Гребенкин К.Ф. 67, 70
 Гречин С.С. 105
 Гречишкина И.Н. 301
 Григорьев А.Н. 232
 Григорьев Е.Г. 19
 Гринберг Б.А. 20, 186, 344
 Гриневич Б.Е. 39
 Гришаева Е.А. 107
 Грэй Дж.Т. 203
 Грязнов В.К. 120, 121
 Грязнов Е.Ф. 196
 Губайдуллин А.Т. 115
 Губарев Ю.Г. 16, 55
 Губченко В.М. 130
 Гударенко Л.Ф. 218, 296
 Гузей Л.С. 262
 Гундырев В.М. 208
 Гурашкин А.Л. 223
 Гуськов С.Ю. 27
 Гюно Дж. 17
 Гютнер Е.И. 271

Д

Давыдова М.М. 206
 Давыдов И.А. 289
 Давыдов Н.Б. 175
 Дарина Л.Н. 255, 256, 257, 258
 Дегтярев А.А. 236
 Дегтярев А.М. 8
 Дегтяренко Л.И. 289
 Деев А.С. 96
 Дементьев О.Н. 318
 Демидов В.С. 87
 Демин В.М. 262
 Дерябин С.Л. 318
 Диесперов В.Н. 53
 Дмитриев Д.А. 136
 Добромислов А.В. 201, 202, 203, 208

Долгирев Ю.С. 244
 Долголева Г.В. 153, 302
 Доровских И.А. 248, 255, 256, 257
 Доросев А.С. 319
 Дрёмов В.В. 176, 180
 Дрямов М.А. 39
 Дубосарский В.Г. 255, 257, 259
 Дудоров А.Е. 21, 131, 151, 189
 Дулатов А.К. 146, 167
 Дулепова А.С. 102
 Дулов А.В. 99, 184, 233
 Душенюк С.А. 84
 Дырда Н.Д. 254
 Дюран О. 200

Е

Еганов К.В. 80
 Егорова А.С. 320
 Егоров А.Г. 82
 Егорова Т.М. 310
 Егоров О.Г. 145
 Егорычев Б.Т. 39
 Егужова М.Ю. 56
 Елисеев А.А. 139, 168, 169
 Елсуков В.П. 34
 Еманов Ф.А. 139, 168, 169
 Ермичев С.Г. 251
 Ермолович Е.И. 64, 86
 Ершов А.П. 76, 78, 91
 Есиков М.А. 213

Ж

Жабыка Л.В. 199, 230
 Жан Чонгью 23
 Жань Шудао 283
 Жаховский В.В. 144
 Жгун Д.В. 81
 Железкин Д.А. 139, 168, 169
 Жеребцов А.Л. 67, 70
 Жерноклева Н.Г. 258
 Жерноклетов М.В. 175
 Жестков Г.Б. 30
 Жиа Зупень 283
 Жилкин А.Г. 300, 338
 Жилиева Н.С. 204, 236
 Жилиев П.А. 320
 Жирнов В.В. 309
 Жмайло В.А. 56
 Жогин И.Л. 71
 Жук В.И. 53
 Жуков А.Н. 211, 226, 343
 Жуков В.Т. 26
 Жумабаева А.Г. 277
 Журавлев Ю.Н. 108

З

Забродина Е.А. 26
 Заволоков Е.В. 138
 Зайков Ю.П. 244, 245
 Зайцева Н.Б. 270
 Зайцев В.В. 270
 Зайцевский А.В. 178, 222, 268
 Залялов А.Н. 142

Замоздра С.Н. 21, 131
 Замураев Д.О. 123, 138
 Замыслов В.Е. 32
 Занора Ю.А. 267
 Зарезина А.С. 278
 Захаров П.П. 290
 Звеков А.А. 103, 104, 107
 Зверев А.С. 100
 Зелепугин А.С. 297
 Зелепугин С.А. 297
 Зельдович В.И. 13, 15, 214, 215, 240
 Зимаков В.П. 133
 Зинченко А.Д. 100, 109
 Змушко В.В. 301
 Зотова А.С. 274
 Зубарев Н.М. 52
 Зубков А.А. 138, 171
 Зубов А.Д. 24, 321
 Зубов М.А. 24, 321
 Зуева Л.М. 307, 310
 Зыков И.Ю. 103, 104
 Зыков П.Г. 244, 265

И

Иванов А.А. 141
 Иванов В.С. 113
 Иванов И.А. 141
 Иванов М.А. 20
 Иванов М.Я. 30, 50, 128, 148, 154, 155
 Иванов Н.В. 142
 Игнатъев Н.Г. 167
 Измайлова Т.Б. 301
 Изутов И.А. 39
 Ильина Е.В. 297
 Ильин В.П. 64, 86, 111, 114
 Ильницкий Д.К. 324
 Ильякова Н.Н. 102
 Имшенник В.С. 26
 Иноземцев А.В. 20, 344
 Иоилев А.Г. 324
 Ионов Г.В. 176, 180, 221
 Иосилевский И.Л. 120, 121
 Исакова П.Б. 338
 Исмагулова С.Е. 310
 Истомин И.А. 267
 Ищенко А.Н. 186

К

Казаков А.Л. 306
 Казаков Д.Н. 232
 Казаковская Т.В. 251
 Казанцева Н.В. 215
 Казеев В.Г. 250
 Какшин А.Г. 136, 137, 159, 160
 Калантаев Д.Б. 274
 Каленский А.В. 103, 104, 107
 Кальганова Н.В. 276
 Кальней Е.Д. 47
 Кандоба И.Н. 284
 Канунова Л.И. 179
 Канцырев А.В. 87
 Капустин И.А. 136
 Караваев А.В. 180

- Караханов С.М. 218
Карачев А.Г. 86
Карачинский С.И. 96, 97
Каргин А.А. 139, 168, 169
Каримов Ф.Х. 264
Карлыханов Н.Г. 123, 320, 343
Карнаухов Е.И. 232
Карпеев А.В. 52, 157
Карпов Д.И. 91
Карташев А.Л. 322, 323
Карташева М.А. 322, 323
Касман Я.А. 263
Катаев В.Н. 39, 41
Кашаев В.А. 111
Кашкаров А.О. 72, 74, 76, 78
Каякин А.А. 218
Ким В.В. 303
Ким Д.А. 153
Кинеловский С.А. 219
Киршанова Е.Н. 41
Киршанов С.И. 175, 179
Киселев А.Б. 306
Киселев А.Н. 95
Киселёв А.Н. 67, 80, 95, 96
Киселев Н.М. 222
Киселев С.П. 32
Климанов В.А. 275
Климашов М.В. 39, 40, 41
Климов Е.Ю. 39, 41
Климов М.И. 293
Климушкин К.Н. 39
Кобяков В.П. 83
Ковалев А.Е. 179
Ковалев Е.О. 236
Коваль А.В. 67, 95
Ковальчук Б.М. 143
Кожевников В.Г. 64, 86
Козелков О.Е. 184, 233
Козель В.В. 67, 80
Козин А.М. 47, 89
Козлова З.Р. 181
Козлова Р.И. 317
Козлов Е.А. 99, 184, 201, 202, 203, 204, 206, 208, 209, 233, 236, 299
Козырева Е.В. 258
Козьмин И.В. 284
Кокшенев В.А. 143
Колдунов С.А. 75, 86, 113
Колесников С.А. 87
Колхидашвили М.Р. 263
Кондратьев А.А. 138
Константинов А.Ю. 185
Корепанов А.А. 139, 168, 169
Корецкий И.Г. 100
Корниенко А.В. 249
Коробейников А.А. 167
Коробова Ю.Л. 114
Королёв П.В. 39, 40, 41, 291
Корчагина А.Н. 190
Косарев А.Н. 139, 168, 169
Косоруков С.Н. 205, 234
Костицын О.В. 67, 68, 72, 73, 74, 80, 95, 96
Костоусова Е.К. 284
Костоусов В.Б. 284
Костюченко В.И. 269
Косяков С.И. 25
Котова О.Г. 52, 157
Котов В.Л. 229
Кочетков И.И. 77
Кочурин Е.А. 52
Кочутин Д.В. 67
Кошелева Е.В. 198, 199, 230
Кошутин Д.А. 324
Краев А.И. 39
Краев В.С. 250
Крайко А.Н. 13
Крапива П.С. 167
Красников В.С. 197, 228
Краснослабодцев Д.А. 34
Красюк И.К. 193
Краюхин А.А. 324
Кречетов А.Г. 100, 101
Кривец В.В. 42
Кривонос О.Л. 18, 44
Кригер В.Г. 103, 107
Кропотов А.И. 315
Крутик М.И. 112
Крутова И.Ю. 283
Крутько В.Р. 317
Крючков Д.В. 193
Ксенофонтов А.И. 262
Кудакина В.А. 211, 226, 343
Куделькин В.Б. 39
Куделькин В.Г. 218, 296
Кудрявцева Л.Н. 308, 309
Кудряшов Н.А. 287, 298
Кузнецов В.А. 133
Кузнецов Г.И. 139, 168, 169
Кузнецов М.Г. 309
Кузнецов Р.А. 266
Кузьмина С.И. 307
Кузьминых В.Ю. 138
Куксин А.Ю. 183, 188
Куленко Я.В. 139, 168, 169
Кулешов А.А. 290
Куликов В.Г. 84
Куликов В.Н. 97
Куликовский Н.Н. 278
Куликовский Р.Н. 278
Кулипанов Г.Н. 71
Куличков С.Н. 25
Кулиш М.И. 92, 113
Купьрин Н.В. 138
Курбатова Е.И. 262
Курепин А.Е. 43
Куриленков Ю.К. 27
Курков А.С. 161, 162
Курмаев Н.Е. 143
Куропатенко В.Ф. 197, 219, 220, 315, 316
Кучко Д.П. 201
Кэнфилд Т.Р. 294

Л

Лабецкий А.Ю. 143
 Лаврентьев Б.Н. 140
 Лавренюк И.В. 197, 343
 Лавров В.В. 87
 Ламзин Д.А. 185
 Лаппа А.В. 278
 Лебедев А.В. 80
 Лебедев П.Д. 285
 Левак К.В. 99
 Левашов П.Р. 134, 151
 Левин В.А. 64, 77, 79
 Левичев Е.Б. 71
 Левкина Е.В. 44
 Левченко В.Д. 135, 147
 Леднев Б.Ю. 68
 Лее Р.В. 7
 Лежнин С.И. 142, 330
 Лейви А.Я. 164
 Лемешко Б.Д. 146, 167
 Ли Кинжон 23, 195
 Липин А.В. 137, 160
 Лисина О.А. 307
 Лисицын В.М. 108
 Ли С.К. 7
 Лисков И.Ю. 105
 Литвиненко И.А. 100
 Литвинов Б.В. 13, 15
 Ли Чинжон 23
 Лобастов С.А. 18
 Лобачевская Н.И. 238
 Лобода Е.А. 136, 137, 159, 160
 Лобода П.А. 123, 124, 125, 126
 Лобойко Б.Г. 67, 68, 80, 95, 96
 Логачев П.В. 139, 168, 169
 Логвиненко А.А. 87
 Логинов И.В. 309, 338
 Ложкин В.С. 213
 Ложков А.А. 277
 Ложников А.Б. 284
 Ломачук Ю.В. 268
 Ломинадзе Дж.Г. 45
 Ломтев А.В. 309
 Ломунов А.К. 185
 Лонзингер Т.М. 266
 Лопаткин А.И. 309
 Лопаткин С.А. 81
 Луазо Дж. 17
 Лукина Е.Ю. 271, 276
 Лукьянчиков Л.А. 72, 73, 74, 76, 78
 Лыков В.А. 137, 158, 160
 Лью Жун 283
 Ляпунова Е.А. 194, 231
 Ляшедько А.Д. 161

М

Маврина Е.А. 317
 Маевский К.К. 219
 Майер А.Е. 151, 165, 189, 197, 228
 Майер П.Н. 151
 Майлс А.Р. 7
 Майорова А.С. 184

Майоров В.П. 112
 Макаров А.Е. 100
 Макаров Ю.М. 18
 Макеева И.Р. 248, 255, 256, 257, 258
 Максименко В.Н. 47
 Малахов Ю.И. 154
 Мали В.И. 212, 213
 Малинин С.А. 81
 Малышев А.Н. 193
 Мальков С.С. 222
 Мальцев Д.А. 101
 Малюгина С.Н. 99, 232, 233
 Мамаев В.К. 155
 Мамышев В.И. 39
 Мануйлович И.С. 64, 77, 79
 Маракулин А.В. 162
 Марков В.В. 64, 77, 79
 Мармышев В.В. 44
 Марсов А.А. 14
 Марченков В.В. 263
 Масленников М.В. 26
 Матвеев А.А. 97
 Матвеев В.З. 251
 Матвеев З.Ю. 324
 Маткин В.А. 99, 100
 Матцев Ю.И. 39
 Махнев А.А. 237
 Медведев В.М. 49, 50
 Медведев С.Н. 113
 Межевов А.Б. 175, 179
 Мезенцев Н.А. 71
 Меньшов И.С. 290, 306
 Мержиевский Л.А. 72, 190
 Месилов В.В. 238
 Милёхин Ю.М. 81, 97
 Милявский В.В. 210
 Минаев И.В. 239
 Мирошкин К.М. 95
 Митрофанов А.Ю. 100, 102
 Митрофанов Е.И. 301
 Михайлов А.Л. 18, 94
 Михайлов Г.Г. 266
 Михайлюкова А.Н. 64, 86
 Михайлюков К.Л. 317
 Мищенко А.В. 306
 Могиленских Д.В. 307, 310
 Модестов Д.Г. 249, 254
 Мозерова Е.Я. 276, 277
 Моисеев А.Н. 275
 Моисеев Н.Я. 326
 Мокеев А.А. 14, 115
 Мокина К.С. 289
 Мокичева Е.С. 137, 160
 Мокрушин С.С. 49, 233
 Молодец А.М. 225, 303
 Морозова А.Г. 266
 Морозов В.А. 83, 216
 Моссэ А.Л. 131
 Мостовщикова Е.И. 237
 Мосягин Н.С. 178
 Мочалова В.М. 87, 92, 93
 Музыря А.К. 13, 15, 72, 73, 74

Мунасыпов Р.Н. 140, 171
 Муханов А.Э. 62
 Мухин С.Л. 100
 Мыггарев С.В. 96
 Мышецкая Е.Е. 290

Н

Нагаев К.А. 149, 166
 Назаров Д.В. 94
 Наймарк О.Б. 187, 191, 194, 231, 295, 326
 Насонов П.А. 214, 239, 240
 Наумов С.И. 237
 Невмержицкий Н.В. 18, 44, 46
 Нелюбина Н.В. 106
 Нигматуллин Ф.Н. 68
 Никитенко Ю.Р. 69
 Никитина Е.В. 196
 Никитин А.П. 104
 Никитин В.А. 309, 338
 Никитин В.Г. 115
 Никитин О.А. 139, 168, 169, 170, 236
 Николаева О.В. 26
 Николаев И.В. 139, 168, 169
 Никулин А.А. 18
 Новиков В.Г. 125, 153
 Новиков Е.В. 271, 272, 276
 Новиков И.В. 249
 Новиков М.Г. 175, 179
 Ногин В.Н. 201
 Номерованная Л.В. 237
 Норман Г.Э. 183
 Нурмухаметов Д.Р. 103, 106, 109, 110

О

Обухов А.Г. 283
 Овечкин А.А. 123, 124, 125, 126
 Овечкина Н.А. 238
 Огарков В.А. 100
 Огородников В.А. 193
 Озеров Е.А. 274, 276
 Олевский Е.А. 19
 Олесницкая К.К. 335
 Ольхов О.В. 204, 299
 Ольховский А.В. 201
 Орлов В.Д. 175
 Орлов Г.В. 287
 Орлов М.Ю. 34, 36
 Орлов Ю.Н. 34, 36
 Осавчук А.Н. 97
 Оськин И.А. 84, 216
 Оттмар А.В. 139, 168, 169

П

Павленко А.В. 49, 50, 99, 184, 192, 232, 233
 Павлов Д.А. 89
 Павлов О.А. 139, 168, 169
 Павлуша И.Н. 317
 Павлюкова Д.В. 212
 Павлюченков Я.Н. 338
 Пайгозин А.Н. 192
 Панкратов Д.Г. 203
 Панова И.Е. 271
 Панов А.Н. 139, 168, 169

Панов К.Н. 193
 Парк Х.-С. 7
 Пахомов А.А. 310
 Пахомов М.А. 48
 Пахомов С.Н. 137, 160
 Пацелов А.М. 186
 Пачков А.А. 139, 168, 169
 Пашинин П.П. 193
 Пашков С.В. 29
 Первушина Н.А. 32
 Перепёлкина А.Ю. 135, 147
 Перешитов В.В. 140
 Перминова Д.В. 32
 Петрассо Р. 7
 Петрова А.Н. 187, 239
 Петровцев А.В. 201, 203, 233
 Петров Ю.В. 83
 Петрунин А.А. 265
 Петрушевич Ю.В. 119
 Печенев Ю.Г. 111
 Пешков В.В. 193
 Пикарь А.С. 39, 40, 41, 291
 Пикуз С.А. 144
 Пинаев А.В. 65, 77, 89
 Пинаев П.А. 89
 Пино Джесси 7
 Пирогов А.М. 263
 Пискунов В.Н. 289
 Пискунов Ю.А. 49, 50
 Пластинин А.В. 91
 Плехов О.А. 187, 194, 231
 Поварницын М.Е. 134
 Погорелко В.В. 294
 Погребов А.И. 109
 Полеева Н.В. 101
 Поликарпова О.Л. 131
 Половников А.А. 18, 44
 Польский О.Г. 270
 Поляков Е.В. 244, 266
 Пономарева Л.М. 258
 Пономарев Л.И. 8
 Поносов Ю.С. 208
 Попов В.В. 112
 Постников В.В. 249
 Поступаев В.В. 141
 Потапов А.А. 310, 311
 Потапов А.В. 123, 137, 138, 159, 160
 Потапов С.В. 317
 Поташников В.А. 100
 Потеряева Е.А. 96, 97
 Потеряев А.И. 237
 Потехина Е.В. 289
 Потехин А.Л. 289, 309, 338
 Починский В.И. 284
 Пресняков Ю.К. 167
 Престон Д.Л. 120
 Прибатурин Н.А. 142
 Приходько В.В. 142
 Прокопьев Е.П. 235
 Просвирнин К.М. 67, 80, 95, 96
 Протас Р.В. 140
 Прохоров Е.С. 90

Проценко С.П. 180, 181
 Прудников Е.Е. 266
 Прууэл Э.Р. 72, 73, 74, 76, 78, 91
 Пунин В.Т. 198, 199, 230
 Пурескин Д.Н. 139, 168, 169
 Пурыгин Н.П. 13
 Пчелинцева С.В. 255, 256, 257, 259
 Пчелинцев М.В. 315, 319, 324
 Пырков Ю.Н. 161

Р

Раевский В.А. 18, 193
 Разумков А.С. 289
 Распопин С.П. 244
 Ратахин Н.А. 143
 Рен Гуову 23
 Роби Х.Ф. 7
 Рогачёва А.И. 211, 343
 Розмей О.Н. 134
 Романова Н.Ю. 258
 Романовская С.Н. 258
 Романов Ю.О. 138
 Рощупкин А.В. 28
 Рубина Л.И. 304, 329
 Рувинский Е.С. 139, 168, 169
 Руднев А.В. 18
 Русаков В.С. 207
 Русаков М.М. 47, 89
 Руссков А.С. 39
 Рыбин В.В. 20, 186
 Рыкованов В.С. 221
 Рыкованов Г.Н. 9
 Рябикина Н.А. 301
 Рябов П.Н. 298
 Рязанцев О.Б. 269

С

Савватимов Г.В. 267
 Савельева Н.В. 295, 326
 Савенков Г.Г. 38, 83, 84, 216
 Савченко А.Н. 87
 Савчин В.В. 131
 Садовничий Д.Н. 81
 Садов А.П. 318
 Садовой А.А. 336
 Садыков И.Ф. 14
 Садыков Н.Р. 155
 Сальников А.С. 115
 Самарин С.И. 269
 Сапожников А.Т. 236
 Сапожников Ф.А. 176
 Сапронова О.В. 296
 Сарапулов С.А. 167
 Сарычева Н.В. 39, 41
 Сасик В.С. 18
 Сатонкина Н.П. 91
 Сафронов К.В. 137, 159, 160
 Свиридов Е.В. 49, 50
 Сдобнов В.И. 100, 109
 Севастьянов А.Б. 64
 Седов С.Ю. 317
 Селемир В.Д. 39
 Селиванова Н.В. 343

Селифанов А.Н. 146
 Сельченкова Н.И. 198, 199, 230
 Семашкин Г.В. 84
 Семенова Л.Е. 271
 Семенова Т.В. 317
 Семенов А.Ю. 193
 Семин М.С. 112
 Сеньковский Е.Д. 18, 44
 Серегин В.Ф. 161
 Серёжкин А.А. 306, 328
 Серов С.Б. 328
 Серов Ю.Л. 128
 Сидорова Е.В. 43
 Силантёва И.Ю. 255, 256, 257
 Симоненко В.А. 34, 244, 246, 247, 254, 255, 257
 Симонов А.Ю. 13, 15
 Синглетон Р.Л. 120
 Синельщиков Д.И. 287
 Сеницкий С.Л. 141
 Скоков В.И. 193
 Скоринова Н.Д. 319
 Скоркин Н.А. 34, 155, 315, 319, 324
 Скотт Х.А. 7
 Скриплев М.И. 265
 Скрипов П.В. 182, 223
 Слесарева А.Н. 52
 Сметанок В.А. 113
 Смирнова Д.Е. 262
 Смирнов Е.Б. 67, 72, 73, 74, 80, 95, 96
 Смирнов Н.А. 123, 126, 176
 Смит А. 7
 Смотрицкий А.А. 182
 Соколов М.А. 194, 231
 Соколов В.П. 255, 256, 257, 259
 Соколов Н.А. 16
 Соколов С.С. 199, 204, 230
 Солар Л. 200
 Солдатов А.В. 210
 Соловей В.А. 263
 Соловьев Н.Г. 133
 Соломянная А.Д. 153
 Сорокин И.А. 138
 Сорокин С.А. 145, 163
 Сотсков Е.А. 18, 44
 Софронов В.Н. 289
 Стариков С.В. 134
 Стародубцев В.А. 142
 Старостенко Д.А. 139, 168, 169
 Старостин А.А. 182, 223
 Старостин А.Н. 119
 Стаценко В.П. 56
 Стегайлов В.В. 62, 183, 320
 Степанова Н.Н. 215
 Степанов С.В. 267
 Столбиков М.Ю. 139, 168, 169, 170
 Страбыкина И.А. 317
 Стрельцов С.И. 250
 Стучебрюхов И.А. 193
 Суворов С.О. 139, 168, 169
 Судаков В.В. 114
 Сулар Л. 176
 Сунгатуллин Р.Р. 142

Супрончук Н.В. 274
 Суров В.В. 288
 Сырчикова Е.Ф. 274
 Сыскова А.А. 307
 Сысков Д.В. 139, 168, 169

Т

Табаченко А.Н. 186
 Тайбинов Н.П. 68
 Тайнов А.И. 310
 Талуц Н.И. 201, 202, 203, 208
 Тан Тъеган 23, 195
 Тараканов В.П. 27, 149, 166
 Таржанов В.И. 99, 100, 109, 201, 203
 Таценко О.М. 41
 Теличко И.В. 99, 100, 201, 203
 Тен К.А. 71, 72, 73, 74, 78
 Терентьева А.О. 102
 Терентьева Л.В. 148
 Терехин А.В. 250
 Терехов В.И. 48
 Тизилов А.С. 82
 Тимофеев О.А. 97
 Тимошенкова О.Р. 149
 Типеев А.О. 180, 224
 Титов А.В. 178, 222, 265, 266, 268
 Титова В.Б. 317
 Титов В.М. 72
 Титов С.Н. 42
 Тищенко А.С. 123, 138
 Ткаченко Б.И. 317
 Ткаченко С.И. 144, 149, 166
 Токарев Ю.Ф. 139, 168, 169
 Толочко Б.П. 71, 73
 Толстоухов П.А. 137, 159, 160
 Толшмяков Д.А. 39, 41
 Торунов С.И. 75, 92, 93
 Торшин А.П. 139, 168, 169
 Торшин Д.В. 137, 158, 160
 Трапезников М.А. 265
 Трикшев А.И. 161
 Тропин Д.А. 66
 Трофимов Д.В. 274
 Трошин В.С. 262
 Турбина А.В. 277
 Тур С.В. 139, 168, 169
 Тяктев А.А. 49, 233

У

Уваров С.В. 194, 206, 231
 Углов А.С. 269
 Ульянов О.Н. 304, 329
 Ульянов А.С. 336
 Ульянов С.А. 305
 Успенский А.А. 285
 Уткин А.В. 87, 92, 93, 113
 Учаев А.Я. 198, 199, 230
 Ушакова О.В. 313
 Ушкова А.А. 307

Ф

Фатькин Г.А. 139, 168, 169
 Федоров А.В. 66, 94, 331

Федоров Ал-др.В. 62
 Филатов С.Ю. 34, 220
 Филимонов М.Ю. 315, 329
 Филиппов А.В. 41
 Финюшин С.А. 94
 Фирсова Г.С. 317
 Фомин Э.В. 265
 Фортгов В.Е. 7, 120, 121, 225
 Френье Дж. 7
 Фридляндер И.Н. 262
 Фролова Н.Л. 310
 Фролова Н.Ю. 13, 15, 214, 240
 Фролов С.А. 142, 330
 Фролов С.В. 44
 Фролов С.М. 61, 113
 Фролов Ф.С. 113
 Фурега Р.И. 103, 106, 109, 110
 Фурсов Ф.И. 143

Х

Хабибуллин М.В. 186
 Хавронин Н.Н. 138, 171
 Хадиева Д.А. 80
 Хайбрахманов С.А. 151
 Хайруллина Н.С. 115
 Хайруллин А.Р. 115
 Хамидуллин Д.И. 115
 Ханин А.Ф. 100
 Хантер А. 294
 Хантулева Т.А. 38
 Хардина Л.В. 204, 236
 Хафизов Р.Р. 140
 Хеестер Р. 7
 Хейфец А.Э. 13, 15, 214, 240
 Хиггинс А.Дж. 17
 Хисамутдинов Г.Х. 111
 Хищенко К.В. 134, 151, 176, 193, 218
 Хмельницкий Д.В. 250
 Хмель Т.А. 331
 Хомская И.В. 13, 214, 215, 240
 Хохлов В.А. 245
 Храмова Е.Ю. 317
 Храмов И.В. 317
 Хренков С.Д. 139, 168, 169
 Хрусталеv В.В. 175
 Хсин В. 7
 Ху Хайбо 23, 195

Ц

Цветков В.Б. 161
 Цветков Е.А. 332
 Цидулко Ю.А. 142
 Ципилев В.П. 110

Ч

Чащин М.А. 304
 Чашухин Д.Н. 274
 Чеботарёва Е.И. 42
 Чен Йонтао 23, 195
 Черемазов В.Е. 170
 Черенкова М.В. 289
 Черенков П.В. 309
 Чернова О.Н. 276

Чернухин Ю.И. 250
 Черных И.В. 54
 Чингина Е.А. 122, 149, 166
 Чмыхова Н.А. 152
 Чудинов В.В. 194, 231
 Чун Х.-К. 7
 Чупраков Е.Е. 292
 Чуразов М.Д. 26

Ш

Шадрин А.А. 123, 124, 126
 Шакин Д.Ю. 270
 Шакиров И.Р. 96, 97
 Шалковский Д.М. 184, 201, 204
 Шамраев А.Л. 123, 138
 Шамраев Б.Н. 301
 Шаповалов В.И. 251
 Шарабура Т.М. 277
 Шарафутдинов М.Р. 73
 Шахов А.А. 205, 234
 Шахрай Д.В. 210, 225, 303
 Швайко В.Н. 101
 Швейкин Г.П. 244
 Шелковенко Т.А. 144
 Шемякин А.Н. 133
 Шестаков А.А. 333
 Шестаков Д.К. 334
 Шестаченко О.Е. 49, 50
 Ши Н.К. 154
 Шипачев А.Н. 297
 Ширинкина И.Г. 239
 Широков А.Е. 142
 Шишлов А.В. 143
 Шишов Н.И. 97
 Шмаков А.Н. 73
 Шмаков В.М. 334
 Шмелев В.А. 289
 Шока И.В. 263
 Шолохов Е.М. 161, 162
 Шорохов Е.В. 187, 214, 215, 239, 240
 Шпекин М.И. 22
 Шубина М.А. 335
 Шубин К.С. 139, 168, 169
 Шуваева Ю.В. 310
 Шувалова Е.В. 204, 299
 Шульгин А.В. 62
 Шульц О.В. 247
 Шумейко А.А. 48

Щ

Щаулов В.В. 154
 Щербакова С.Н. 157
 Щербаков В.Н. 80
 Щиголев Н.Д. 263

Э

Эбель А.А. 165

Ю

Югов Ю.Т. 186
 Юн Чен 70
 Юркин Г.В. 249
 Юрков Д.И. 146

Юров Д.В. 142
 Юсупов Д.Т. 233

Я

Яблонских Т.И. 206, 239
 Яговкина М.А. 260
 Язова Е.Ю. 307
 Якимова М.Н. 315
 Якимов М.Ю. 133
 Якушев В.В. 92, 113, 211, 226, 343
 Яловец А.П. 122, 164, 165, 228, 294
 Ямпольский А.Д. 182, 223
 Ямпольский В.А. 249
 Янилкин А.В. 183, 188
 Янилкин Ю.В. 56, 289, 317
 Яо Лонг 70
 Ярцев П.С. 212

INDEX**A**

Abakumov S.A. 19, 44
 Abarzhi S.I. 51
 Abrosimov S.A. 193
 Achmadiev I.D. 63
 Adarchenko V.A. 127
 Addressio F.L. 295
 Aduiev B.P. 103, 104, 106, 110, 111
 Afanasjeva N.G. 275
 Afanasyeva S.A. 186
 Afonin V.I. 159
 Aiguo Xu 51
 Akhlyustin I.A. 95
 Akhmadiev L.D. 314
 Akhmetov A.R. 169, 170
 Akhmetov I.Z. 114
 Akimov A.V. 168, 169, 170
 Aksenov V.S. 113
 Aleksandrov V.L. 310
 Alexandrov S.I. 249
 Alexeyenko N.N. 244, 265
 Aljavidin D.V. 314
 Aluker E.D. 101, 102
 Aminov Yu.A. 69, 72, 74
 Ananin A.V. 75, 87
 Andreev A.M. 49, 50
 Andreev N.E. 135
 Anfalova O.V. 250
 Anisimov A.N. 63, 314
 Anoshin M.A. 204
 Antipina N.R. 289
 Antonyuk L.K. 94
 Aprelkov O.N. 19
 Arinin V.A. 175, 194, 317
 Aryutkin M.Yu. 39
 Astafiev V.V. 207, 239
 Aulchenko V.M. 71
 Avdeev K.A. 113
 Averin A.N. 81
 Azizov E.A. 243

B

Babanov A.V. 302
 Badretdinova L.Ch. 63, 314
 Badyukov D.D. 207
 Bagavetdinov N.G. 96, 97
 Baidakov V.G. 180, 181, 182, 225
 Baidin G.V. 158
 Baishev A.I. 49, 50
 Bak P.A. 169, 170
 Balabin C.I. 185
 Balandin V.V. 229
 Bamburov V.G. 245
 Barakhvostov S.V. 150, 166
 Barenbaum A.A. 22
 Barnakov Ch.N. 106
 Barysheva N.M. 244, 267
 Bashurov V.V. 315, 319
 Bass L.P. 26
 Bataev A.A. 212, 213
 Bataev I.A. 212, 213
 Batazova M.A. 169, 170
 Batrakov A.M. 169, 170
 Bautin S.P. 28, 33
 Bavrina A.P. 111
 Bayandin Yu.V. 195, 231, 295, 327
 Bazarov P.S. 169, 170, 171, 236
 Bazhulin A.P. 193
 Bazotov V.J. 63, 80, 116, 314
 Beketov A.R. 244
 Beklemisev A.D. 141
 Belenovskiy Yu.A. 67, 69, 81, 95, 96
 Belikov O.V. 169, 170
 Belkheeva R.K. 227
 Bel'kov S.A. 302
 Belokurov G.M. 106, 110
 Belomestnykh O.V. 308
 Belov N.N. 186
 Belyaev S.P. 289
 Bisikalo D.V. 300
 Bobrov K.S. 180
 Bochkarev M.B. 150, 166
 Bogatko T.V. 48
 Bogdanov A.N. 54
 Bogdanov R.V. 265, 266, 268
 Boiko M.M. 196
 Boimelshtein Yu.M. 169, 170
 Bolkhovityanov D.Yu. 169, 170
 Bolshov A.A. 249
 Bondarenko S.V. 302
 Bordzilovsky S.A. 218
 Boriskin A.S. 41
 Borodin E.N. 190
 Borschevsky A.O. 234
 Boyarkina A.V. 102
 Boyarnikov D.S. 201
 Bragin A.A. 184
 Bragin V.A. 84, 85, 217
 Bragov A.M. 185, 229
 Brednikhin S.A. 331
 Brezgina L.P. 236
 Brichikov S.A. 184, 201
 Brodova I.G. 188, 203, 207, 239

Brown L.S. 120
 Brushlinsky K.V. 128
 Bugaenko I.L. 49
 Bugrov S.Ju. 103, 111
 Burakov B.E. 261
 Burdakov A.V. 141
 Burtsev V.V. 19
 Butenko E.A. 81
 Buzin V.N. 175
 Bychenkov V.Yu. 157
 Bychkov V.B. 232
 Bychkov V.V. 232

C

Canfield T.R. 295
 Chaschin M.A. 305
 Chashchuhin D.N. 275
 Chebotareva E.I. 42
 Chen Yongtao 24, 196
 Cheremazov V.E. 171
 Cherenkova M.V. 289
 Cherenkov P.V. 309
 Chernova O.N. 277
 Chernukhin Yu.I. 250
 Chernych I.V. 55
 Chingina E.A. 150, 166
 Chmykhova N.A. 152
 Chudinov V.V. 195, 231
 Chung H.-K. 8
 Chuprakov E.E. 293
 Churazov M.D. 26
 Csipilev V.P. 111

D

Darina L.N. 255, 256, 257, 259
 Davydova M.M. 206
 Davydov I.A. 289
 Davydov N.B. 175
 Deev A.S. 96
 Degtyarenko L.I. 289
 Degtyarev A.M. 9
 Degtyaryov A.A. 236
 Dementyev O.N. 318
 Demidov V.S. 88
 Deryabin S.L. 319
 Devaux X. 210
 Diesperov V.N. 54
 Dmitrov D.A. 136
 Dobromyslov A.V. 201, 202, 203, 208
 Dolgoleva G.D. 303
 Dolgoleva G.V. 153
 Dorosev A.S. 319
 Dorovskikh I.A. 255, 256, 257
 Dorovskokh I.A. 248
 Dossot M. 210
 Dremov V.V. 177, 181
 Dryamov M.A. 39
 Dubosarskiy V.G. 255, 257, 260
 Dudorov A.E. 21, 131, 151, 190
 Dulatov A.K. 147, 167
 Dulepova A.S. 102
 Dulov A.V. 99, 185
 Dushenok S.A. 85

Dyomin V.M. 263
Dyrda N.D. 255

E

Ebel A.A. 165
Eganov K.V. 81
Egorova A.S. 320
Egorov A.G. 82
Egorova T.M. 310
Egorov O.G. 146
Egorychev B.T. 39
Eguzhova M.Yu. 57
Eliseev A.A. 169, 170
Elsukov V.P. 34
Emanov F.A. 169, 170
Ermichev S.G. 252
Ermolovich E.I. 64, 86
Ershov A.P. 76, 79, 92
Esikov M.A. 213

F

Fat'kin G.A. 169, 170
Fedorov Al-dr.V. 63
Fedorov A.V. 66, 94, 332
Filimonov M.Yu. 315, 330
Filippov A.V. 41
Finyushin S.A. 94
Firsova G.S. 317
Fomin E.B. 265
Fortov V.E. 7, 121, 211, 226
Frenje J. 8
Friedlyander I.N. 263
Frolova N.L. 310
Frolova N.Yu. 13, 16, 214, 240
Frolov F.S. 113
Frolov S.A. 331
Frolov S.M. 61, 113
Frolov S.V. 44
Furega R.I. 103, 106, 110, 111
Fursov F.I. 144

G

Gabeztdinova L.Ya. 204
Gafarov A.M. 171
Gagarin S.V. 308
Galakhov V.R. 209, 237, 238
Galinova A.V. 308
Galitskaya N.V. 308
Galyamova Yu.V. 272, 277
Garanin V.A. 75
Garifullin R.Sh. 116
Gavrenkov S.A. 337
Gavrilov D.S. 136, 137, 138, 159, 160
Gerasimov A.V. 30
Gizhevsky B.A. 209, 237, 238
Gladush G.G. 243
Gladush M.G. 119
Glazyrin I.V. 52
Glazyrin S.I. 29, 57
Glazyrin V.P. 37
Glebov V. 8
Glushkov D.A. 55
Goldich A.S. 128

Golubev A.A. 88
Golubkova E.F. 296
Golyshev A.A. 226, 304
Gontarenko A.S. 212
Gordeev D.G. 218, 296
Gorelov A.M. 252
Gorelski V.A. 35
Gorodnichev A.V. 325
Gorodnichev K.E. 42, 326
Gorodnov A.V. 96
Gorokhov S.A. 138, 160
Goroshin S. 18
Gorshkov A.V. 318
Goryachev E.Yu. 252
Goryachev I.A. 148
Govras E.A. 157
Grachev A.N. 100
Grafutin V.I. 235
Gray III G.T. 203
Grebyonkin K.F. 68, 70
Grechin S.S. 106
Grechishkina I.N. 302
Greenberg B.A. 187, 344
Grigoriev A.N. 232
Grigoryev E.G. 19
Grinevich B.E. 39
Grishaeva E.A. 107
Gryaznov E.F. 196
Gryaznov V.K. 121
Guangcai Zhang 51
Gubaidullin A.T. 115
Gubarev Yu.G. 17, 56
Gubchenko V.M. 130
Gudarenko L.F. 218, 296
Gundyreb V.M. 208
Gurashkin A.L. 224
Guskov S.Yu. 27
Guzey L.S. 263
Gvozdeva L.G. 337
Gyutner Y.I. 272

H

Habibullin M.V. 186
Hadiyeva D.A. 80
Heeter R. 8
Higgins A.J. 18
Hsing W. 8
Hu Haibo 23, 24, 196
Huneault J. 18
Hunter A. 295

I

Ignatyev N.G. 167
Ilina E.V. 297
Ilnitskiy D.C. 324
Ilyakova N.N. 102
Ilyin V.P. 64, 86, 111, 114
Imshennik V.S. 26
Inozemtsev A.V. 344
Ionov G.V. 177, 181, 222
Iosilevskiy I.L. 121
Ioylev A.G. 325
Isakova P.B. 338
Ishchenko A.N. 186

Ismagulova S.E. 310
 Istomin I.A. 268
 Ivanov A.A. 141
 Ivanov I.A. 141
 Ivanov M.Ja. 31, 129, 149, 156
 Ivanov N.V. 143
 Ivanov V.S. 113
 Izmailova T.B. 302
 Izutov I.V. 39

J

Jianshi Zhu 51
 Jia Zupeng 283
 Jun Chen 71

K

Kakshin A.G. 136, 137, 138, 159, 160
 Kalantaev D.B. 275
 Kalenskiy A.V. 104, 105, 107
 Kalney E.D. 47
 Kalyganova N.V. 277
 Kandoba I.N. 285
 Kantsyrev A.V. 88
 Kanynova L.I. 179
 Kapustin I.A. 136
 Karachev A.G. 86
 Karachinsky S.I. 96, 97
 Karakhanov S.M. 218
 Karavaev A.V. 181
 Kargin A.A. 169, 170
 Karimov F.H. 264
 Karlykhanov N.G. 124, 320
 Karnaykhov E.I. 232
 Karpeev A.V. 52
 Karpov D.I. 92
 Kartashev A.L. 322
 Kartashev A.L. 323
 Kartasheva M.A. 322, 323
 Kashaev V.A. 111
 Kashkarov A.O. 72, 74, 76, 79
 Kasman N.Ya. 263
 Kataev V.N. 40, 41
 Kayakin A.A. 218
 Kazakov D.N. 232
 Kazakovskaya T.V. 252
 Kazantseva N.V. 215
 Kazeev V.G. 250
 Khafizov R.R. 140
 Khaibrakhmanov S.A. 151
 Khairullina N.S. 115
 Khairullin A.R. 115
 Khamidullin D.I. 115
 Khanin A.F. 100
 Khantuleva E.A. 38
 Khardina L.V. 204, 236
 Khavronin N.N. 139, 172
 Kheifets A.E. 13, 16, 214, 240
 Khisamutdinov G.Kh. 111
 Khischenko K.V. 135, 151, 176, 193, 218
 Khmelnitsky D.V. 250
 Khmel T.A. 332
 Khohlov V.A. 245
 Khomskaya I.V. 13, 214, 216, 240

Khramova E.Yu. 317
 Khramov I.V. 317
 Khrenkov S.D. 169, 170
 Khrustalev V.V. 175
 Kim D.A. 153
 Kim V.V. 304
 Kinelovskij S.A. 219
 Kirshanova E.N. 41
 Kirshanov S.I. 175, 179
 Kiselev A.B. 324
 Kiselev A.N. 67, 81, 95, 96
 Kiselev S.P. 32
 Kiselev Yu.M. 223
 Klimanov V.A. 276
 Klimashov M.V. 40, 41
 Klimov E.Yu. 40, 41
 Klimov M.I. 293
 Klimushkin K.N. 39
 Klir D. 143, 144
 Kobiakov V.P. 83
 Kochetkov I.I. 77
 Koch J.A. 8
 Kochurin E.A. 53
 Kochutin D.V. 68
 Kokshenev V.A. 144
 Koldunov S.A. 75, 87, 114
 Kolesnikov S.A. 88
 Kolhidashvili M.R. 263
 Kondratiev A.A. 139
 Konstantinov A.Yu. 185
 Korchagina A.N. 190
 Korepanov A.A. 169, 170
 Koretsky I.G. 100
 Kornienko A.V. 249
 Korobeynikov A.A. 168
 Korobova Yu.L. 114
 Korolev P.V. 40, 41, 292
 Kosarev A.N. 169, 170
 Kosheleva E.V. 199, 200, 230
 Kosorukov S.N. 205
 Kostitsyn O.B. 74
 Kostitsyn O.V. 67, 69, 72, 74, 81, 95, 96
 Kostousova E.K. 285
 Kostousov V.B. 285
 Kostyuchenko V.I. 270
 Kosyakov S.I. 25
 Kotova O.G. 52
 Kotov V.L. 229
 Koval A.V. 67, 95
 Kovalchuk B.M. 144
 Kovalev A.E. 179
 Koval V.V. 81
 Kovalyov E.O. 236
 Kozelkov O.E. 185
 Kozel V.V. 67
 Kozhevnikov V.G. 64, 86
 Kozin A.M. 47, 89
 Kozlova R.I. 317
 Kozlova Z.R. 182
 Kozlov E.A. 99, 184, 201, 202, 203, 204, 207, 208, 209, 234, 236
 Kozmin I.V. 285

Kozyreva E.V. 259
 Кох Дж.А. 7
 Kraev A.I. 39
 Kraev V.S. 250
 Kraiko A.N. 14
 Krapiva P.S. 167
 Krasnikov V.S. 197, 228
 Krasnoslabodtsev D.A. 34
 Krasnyuk I.K. 193
 Kravarik J. 143, 144
 Krayukhin A.A. 325
 Krechetov A.G. 101, 102
 Kriger V.G. 104, 107
 Krivets V.V. 42
 Krivonos O.L. 19, 44
 Kropotov A.I. 315
 Krutik M.I. 112
 Krut'ko V.R. 317
 Kryuchkov D.V. 194
 Ksenofontov A.I. 263
 Kubes P. 143, 144
 Kuchko D.P. 201
 Kudakina V.A. 211, 226, 343
 Kudelkin V.B. 39
 Kudelkin V.G. 218, 296
 Kudryashov N.A. 288, 298
 Kuksin A.Yu. 183, 189
 Kulenko Ya.V. 169, 170
 Kuleshov A.A. 291
 Kulichkov S.N. 25
 Kulikovskiy N.N. 279
 Kulikovskiy R.N. 279
 Kulikov V.G. 85
 Kulipanov G.N. 71
 Kulish M.I. 92, 114
 Kupyrin N.V. 139
 Kurbatova E.I. 263
 Kurepin A.Ye. 43
 Kurilenkov Yu.K. 27
 Kurkov A.S. 162, 163
 Kurmaev N.E. 144
 Kuropatenko V.F. 198, 220, 316
 Kuzmina S.I. 308
 Kuzminykh V.Y. 139
 Kuznetsov G.I. 169, 170
 Kuznetsov M.G. 309
 Kuznetsov R.A. 266
 Kuznetsov V.A. 133

L

Labetsky A.Yu. 144
 Lamzin D.A. 185
 Lappa A.V. 279
 Lavrentiev B.N. 140
 Lavrenyuk I.V. 198
 Lavrov V.V. 88
 Lebedev A.V. 81
 Lebedev P.D. 286
 Lednev B.Yu. 69
 Lee R.W. 8
 Lemeshko B.D. 147, 167, 168
 Levak K.V. 99

Levashov P.R. 135, 151
 Levchenko V.D. 135, 148
 Levichev E.B. 71
 Levin V.A. 65, 78, 79
 Levkina E.V. 44
 Leyvi A.Ya. 164
 Lezhnin S.I. 331
 Li C.K. 8
 Lipin A.V. 138, 160
 Li Qinzhong 23, 24, 196
 Lisina O.A. 308
 Lisitsyn V.M. 108
 Liskov I.Ju. 106
 Litvinenko I.A. 100
 Litvinov B.V. 13, 16
 Liu Jun 283
 Lobachevskaya N.I. 238
 Lobastov S.A. 19
 Loboda E.A. 136, 137, 138, 159, 160
 Loboda P.A. 124, 125, 126
 Loboiko B.G. 67, 69, 81, 95, 96
 Logachev P.V. 140, 169, 170
 Loginov I.V. 309, 339
 Logvynenko A.A. 88
 Loiseau J. 18
 Lolgirev Y.S. 244
 Lomachuk Yu.V. 268
 Lominadze J.G. 45
 Lomtev A.V. 309
 Lomunov A.K. 185
 Lopatkin A.I. 309
 Lopatkin S.A. 81
 Lozhkin V.S. 213
 Lozhkov A.A. 278
 Lozhnikov A.B. 285
 Lozinger T.M. 267
 Lukina E.Yu. 272, 277
 Lukyanchikov L.A. 72, 74, 76, 79
 Lyapunova E.A. 195, 231
 Lyashedko A.D. 161
 Lykov V.A. 138, 158, 160

M

Maevskij K.K. 219
 Makarov A.E. 100
 Makarov Yu.M. 19
 Makeeva I.R. 248, 255, 256, 257, 258
 Makhnev A.A. 237
 Maksimenko V.N. 47
 Malinin S.A. 81
 Mali V.I. 212, 213
 Mal'kov S.S. 223
 Maltsev D.A. 102
 Malyshev A.N. 194
 Malyugina S.N. 99, 232
 Mamaev V.K. 156
 Mamyshv V.I. 39
 Manuylovich I.S. 65, 78, 79
 Marakulin A.V. 163
 Marchenkov V.V. 263
 Markov V.V. 65, 78, 79
 Marmyshev V.V. 44

Marsov A.A. 15
 Mases M. 210
 Maslennikov M.V. 26
 Matkin V.A. 99, 100
 Matsev Yu.I. 39
 Matveev V.Z. 252
 Mavrina E.A. 317
 Mayer A.E. 151, 165, 190, 197, 228
 Mayer P.N. 151
 Mayorova A.S. 185
 Mayorov V.P. 112
 Mcrae E. 210
 Medvedev S.N. 113
 Medvedev V.M. 49, 50
 Men'shov I.S. 290
 Merzhievsky L.A. 72, 190
 Mesilov V.V. 238
 Mezentsev N.A. 71
 Mezhenov A.B. 175, 179
 Mikhailov A.L. 19, 94
 Mikhailyukova A.I. 64, 86
 Mikhaylov G.G. 267
 Mikhaylyukov K.L. 317
 Milekhin Yu.M. 81
 Miles A.R. 8
 Milyavsky V.V. 210
 Minaev I.V. 239
 Miroshkin K.M. 95
 Mitrofanov A.Y. 101, 102
 Mitrofanov E.I. 302
 Mochalova V.M. 88, 92, 93
 Modestov D.G. 249, 255
 Mogilenskikh D.V. 308, 310
 Moiseev A.N. 276
 Moiseev N.Ya. 326
 Mokeev A.A. 15, 116
 Mokicheva E.S. 138, 160
 Mokina K.S. 289
 Mokrushin S.S. 49
 Molodets A.M. 211, 226, 304
 Morozova A.G. 267
 Morozov V.A. 84, 217
 Mosse A.L. 132
 Mostoshchikova E.V. 237
 Mosyagin N.S. 178
 Mozerova E.Ya. 277, 278
 Mukhanov A.E. 62
 Mukhin S.L. 100
 Munasyrov R.N. 140, 172
 Musyra A.K. 16
 Muzyrya A.K. 13, 72, 74
 Myshetskaya E.E. 291
 Mytarev S.V. 96

N

Nagayev K.A. 150, 166
 Naimark O.B. 188, 191, 195, 231, 295, 327
 Nasonov P.A. 214, 239, 240
 Naumov S.V. 237
 Nazarov D.V. 94
 Nelyubina N.V. 106
 Nevmerzhitskiy N.V. 19, 44, 46

Nigmatulin F.N. 69
 Nikitenko Y.R. 69
 Nikitina E.V. 196
 Nikitin A.P. 105
 Nikitin O.A. 169, 170, 171, 236
 Nikitin V.A. 309, 339
 Nikitin V.G. 115
 Nikolaeva O.V. 26
 Nikolaev I.V. 169, 170
 Nikulin A.A. 19
 Nogin V.N. 201
 Nomerovannaya L.V. 237
 Norman G.E. 183
 Novikov E.V. 272, 273, 277
 Novikov I.V. 249
 Novikov M.G. 175, 179
 Novikov V.G. 125, 153
 Nurmukhametov D.R. 103, 106, 110, 111

O

Ogarkov V.A. 100
 Ogorodnikov V.A. 194
 Olevsky E.A. 19
 Olkhov O.V. 204
 Olkhovsky A.V. 201
 Orlov G.V. 287
 Orlov M.Yu. 35, 37
 Orlov V.D. 175
 Orlov Yu.N. 35, 37
 Oskin I.A. 85, 217
 Ottmar A.V. 169, 170
 Ovechkin A.A. 124, 125, 126
 Ovechkina N.A. 238
 Ozerov E.A. 275, 277

P

Pachkov A.A. 169, 170
 Paigozin A.N. 192
 Pakhomov A.A. 311
 Pakhomov M.A. 48
 Pakhomov S.N. 138, 160
 Pankratov D.G. 203
 Panova I.E. 272
 Panov A.N. 169, 170
 Panov K.N. 194
 Park H-S. 8
 Pashinin P.P. 193
 Pashkov S.V. 30
 Patselov A.M. 187
 Pavlenko A.V. 49, 50, 99, 185, 192, 232
 Pavlov D.A. 89
 Pavlov O.A. 169, 170
 Pavlusha I.N. 317
 Pavlyuchenkov Ya.N. 338
 Pavlyukova D.V. 212
 Pchelintseva S.V. 255, 256, 257, 260
 Pchelintsev M.V. 315, 319
 Pechenev Yu.G. 111
 Perepyolkina A.Yu. 135, 148
 Pereshitov V.V. 140
 Perminova D.V. 33
 Pervushyna N.A. 33
 Peshkov V.V. 194

Petrasso R. 8
 Petrova A.N. 188, 239
 Petrovtsev A.V. 201, 203, 234
 Petrov Y.V. 84
 Petrunin A.A. 265
 Petrushevich Yu.V. 119
 Pikar A.S. 40, 41, 292
 Pinaev A.V. 66, 77, 90
 Pinaev P.A. 90
 Pino Jesse 8
 Pirogov A.M. 263
 Piskunov V.N. 289
 Piskunov Yu.A. 49, 50
 Plastinin A.V. 92
 Plekhov O.A. 188, 195, 231
 Pochinskii V.I. 285
 Pogorelko V.V. 294
 Pogrebov A.I. 109
 Poleeva N.V. 102
 Polovnikov A.A. 19, 44
 Polsky O.G. 271
 Polyakov E.V. 244, 267
 Ponomareva L.M. 259
 Ponomarev L.I. 9
 Ponosov Yu.S. 208
 Popov V.V. 112
 Postnikov V.V. 249
 Postupaev V.V. 141
 Potapov A.A. 311, 312
 Potapov A.V. 124, 138, 139, 159, 160
 Potapov S.V. 317
 Potashnikov V.A. 100
 Potekhina E.V. 289
 Potekhin A.L. 289, 309, 339
 Poterayev A.I. 237
 Poteryaeva E.A. 96, 97
 Povarnitsyn M.E. 135
 Presnyakov Yu.K. 168
 Preston D.L. 120
 Prokhorov E.S. 91
 Prokopev E.P. 235
 Prosvirnin K.M. 67, 81, 95, 96
 Protas R.V. 140
 Protsenko S.P. 181, 182
 Prudnikov E.E. 266
 Pruel E.R. 72, 73, 74, 76, 79, 92
 Punin V.T. 199
 Pureskin D.N. 169, 170
 Purygin N.P. 13
 Pyrkov Y.N. 162

R

Raevsky V.A. 19, 194
 Raspopin S.P. 244
 Ratakhin N.A. 144
 Raybikina N.A. 302
 Razumkov A.S. 289
 Ren Guowu 24
 Rezac K. 143, 144
 Robey H.F. 8
 Rogacheva A.I. 211, 226, 343
 Romanova N.Yu. 258

Romanovskaya S.N. 259
 Romanov Y.O. 139
 Roshchupkin A.V. 28
 Rosmej O.N. 135
 Rubina L.I. 305, 329
 Rudenko V.V. 313
 Rudnev A.V. 19
 Rusakov M.M. 47, 89
 Rusakov V.S. 207
 Russkov A.S. 40
 Ruvinsky E.S. 169, 170
 Ryabov P.N. 298
 Ryazantsev O.B. 270
 Rybin V.V. 187
 Rykovanov G.N. 9
 Rykovanov V.S. 222

S

Sadikov I.F. 15
 Sadov A.P. 319
 Sadovnichii D.N. 81
 Sadovoy A.A. 337
 Sadykov N.R. 155
 Safonov K.V. 159
 Safronov K.V. 138, 160
 Salnikov A.S. 116
 Samarin S.I. 270
 Sapozhnikov A.T. 236
 Sapozhnikov F.A. 177
 Sapronova O.V. 296
 Sarapulov S.A. 168
 Sarycheva N.V. 40, 41
 Sasik V.S. 19
 Satonkina N.P. 92
 Sauchyn V.V. 132
 Savchenko A.N. 88
 Savelieva N.V. 295, 327
 Savenkov G.G. 38, 84, 85, 217
 Savvatimov G.V. 268
 Saykov Y.P. 244
 Scorinova N.D. 319
 Scorkin N.A. 155, 319
 Scott H.A. 8
 Sdobnov V.I. 100, 109
 Sedov S.Yu. 317
 Sel'chenkova N.I. 199, 200, 230
 Selemir V.D. 40
 Selifanov A.N. 147
 Semashkin G.V. 85
 Semenova L.E. 272
 Semenova T.V. 317
 Semenov A.Yu. 193
 Semin M.S. 112
 Senkovskiy E.D. 19, 44
 Seregin V.F. 161
 Serezhkin A.A. 328
 Serov S.B. 328
 Serov Yu.L. 129
 Sevast'yanov A.B. 64
 Shadrin A.A. 124, 126
 Shakhov A.A. 205
 Shakhray D.V. 211, 226, 304

Shakin D.Yu. 271
 Shakirov I.R. 96, 97
 Shalkovsky D.M. 184, 201, 204
 Shamraev A.L. 124, 139
 Shamraev B.N. 302
 Shapovalov V.I. 252
 Sharabura T.M. 278
 Sharafutdiniv M.R. 74
 Shavrin M.E. 179
 Shchigolev N.D. 263
 Shemyakin A.N. 133
 Shestachenko O.E. 49, 50
 Shestakov A.A. 334
 Shestakov D.K. 334
 Shipachev S.N. 297
 Shirinkina I.G. 239
 Shirokov A.E. 143
 Shishlov A.V. 144
 Shmakov A.N. 74
 Shmakov V.M. 335
 Shmelev V.A. 289
 Shoka I.V. 263
 Sholokhov E.M. 162, 163
 Shorokhov E.V. 188, 214, 215, 239, 240
 Shpekin M.I. 22
 Shubin K.S. 169, 170
 Shulgin A.V. 63
 Shultz O.V. 247
 Shumeiko A.A. 48
 Shuvaeva Yu.V. 310
 Shuvalova E.V. 204
 Shvayko V.N. 102
 Shveykin G.P. 244
 Sidorova Ye.V. 43
 Silantieva I.J. 255, 256
 Silantiyeva I.Yu. 257
 Simonenko V.A. 34, 244, 246, 247, 254, 255, 257
 Simonov A.Yu. 13, 16
 Sinelschikov D.I. 288
 Singleton R.L. 120
 Sinitsky S.I. 141
 Skokov V.I. 194
 Skorkin N.A. 315
 Skriplev M.I. 265
 Skripov P.V. 224
 Slesareva A.N. 52
 Smetanyuk V.A. 113
 Smirnova D.E. 262
 Smirnov E.B. 67, 72, 74, 81, 95, 96
 Smirnov N.A. 124, 126, 176
 Smith A. 8
 Sofronov V.N. 289
 Sokolov N.A. 17
 Sokolov S.S. 200, 204, 230
 Sokolov V.P. 255, 256, 257, 260
 Sokovikov M.A. 195, 231
 Soldatov A.V. 210
 Solomyannaya A.D. 153
 Solovei V.A. 263
 Solovyov N.G. 133
 Sorokin S.A. 139, 145, 164
 Sotskov E.A. 19, 44

Soulard L. 177
 Starikov S.V. 134
 Staroctenko D.A. 170
 Starodubtsev V.A. 143
 Starostenko D.A. 169
 Starostin A.A. 224
 Starostin A.N. 119
 Statsenko V.P. 57
 Stegailov V.V. 62, 183, 320
 Stepanova N.N. 215
 Stepanov S.V. 268
 Stolbikov M.Yu. 169, 170, 171
 Strabykina I.A. 317
 Streltsov S.I. 250
 Stuchebryukhov I.A. 193
 Sudakov V.V. 114
 Sugatullin R.R. 143
 Supronchuk N.V. 275
 Surov V.S. 288
 Suvorov S.O. 169, 170
 Sviridov E.V. 49, 50
 Syrchikova E.A. 274
 Syskova A.A. 308
 Syskov D.V. 169, 170

T

Tabachenko A.N. 186
 Taibinov N.P. 69
 Tainov A.I. 310
 Taluts N.I. 201, 202, 203, 208
 Tang Tiegang 23, 24, 196
 Tarakanov V.P. 27, 150, 166
 Tarzhanov V.I. 99, 100, 109, 201, 203
 Tatsenko O.M. 41
 Telichko I.V. 99, 100, 201, 203
 Ten K.A. 71, 72, 73, 74, 79
 Terekhin A.V. 250
 Terekhov V.I. 48
 Terentyeva A.O. 102
 Terentyeva L.V. 149
 Timofeev O.A. 97
 Timoshenkova O.R. 150
 Tipeev A.O. 180, 181, 225
 Tischenko A.S. 124, 139
 Titova I.V. 317
 Titov A.V. 178, 223, 265, 266, 268
 Titov S.N. 42
 Titov V.M. 73
 Tizilov A.S. 82
 Tkachenko B.I. 317
 Tkachenko S.I. 150, 166
 Tokarev Yu.F. 169, 170
 Tolochko B.P. 71, 74
 Tolshmyakov D.A. 40, 41
 Tolstoukhov P.A. 138, 159, 160
 Tommasini R. 8
 Torshin A.P. 169, 170
 Torshin D.V. 138, 158, 160
 Totunov S.I. 75, 92, 93
 Томасини Р. 7
 Трапезников М.А. 265
 Trikshev A.I. 162
 Trochin V.S. 263

- Trofimov D.V. 275
Tropin D.A. 66
Tscherbakov V.N. 81
Tsvetkov E.A. 162, 333
Tsvetkov V.B. 161
Turbina A.V. 278
Tur S.V. 169, 170
Tyaktev A.A. 49
- U**
- Uchaev A.Ya. 199, 200, 230
Uglov A.S. 270
Ul'yanov A.S. 337
Ulyanov O.N. 305, 329
Ulyanov S.A. 306
Ushakova O.V. 313
Uspenskiy A.A. 286
Utkin A.V. 88, 92, 93, 114
Uushkova A.A. 308
Uvarov S.V. 195, 206, 231
- V**
- Vaganova N.A. 315, 330
Vaganov N.V. 275
Vagenin A.V. 272
Vagenin I.A. 272
Vagina N.M. 171
Vajenin A.V. 273
Vakhmistrov K.S. 40, 41
Vakhmistrov R.S. 317
Valeshny S.I. 111
Valiyev Kh.F. 14
Varennikova A.A. 275
Varfolomeev D.A. 68, 70, 316
Vasilenko A.M. 171
Vasilieva E.B. 274
Vasin B.D. 244
Vatulin V.V. 302
Vaulin S.D. 323
Vavilova I.G. 263
Vazhenina D.A. 275
Vazhenin A.V. 275, 277, 278
Vazhenin I.A. 277
Vazhov V.F. 81
Verbitskaya O.V. 255, 256, 257, 260
Veretekhina S.V. 41
Vershinin M.V. 317
Videnkin M.A. 40, 41
Vikhlyaev D.A. 138, 159, 160
Vikhlyaev D.A.
Vildanov V.G. 100
Vinogradova N.I. 215
Vinokurov O.A. 302
Vlasova A.B. 171
Vlasov V.V. 100
Vlasov Yu.V. 41
Volkova A.Yu. 344
Volkov I.A. 254
Volkov N.B. 150, 166
Volkov V.M. 81
Volobuyev P.V. 265
Vorobyev A.V. 99, 100
Voronin M.S. 190
- Voronov V.V. 193
Voropinov A.A. 307
- W**
- Wahidov R.M. 80
Waldbock J. 210
Wang Yanping 23, 196
- X**
- Xijun Yu 51
- Y**
- Yablonskikh T.I. 207, 239
Yagovkina M.A. 261
Yakimova M.N. 316
Yakimov M.Yu. 133
Yakushev V.V. 92, 114, 211, 226, 343
Yalovets A.P. 164, 165, 228, 294
Yampol'skiy A.D. 224
Yampolsky V.A. 249
Yanilkin A.V. 183, 189
Yanilkin Yu.V. 57, 289, 317
Yao Long 71
Yartsev P.S. 212
Yazova E.Yu. 308
Yugov N.T. 186
Yurkin G.V. 249
Yurkov D.I. 147
Yusupov D.T. 234
- Z**
- Zabrodina E.A. 26
Zaitsevsky A.V. 178, 223, 268
Zakharov P.P. 290
Zalyalov A.N. 143
Zamozdra S.N. 21, 131
Zamuraev D.O. 124, 139
Zamyslov V.E. 33
Zanora Ya.A. 268
Zarezina A.S. 279
Zavolokov E.V. 139
Zaykov Y.P. 245
Zaytseva N.B. 271
Zaytsev V.V. 271
Zeldovich V.I. 13, 16, 214, 216, 240
Zelepugin A.S. 297
Zelepugin S.A. 297
Zernokletov M.V. 175
Zhabyka L.V. 200, 230
Zhang Chongyu 23
Zhang Shudao 283
Zhelezkin D.A. 169, 170
Zherebtsov A.L. 68, 70
Zhernokletov M.V. 179
Zhernokleva N.G. 259
Zhestkov G.B. 31
Zhgun D.V. 81
Zhilkin A.G. 300, 338
Zhilyaev P.A. 320
Zhilyayeva N.S. 204, 236
Zhironov V.V. 309
Zhmailo V.A. 57
Zhogin I.L. 71

Zhukov A.N. 211, 226, 343
Zhukov V.T. 26
Zhuk V.I. 54
Zhumabayeva A.G. 278
Zhuravlev Yu.N. 108
Zimakov V.P. 133
Zinchenko A.D. 100, 109
Zmushko V.V. 302
Zocher M.A. 203, 228
Zotova A.S. 275

Zubarev M.N. 53
Zubkov A.A. 139, 172
Zubov A.D. 24, 321
Zubov M.A. 24, 321
Zueva L.M. 308, 310
Zvekov A.A. 104, 105, 107
Zverev A.S. 101
Zykov I.Yu. 104, 105
Zykov P.G. 244, 265

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ PLENARY SESSION

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ПЛАЗМЫ НА ЗЕМЛЕ И В КОСМОСЕ	7
<i>V.E. Fortov</i>	
EXTREME STATES OF PLASMAS ON THE EARTH AND IN COSMOS	7
<i>V.E. Fortov</i>	
ЧИСЛОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОНКОСТЕННЫХ КАПСУЛ НАПОЛНЕННЫХ DHe ³ С ПРЯМЫМ ОБЖАТИЕМ	7
<i>A.P. Майлс, Х.-К. Чун, Р. Хеетер, В. Хсин, Дж.А. Кох, Р.В. Лее, Х-С. Парк, Джессе Пино, Х.Ф. Роби, Х.А. Скотт, А. Смит, Р. Томасини, Дж. Френье, С.К. Ли, Р. Петрассо, В. Глебов</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF THIN SHELL DIRECT DRIVE DHe ³ FILLED CAPSULES	8
<i>A.R. Miles, H.-K. Chung, R. Heeter, W. Hsing, J.A. Koch, R.W. Lee, H-S. Park, Jesse Pino, H.F. Robey, H.A. Scott, A. Smith, R. Tommasini, J. Frenje, C.K. Li, R. Petrasso, V. Glebov</i>	
СЛОЖНЕЙШИЕ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ: ОТ ТЕРМОЯДЕРНОГО ЗАЖИГАНИЯ ДО ЭКЗА-ВЫЧИСЛЕНИЙ	8
<i>Д. Кузнецов</i>	
CHALLENGES IN PREDICTION: FROM IGNITION TO EXASCALE	8
<i>Dimitri Kusnezov</i>	
ЖИДКО-СОЛЕВОЙ РЕАКТОР – ПЕРЕЖИГАТЕЛЬ С БЫСТРЫМ СПЕКТРОМ НЕЙТРОНОВ	8
<i>А.М. Десярев, Л.И. Пономарев</i>	
MOLTEN SALT REACTOR (MSR) WITH THE FAST NEUTRON SPECTRUM	9
<i>A.M. Degtyarev, L.I. Ponomarev</i>	
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РФЯЦ–ВНИИТФ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЕЙ ЭНЕРГИИ	9
<i>Г.Н. Рыкованов</i>	
RFNC-VNIITF RESEARCH IN THE AREA OF HIGH ENERGY DENSITY PHYSICS	9
<i>G.N. Rykovanov</i>	

СЕКЦИЯ 1. ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ, КУМУЛЯТИВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ТУРБУЛЕНТНОСТЬ SECTION 1. HIGH-INTENSITY PROCESSES, CUMULATIVE PHENOMENA AND TURBULENCE

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ КУМУЛЯЦИИ ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ШАРОВ С ПОМОЩЬЮ ФИГУР АЛЬТШУЛЕРА	13
<i>В.И. Зельдович, Н.Ю. Фролова, А.Э. Хейфец, И.В. Хомская, Б.В. Литвинов, Н.П. Пурьгин, А.К. Музыря, А.Ю. Симонов</i>	
STUDY OF CUMULATION PHENOMENON AT EXPLOSIVE LOADING OF METAL BALL BY MEANS OF THE ALTSHULER'S FIGURES	13
<i>V.I. Zeldovich, N.Yu. Frolova, A.E. Kheifets, I.V. Khomskaaya, B.V. Litvinov, N.P. Purygin, A.K. Muzyrya, A.Yu. Simonov</i>	
ДАЛЬНЕЙШЕЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ОТ ЦЕНТРА СИММЕТРИИ С ИЗМЕНЕНИЕМ ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ НА ОТРАЖЕННОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЕ	13
<i>Х.Ф. Валиев, А.Н. Крайко</i>	
FURTHER EXAMINATION OF THE REFLECTION OF THE SHOCK WAVE FROM THE CENTRE OF SYMMETRY WITH ADIABATIC EXPONENT CHANGE ON THE REFLECTED SHOCK WAVE.	14
<i>A.N. Kraiko, Kh.F. Valiyev</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ С МЕТАЕМЫМИ АКТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ	14
<i>А.А. Мокеев, А.А. Марсов, И.Ф. Садыков</i>	
INVESTIGATION OF CUMULATIVE CHARGES WITH HURLLED ACTIVE ELEMENTS	15
<i>А.А. Mokeev, A.A. Marsov, I.F. Sadikov</i>	
КУМУЛЯЦИИ ЭНЕРГИИ ПРИ ДОДЕКАЭДРИЧЕСКОМ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ ШАРОВЫХ ОБРАЗЦОВ	

ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ	15
<i>В.И. Зельдович, Н.Ю. Фролова, А.Э. Хейфец, Б.В. Литвинов, А.К. Музыря, А.Ю. Симонов</i>	
ENERGY CUMULATION AT DODECAHEDRAL EXPLOSIVE LOADING OF SPHERICAL STAINLESS STEEL SAMPLES	16
<i>V.I. Zeldovich, N.Yu. Frolova, A.E. Kheifets, B.V. Litvinov, A.K. Musyra, A.Yu. Simonov</i>	
К УСТОЙЧИВОСТИ ИНЕРЦИОННОГО СХЛОПЫВАНИЯ ОБОЛОЧЕК, НАПОЛНЕННЫХ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТЬЮ	16
<i>Ю.Г. Губарев, Н.А. Соколов</i>	
ON THE STABILITY OF INERTIAL COLLAPSE OF SHELLS FILLED WITH A VISCOUS FLUID	17
<i>Yu.G. Gubarev, N.A. Sokolov</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РАЗРАБОТКА ГИПЕРЗВУКОВОЙ ПУСКОВОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ КУМУЛЯТИВНОЙ ВЗРЫВНОЙ УДАРНОЙ ТРУБЫ.	17
<i>Дж. Луазо, Дж. Гюно, А.Дж. Хиггинс, С. Горошин</i>	
EXPERIMENTAL DEVELOPMENT OF A HYPERVELOCITY LAUNCHER EMPLOYING A CUMULATIVE EXPLOSIVE SHOCK TUBE	18
<i>J. Loiseau, J. Huneault, A.J. Higgins, S. Goroshin</i>	
МИКРОСКОПИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫБРОСА ЧАСТИЦ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ УДАРНО-НАГРУЖЕННОГО СВИНЦА.	18
<i>Н.В. Невмержицкий, А.Л. Михайлов, В.А. Раевский, В.С. Сасик, Ю.М. Макаров, Е.А. Сотсков, А.В. Руднев, В.В. Бурцев, С.А. Лобастов, А.А. Никулин, Е.Д. Сеньковский, С.А. Абакумов, О.Л. Кривонос, А.А. Половников, О.Н. Априлков</i>	
MICROSCOPIC ELECTRON-OPTICAL RECORDING OF PARTICLE EJECTA FROM FREE SURFACE OF SHOCK-LOADED LEAD	19
<i>N.V. Nevmerzhitskiy, A.L. Mikhailov, V.A. Raevskiy, V.S. Sasik, Yu.M. Makarov, E.A. Sotskov, A.V. Rudnev, V.V. Burtsev, S.A. Lobastov, A.A. Nikulin, E.D. Senkovskiy, S.A. Abakumov, O.L. Krivonos, A.A. Polovnikov, O.N. Aprelkov</i>	
ЛОКАЛИЗАЦИЯ ТЕПЛА ПРИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ КОНСОЛИДАЦИИ ПОРОШКОВ.	19
<i>Е.Г. Григорьев, Е.А. Олевский</i>	
HEAT LOCALIZATION DURING ELICTRIC PULSE POWDER CONSOLIDATION	19
<i>E.G. Grigoryev, E.A. Olevsky</i>	
ПРОЦЕССЫ ФРАГМЕНТАЦИИ, ПЕРЕМЕШИВАНИЯ И РАСПЛАВЛЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ	20
<i>Б.А. Гринберг, М.А. Иванов, В.В. Рыбин, А.В. Иноземцев</i>	
FRAGMENTATION, MIXING AND MELTING PROCESSES DURING EXPLOSION WELDING	21
<i>B.A. Greenberg, M.A. Ivanov, V.V. Rybin, A.V. Inozemtsev</i>	
ОБ УСЛОВИЯХ ФРАГМЕНТАЦИИ ПРОТОЗВЕЗДНЫХ ОБЛАКОВ	21
<i>А.Е. Дудоров, С.Н. Замоздра</i>	
ABOUT FRAGMENTATION CONDITIONS OF PROTOSTELLAR CLOUDS	21
<i>A.E. Dudorov, S.N. Zamozdra</i>	
О ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПОСЛЕДЕЙСТВИЯХ ПАДЕНИЙ КРУПНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ	22
<i>А.А. Баренбаум, М.И. Шпекин</i>	
ABOUT THE TECTONIC AFTEREFFECTS OF FALLINGS LARGE COSMIC BODIES	22
<i>A.A. Varenbaum, M.I. Shpekin</i>	
ДИНАМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ РАСПЛАВЛЕННОГО И ТВЕРДОГО МЕТАЛЛОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПАДАЮЩИХ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН.	23
<i>Жан Чонгью, Ху Хайбо, Тан Тьеган, Ван Янпин, Ли Кинжон</i>	
DYNAMIC BEHAVIOR OF MOLTEN AND SOLID METALS DRIVEN BY HEAD-ON DETONATION WAVES	23
<i>Zhang Chongyu, Hu Haibo, Tang Tiegang, Wang Yanping, Li Qinzong</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫБРОСОВ (ПЫЛЕНИЯ) НА ПОВЕРХНОСТИ СВИНЦА	23
<i>Чен Йонтао, Ху Хайбо, Тан Тьеган, Рен Гуову, Ли Чинжон</i>	
EXPERIMENTAL STUDY OF EJECTA ON LEAD SURFACE.	24
<i>Chen Yongtao, Hu Haibo, Tang Tiegang, Ren Guowu, Li Qingzhong</i>	
ОБ УНИВЕРСАЛЬНОСТИ И МНОГООБРАЗИИ ТЕЧЕНИЙ С ОДНОРОДНОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ НА ПРИМЕРЕ ИДЕАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ	24
<i>А.Д. Зубов, М.А. Зубов</i>	

ABOUT UNIVERSALITY AND VARIETY OF FLOWS WITH HOMOGENEOUS DEFORMATION ON THE EXAMPLE IDEAL MAGNETIC GASDYNAMICS	24
<i>A.D. Zubov, M.A. Zubov</i>	
ПАРАДОКСЫ СИЛЬНЫХ ВЗРЫВНЫХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ	25
<i>С.Н. Куличков, С.И. Косяков</i>	
PARADOXES OF THE STRONG BLAST WAVES IN ATMOSPHERE	25
<i>S.N. Kulichkov and S.I. Kosyakov</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБРИДНОЙ МИШЕНИ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ТЯЖЕЛОИОННОГО СИНТЕЗА С УЧЕТОМ НЕЙТРОННО-ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ	26
<i>Л.П. Басс, В.Т. Жуков, Е.А. Забродина, В.С. Имшенник, М.В. Масленников, О.В. Николаева, М.Д. Чуразов</i>	
SIMULATION OF THE HYBRID TARGET OF INERTIAL HEAVY ION FUSION AND NEUTRON-INDUCED FISSION	26
<i>L.P. Bass, V.T. Zhukov, E.A. Zabrodina, V.S. Imshennik, M.V. Maslennikov, O.V. Nikolaeva, M.D. Churazov</i>	
ЯДЕРНЫЙ DD СИНТЕЗ В СХЕМЕ С ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ УДЕРЖАНИЕМ НА ОСНОВЕ НАНОСЕКУНДНОГО ВАКУУМНОГО РАЗРЯДА С PD АНОДОМ	27
<i>Ю.К. Курilenков, С.Ю. Гуськов, В.П. Тараканов</i>	
ON DD SYNTHESIS AT INERTIAL ELECTROSTATIC CONFINEMENT SCHEME BASED ON NANOSECOND VACUUM DISCHARGE WITH DEUTERIUM-LOADED PD ANODE	27
<i>Yu.K. Kurilenkov, V.P. Tarakanov, S.Yu. Guskov</i>	
ОБ ОДНОЙ КОНСТРУКЦИИ МИШЕНИ И ВОЗМОЖНЫХ РАСЧЕТАХ ЕЕ СЖАТИЯ.	28
<i>С.П. Баутин, А.В. Роцупкин</i>	
ABOUT ONE CONSTRACTION OF THE TARGET AND POSSIBLE CALCULATIONS OF IT COMPRESSION	28
<i>S.P. Bautin, A.V. Roshchupkin</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ В СВЕРХНОВЫХ ТИПА IA	29
<i>С.И. Глазырин</i>	
STUDY OF BURNING IN SUPERNOVA IA	29
<i>S.I. Glazyrin</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ ОТ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ УДАРНИКОВ МЕТАЕМЫМИ ИМ НАВСТРЕЧУ ПЛАСТИНАМИ И СТЕРЖНЯМИ.	29
<i>А.В. Герасимов, С.В. Пашков</i>	
NUMERICAL MODELING OF PROTECTION OBJECT FROM HIGH-VELOCITY ELEMENTS THROWING TOWARDS PLATES AND RODS	30
<i>A.V. Gerasimov, S.V. Pashkov</i>	
О МОДЕЛИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ТРАКТЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ НАЛИЧИИ ИНТЕНСИВНОГО ПОТОКА ИЗЛУЧЕНИЯ	30
<i>Г.Б. Жестков, М.Я. Иванов</i>	
ON THE WORKING PROCESS MODEL IN A HIGH TEMPERATURE GAS TURBINE ENGINE WITH INTENSIVE RADIATION FLUX.	31
<i>М.И. Иванов, Г.В. Жестков</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В НАНОЧАСТИЦАХ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ	32
<i>С.П. Киселев</i>	
NUMERICAL MODELING OF FRACTURE OF THE METAL NANOCOMPOSITES UNDER DYNAMICAL LOADS	32
<i>S.P. Kiselev</i>	
АНАЛИТИКО-ЧИСЛЕННОЕ ПРИБЛИЖЕННОЕ ОПИСАНИЕ ТЕЧЕНИЙ СЖИМАЕМОГО ВЯЗКОГО ТЕПЛОПРОВОДНОГО ГАЗА.	32
<i>С.П. Баутин, В.Е. Замыслов, Н.А. Первушина, Д.В. Перминова</i>	
ANALYTICAL AND NUMERICAL APPROXIMATE DESCRIPTION OF FLOWS OF COMPRESSIBLE VISCOUS HEAT-CONDUCTIVE GAS	33
<i>S.P. Bautin, V.E. Zamylov, N.A. Pervushina, D.V. Perminova</i>	
МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАДЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ В ВОДНУЮ АКВАТОРИЮ	34
<i>В.А. Симоненко, Н.А. Скоркин, С.Ю. Филатов</i>	

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОЛКНОВЕНИЯ АСТЕРОИДА С ЗЕМЛЕЙ.	34
<i>Д.А. Краснослабодцев, В.П. Елсуков, В.А. Симоненко</i>	
SIMULATION OF AN ASTEROID IMPACT ON EARTH.	34
<i>D.A. Krasnoslabodtsev, V.P. Elsukov, V.A. Simonenko</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОГО КОМПАКТИРОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ.	34
<i>В.А. Горельский, М.Ю. Орлов, Ю.Н. Орлов</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF DYNAMIC POWDER MATERIALS COMPACTING	35
<i>V.A. Gorelski, M.Yu. Orlov, Yu.N.Orlov</i>	
РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ПРОБИТИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ПРЕГРАД ПОЛУОБОЛОЧЕЧНЫМИ УДАРНИКАМИ.	36
<i>В.П. Глазырин, М.Ю. Орлов, Ю.Н. Орлов</i>	
NUMERICAL CALCULATION OF THE PERFORATION INHOMOGENEOUS PLATE BY PROJECTILES.	37
<i>V.P. Glazyrin, M.Yu. Orlov, Yu.N.Orlov</i>	
САМОСОГЛАСОВАННАЯ НЕЛОКАЛЬНО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПРОНИКАНИЯ УДЛИНЕННЫХ УДАРНИКОВ В ПРОЧНЫЕ ПРЕГРАДЫ.	38
<i>Г.Г. Савенков, Т.А. Хантулева</i>	
SELF-CONSISTENT NONLOCAL HYDRODYNAMIC MODEL OF THE ELONGATED IMPACTORS PENETRATION INTO SOLID BARRIERS	38
<i>G.G. Savenkov, E.A. Khantuleva</i>	
СЕМЕЙСТВО ДИСКОВЫХ ВМГ С ПЛОСКИМИ ДИСКОВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ.	39
<i>М.Ю. Арюткин, Б.Е. Гриневич, М.А. Дрямов, Б.Т. Егорычев, В.Б. Куделькин, А.И. Краев, К.Н. Климушкин, В.И. Мамышев, Ю.И. Матцев</i>	
A FAMILY OF DISK EMG WITH FLAT DISK ELEMENTS.	39
<i>M.Yu. Aryutkin, B.E. Grinevich, M.A. Dryatov, B.T. Egorychev, V.B. Kudelkin, A.I. Kraev, K.N. Klimushkin, V.I. Matyshev, Yu.I. Matsev</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД НА ОСНОВЕ ДИСКОВОГО ВМГ Ø 250 мм ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ НАГРУЖЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ЛАЙНЕРАМИ	39
<i>М.Ю. Арюткин, Б.Е. Гриневич, М.А. Дрямов, И.А. Изутов, В.Б. Куделькин, А.И. Краев, К.Н. Климушкин, В.И. Мамышев, Ю.И. Матцев</i>	
EXPERIMENTAL TEST BENCH ON THE BASIS OF DISK EMG Ø 250 мм TO STUDY PROPERTIES OF MATERIALS UNDER CONDITIONS OF LOADING BY CYLINDRICAL LINERS	39
<i>M.Yu. Aryutkin, B.E. Grinevich, M.A. Dryatov, B.T. Egorychev, I.V. Izutov, V.B. Kudelkin, A.I. Kraev, K.N. Klimushkin, V.I. Matyshev, Yu.I. Matsev</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ МОБИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПУШКИ	39
<i>К.С. Вахмистров, М.А. Виденькин, В.Н. Катаев, М.В. Климашов, Е.Ю. Климов, П.В. Королёв, А.С. Пикарь, А.С. Руссков, Н.В. Сарычева, В.Д. Селемир, Д.А. Толшмяков</i>	
EXPERIMENTAL RESEARCH OF POSSIBILITY OF MOBILE ELECTROMAGNETIC LAUNCHER CREATION	40
<i>K.S. Vakhmistrov, M.A. Videnkin, V.N. Kataev, M.V. Klimashov, E.Yu. Klimov, P.V. Korolev, A.S. Pikar, A.S. Russkov, N.V. Sarycheva, V.D. Selemir, D.A. Tolshmyakov</i>	
БАЛАНС ЭНЕРГИИ В РЕЛЬСОВЫХ И КОАКСИАЛЬНЫХ УСКОРИТЕЛЯХ МАКРОТЕЛ	40
<i>М.В. Климашов, П.В. Королёв, А.С. Пикарь</i>	
ENERGY BALANCE IN RAIL AND COAXIAL LAUNCHERS	40
<i>M.V. Klimashov, P.V. Korolev, A.S. Pikar</i>	
ПЕРЕКРЫТИЕ ВАКУУМНЫХ КАНАЛОВ ВЫВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ	41
<i>А.С. Борискин, К.С. Вахмистров, С.В. Веретехина, М.А. Виденькин, Ю.В. Власов, В.Н. Катаев, Е.Н. Киришанова, М.В. Климашов, Е.Ю. Климов, П.В. Королёв, А.С. Пикарь, Н.В. Сарычева, О.М. Таценко, Д.А. Толшмяков, А.В. Филиппов</i>	
OVERLAPPING OF RADIATION COUPLING VACUUM CHANNELS.	41
<i>A.S. Boriskin, K.S. Vakhmistrov, S.V. Veretekhina, M.A. Videnkin, Yu.V. Vlasov, V.N. Kataev, E.N. Kirshanova, M.V. Klimashov, E.Yu. Klimov, P.V. Korolev, A.S. Pikar, N.V. Sarycheva, O.M. Tatsenko, D.A. Tolshmyakov, A.V. Filippov</i>	

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЛИНЕЙНАЯ ТЕОРИЯ РАЗВИТИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В СЛОИСТЫХ СИСТЕМАХ	41
<i>К.Е. Городничев</i>	
ANALYTICAL LINEAR THEORY OF INHOMOGENEITIES IN SANDWICH-TYPE SYSTEMS	42
<i>К.Е. Gorodnichev</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ЗОНЫ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ГАЗОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕСТАЦИОНАРНОГО СЖАТИЯ В ЗАКРЫТОЙ ТРУБЕ	42
<i>В.В. Кривец, Е.И. Чеботарёва, С.Н. Титов</i>	
EXPERIMENTAL STUDY OF MIXING ZONE EVOLUTION IN GASES BY THE ACTION OF UNSTEADY COMPRESSION IN A CLOSED TUBE	42
<i>V.V. Krivets, E.I. Chebotareva, S.N. Titov</i>	
ЯВЛЕНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ТИПА РИХТМАЙЕРА-МЕШКОВА ПРИ МНОГОКРАТНОМ ВОЛНОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ	43
<i>А.Е. Куретин, Е.В. Сидорова</i>	
PHENOMENON OF RICHTMYER-MESHKOV-TYPE INSTABILITY AT MULTIPLE WAVE IMPACT	43
<i>А.Е. Kuretin, Ye.V. Sidorova</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА НА ПРОЦЕСС ПЕРЕХОДА НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ТУРБУЛЕНТНУЮ СТАДИЮ	44
<i>Н.В. Невмержицкий, Е.А. Сотсков, Е.Д. Сеньковский, О.Л. Кривonos, А.А. Половников, Е.В. Левкина, С.В. Фролов, С.А. Абакумов, В.В. Мармышев</i>	
STUDY OF THE REYNOLDS NUMBER EFFECT ON THE PROCESS OF INSTABILITY TRANSITION INTO THE TURBULENT STAGE	44
<i>N.V. Nevmerzhitskiy, E.A. Sotskov, E.D. Sen'kovskiy, O.L. Krivonos, A.A. Polovnikov, E.V. Levkina, S.V. Frolov, S.A. Abakumov, V.V. Marmyshev</i>	
«ПОПЕРЕНЫЙ НЕЛИНЕЙНЫЙ КАСКАД» – ОСНОВА ПОДДЕРЖАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В СДВИГОВЫХ ТЕЧЕНИЯХ.	45
<i>Дж.Г. Ломинадзе</i>	
«CROSS CASCADE» – BASIS OF MAINTENANCE OF TURBULENCE IN SHEAR FLOWS	45
<i>J.G. Lominadze</i>	
НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ И ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЯХ.	46
<i>Н.В. Невмержицкий</i>	
SOME PECULIARITIES OF TURBULENT MIXING GROWTH AND PERTURBATIONS AT HYDRODYNAMIC INSTABILITIES	46
<i>N.V. Nevmerzhitskiy</i>	
ТУРБУЛЕНТНОСТЬ ПОТОКА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ДВС	47
<i>Е.Д. Кальней, А.М. Козин, В.Н. Максименко, М.М. Русаков</i>	
FLOW TURBULENCE IN ENGINE COMBUSTION CHAMBER	47
<i>E.D. Kalney, A.M. Kozin, V.N. Maksimenko, M.M. Rusakov</i>	
ВЛИЯНИЕ ИСПАРЯЮЩИХСЯ КАПЕЛЬ НА ТУРБУЛЕНТНОСТЬ И ТЕПЛООБМЕН В ДВУХФАЗНОМ ОТРЫВНОМ ПОТОКЕ	48
<i>Т.В. Богатко, М.А. Пахомов, В.И. Терехов, А.А. Шумейко</i>	
THE EFFECT OF EVAPORATING DROPLETS ON TURBULENCE AND HEAT TRANSFER IN A TWO-PHASE SEPARATED FLOW	48
<i>T.V. Bogatko, M.A. Pakhomov, V.I. Terekhov, A.A. Shumeiko</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ВЕЩЕСТВА В ЗОНЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ГАЗОВ, ВЫЗВАННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТЬЮ РИХТМАЙЕРА-МЕШКОВА	49
<i>А.В. Павленко, А.А. Тягтев, О.Е. Шестаченко, Ю.А. Пискунов, С.С. Мокрушин, Е.В. Свиридов, А.М. Андреев, В.М. Медведев, А.И. Байшев, И.Л. Бугаенко</i>	
EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SUBSTANCE VELOCITY DISTRIBUTION IN THE GASES TURBULENT MIXING ZONE INDUCED BY RICHTMYER-MESHKOV INSTABILITY	49
<i>A.V. Pavlenko, A.A. Tyaktev, O.E. Shestachenko, Yu.A. Piskunov, S.S. Mokrushin, E.V. Sviridov, A.M. Andreev, V.M. Medvedev, A.I. Baishev, I.L. Bugaenko</i>	

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕТЕРОГЕННОСТИ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО «ЛАЗЕРНОГО ЛИСТА»	50
<i>А.В. Павленко, О.Е. Шестаченко, Ю.А. Пискунов, Е.В. Свиридов, А.М. Андреев, В.М. Медведев, А.И. Байшев</i>	
EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF TURBULENT MIXING HETEROGENEITY USING HORIZONTAL «LASER SHEET»	50
<i>A.V. Pavlenko, O.E. Shestachenko, Yu.A. Piskunov, E.V. Sviridov, A.M. Andreev, V.M. Medvedev, A.I. Baishev</i>	
ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОМАСШТАБНОГО МЕТОДА ПРЯМОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ДВИЖЕНИЯ	50
<i>М.Я. Иванов</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ КЕЛЬВИНА-ГЕЛЬМГОЛЬЦА НА МОДЕЛИ РЕШЕТКИ БОЛЬЦМАНА: РОЛЬ ГРАДИЕНТОВ СКОРОСТИ И ПЛОТНОСТИ	50
<i>Айгуо Сю, Гуаньсяй Жан, Сижун Ю, Жианши Жу</i>	
LATTICE BOLTZMANN STUDY ON KELVIN-HELMHOLTZ INSTABILITY: THE ROLES OF VELOCITY AND DENSITY GRADIENTS	51
<i>Aiguo Xu, Guangcai Zhang, Xijun Yu, Jianshi Zhu</i>	
НЕЛИНЕЙНОЕ РАЗВИТИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЙ-ТЕЙЛОРА В ОБЛАСТИ С КОНЕЧНЫМ РАЗМЕРОМ	51
<i>С. Абаржи</i>	
NONLINEAR EVOLUTION OF RAYLEIGH-TAYLOR INSTABILITY IN A FINITE DOMAIN	51
<i>S.I. Abarzhi</i>	
ДВУМЕРНЫЕ ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОНЫ НАЧАЛЬНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА УСТАНОВКЕ МУТ	52
<i>И.В. Глазырин, А.В. Карпеев, О.Г. Котова, А.Н. Слесарева</i>	
2D NUMERICAL SIMULATION OF INITIAL TURBULENT ZONE FORMATION ON MUT FACILITY	52
<i>I.V. Glazyrin, A.V. Karpeev, O.G. Kotova, A.N. Slesareva</i>	
ДИНАМИКА ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ ВО ВНЕШНЕМ ВЕРТИКАЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ	52
<i>Н.М. Зубарев, Е.А. Кочурин</i>	
DYNAMICS OF THE INTERFACE OF DIELECTRIC FLUIDS IN AN EXTERNAL VERTICAL ELECTRIC FIELD.	53
<i>N.M. Zubarev, E.A. Kochurin</i>	
СОЛИТОНЫ В ТРАНСЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ. ОСНОВАНИЯ К УТОЧНЕНИЮ КЛАССИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ.	53
<i>А.Н. Богданов, В.Н. Диеперов, В.И. Жук</i>	
THE SOLITONS IN TRANSONIC BOUNDARY LAYER. THE PREMISES TO MODIFICATION OF CLASSICAL MODEL.	54
<i>A.N. Bogdanov, V.N. Diesperov, V.I. Zhuk</i>	
ОЦЕНКА ОТКЛЮЧАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ В РЕЖИМЕ КОММУТАЦИИ МАЛЫХ ТОКОВ С УЧЕТОМ ТУРБУЛЕНТНОГО ДВИЖЕНИЯ ГАСЯЩЕЙ СРЕДЫ (SF ₆)	54
<i>Д.А. Глушков, И.В. Черных</i>	
ESTIMATION OF THE CURRENT BREAKING PERFORMANCE OF HIGH VOLTAGE CIRCUIT BREAKER IN SMALL CURRENT INTERRUPTION PROCESSES TAKING INTO ACCOUNT TURBULENT MOTION ARC QUENCHING MEDIUM (SF ₆)	55
<i>D.A. Glushkov, I.V. Chernych</i>	
К ДЛИННОВОЛНОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ УСТАНОВИВШИХСЯ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТЕЧЕНИЙ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ СО СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЕЙ В ПОЛЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ	55
<i>Ю.Г. Губарев</i>	
ON THE LONG-WAVE INSTABILITY OF STEADY-STATE PLANE-PARALLEL FLOWS OF AN IDEAL FLUID WITH A FREE BOUNDARY IN THE FIELD OF GRAVITY.	56
<i>Yu.G. Gubarev</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАВИТАЦИОННОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В ПРИСУТСТВИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ	56
<i>М.Ю. Егужова, С.И. Глазырин, В.А. Жмайло, В.П. Стаценко, Ю.В. Янилкин</i>	
STUDY OF GRAVITATIONAL MIXING WITH MAGNETIC FIELD	57
<i>M.Yu. Eguzhova, S.I. Glazyrin, V.A. Zhmailo, V.P. Statsenko, Yu.V. Yanilkin</i>	

СЕКЦИЯ 2. ВЗРЫВНЫЕ И ДЕТОНАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ
SECTION 2. EXPLOSION AND DETONATION PHENOMENA

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОФАЗНЫХ РЕАГИРУЮЩИХ ТЕЧЕНИЙ И ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕТОНАЦИИ В ИХФ РАН.	61
<i>С.М. Фролов</i>	
MATHEMATICAL MODELLING OF MULTIPHASE REACTING FLOWS AND HETEROGENEOUS DETONATIONS IN SEMENOV INSTITUTE OF CHEMICAL PHYSICS	61
<i>S.M. Frolov</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕАДИАБАТИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ	62
<i>А.Э. Муханов, В.В. Стегайлов</i>	
MODELING OF NON-ADIABATIC TRANSITIONS IN ENERGETIC MATERIALS	62
<i>A.E. Mukhanov, V.V. Stegailov</i>	
ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЕ И МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАВЛЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ МЕТАЛЛОВ.	62
<i>А.В. Федоров, А.В. Шульгин</i>	
PHENOMENOLOGICAL AND MOLECULAR DYNAMIC SIMULATION OF METAL NANOPARTICLES MELTING	63
<i>A.V. Fedorov, A.V. Shulgin</i>	
УЧЕТ КЛАСТЕРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	63
<i>Л.Х. Бадретдинова, И.Д. Ахмадиев, А.Н. Анисимов, В.Я. Базотов</i>	
THE ACCOUNT CLUSTER INTERACTIONS IN QUANTUM-CHEMICAL MODELS FORECASTING OF SENSITIVITY OF ENERGETIC MATERIALS	63
<i>L.Ch. Badretdinova, I.D. Achmadiev, A.N. Anisimov, V.J. Bazotov</i>	
КОЭФФИЦИЕНТЫ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ В ФОРМЕ JWЛ ДЛЯ РЯДА ВЗРЫВЧАТЫХ МАТЕРИАЛОВ	64
<i>Е.И. Ермолович, В.П. Ильин, В.Г. Кожевников, А.И. Михайлюкова, А.Б. Севастьянов</i>	
COEFFICIENTS OF DETONATION PRODUCTS EQUATION OF STATE IN JWЛ FORM FOR A SERIES OF EXPLOSIVE MATERIALS	64
<i>E.I. Ermolovich, V.P. Ilyin, V.G. Kozhevnikov, A.I. Mikhailyukova, A.B. Sevast'yanov</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯЧЕЙСТОЙ ДЕТОНАЦИИ В ПРОСТРАНСТВЕ.	64
<i>В.А. Левин, И.С. Мануйлович, В.В. Марков</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF CELLULAR DETONATION IN SPACE	65
<i>V.A. Levin, I.S. Manuylovich, V.V. Markov</i>	
ОСНОВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ПУЗЫРЬКОВОЙ ДЕТОНАЦИИ, ПОПЫТКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ	65
<i>А.В. Пинаев</i>	
BASIC EXPERIMENTAL RESULTS ON BUBBLE DETONATION, ATTEMPT TO MODEL	66
<i>A.V. Pinaev</i>	
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДАВЛЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ ОБЛАКОМ ИНЕРТНЫХ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ	66
<i>А.В. Федоров, Д.А. Тропин</i>	
MATHEMATICAL MODELING OF DETONATION SUPPRESSION BY CLOUD OF INERT SOLID PARTICLES	66
<i>A.V. Fedorov, D.A. Tropin</i>	
АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ АДИАБАТЫ РАСШИРЕНИЯ ПВ НА ОСНОВАНИИ ДАННЫХ ПО РАЗЛЕТУ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК	67
<i>А.В. Коваль, Е.Б. Смирнов, Б.Г. Лобойко, О.В. Костицын, Ю.А. Беленовский, К.М. Просвирнин, А.Н. Киселёв, В.В. Козель</i>	
ANALYTICAL METHOD TO CONSTRUCT THE EXPLOSION PRODUCTS EXPANSION ADIABAT USING DATA ON CYLINDRICAL SHELLS SCATTERING	67
<i>A.V. Koval, E.B. Smirnov, B.G. Loboiko, O.V. Kostitsyn, Yu.A. Belenovsky, K.M. Prosvirnin, A.N. Kiselev, V.V. Kozel</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ ФЛЕГМАТИЗИРОВАННОГО ТЭНА	67
<i>Д.А. Варфоломеев, К.Ф. Гребёнкин, А.Л. Жеребцов, Д.В. Кочутин</i>	

PHLEGMATIZED PETN DETONATION MODEL	68
<i>D.A. Varfolomeev, K.F. Grebenkin, A.L. Zhrebtsov and D.V. Kochutin</i>	
ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ РАЗЛОЖЕНИЯ ПРЕССОВАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	68
<i>Ф.Н. Нигматуллин, Б.Г. Лобойко, О.В. Костицын, Н.П. Тайбинов, Ю.А. Беленовский, Б.Ю. Леднев</i>	
GENERALIZED DECOMPOSITION MODEL OF THE PRESSED ENERGY MATERIALS	69
<i>F.N. Nigmatullin, B.G. Loboiko, O.V. Kostitsyn, N.P. Taibinov, Yu.A. Belenovskiy, B.Yu. Lednev</i>	
РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЗОНЫ РЕАКЦИИ НИЗКОПЛОТНОГО ТАТБ.	69
<i>Ю.Р. Никитенко, Ю.А. Аминов</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF REACTION ZONE STRUCTURE FOR LOW-DENSITY TATB	69
<i>Y.R. Nikitenko, Y.A. Aminov</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДА УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ДЕТОНАЦИОННУЮ ВО ВЗРЫВЧАТОМ СОСТАВЕ НА ОСНОВЕ ТАТБ	70
<i>Д.А. Варфоломеев, К.Ф. Гребёнкин, А.Л. Жеребцов</i>	
MODELING OF SHOCK-TO-DETONATION TRANSITION IN THE TATB-BASED EXPLOSIVE	70
<i>D.A. Varfolomeev, K.F. Grebyonkin, A.L. Zhrebtsov</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАСТИЧНОГО ВВ	70
<i>Юн Чен, Яо Лонг</i>	
THE NUMERICAL SIMULATION STUDY ON THE DYNAMIC BEHAVIORS OF PBX EXPLOSIVE	71
<i>Jun Chen, Yao Long</i>	
НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДИАГНОСТИКИ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 100-ПОЛЮСНОГО СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ВИГГЛЕРА НАКОПИТЕЛЯ ВЭПП-4	71
<i>Б.П. Толочко, И.Л. Жогин, Н.А. Мезенцев, Е.Б. Левичев, Г.Н. Кулипанов, В.М. Аульченко, К.А. Тен</i>	
NEW POSSIBILITIES IN DIAGNOSTICS OF DETONATION PROCESSES AT THE SYNCHROTRON RADIATION STATION OF THE 100-POLE SUPERCONDUCTIVE WIGGLER OF THE VEPP-4 STORAGE RING.	71
<i>B.P. Tolochko, I.L. Zhogin, N.A. Mezentsev, E.B. Levichev, G.N. Kulipanov, V.M. Aulchenko, K.A. Ten</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЕТОНАЦИОННОГО ТЕЧЕНИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ ПД ПО ДАННЫМ СИНХРОТРОННОЙ ДИАГНОСТИКИ	72
<i>К.А. Тен, Э.Р. Прууэл, А.О. Кашкаров, Л.А. Лукьянчиков, Л.А. Мерзиевский, Ю.А. Аминов, Е.Б. Смирнов, А.К. Музыря, О.В. Костицын</i>	
CHARACTERIZATION OF DETONATION FLOW AND VERIFICATION OF THE EQUATION OF STATE OF DETONATION PRODUCTS PERFORMED USING SYNCHROTRON DATA	72
<i>К.А. Тен, Е.Р. Pрууел, А.О. Kashkarov, L.A. Lukuanchikov, L.A. Merzhievskiy, Yu.A. Aminov, E.B. Smirnov, А.К. Музыря, О.В. Kostitsyn</i>	
КОНДЕНСАЦИЯ УГЛЕРОДА ПРИ ДЕТОНАЦИИ БТФ	72
<i>В.М. Титов, К.А. Тен, Э.Р. Прууэл</i>	
CONDENSATION OF CARBON UNDER BENZOTRIFUROXANE DETONATION	73
<i>V.M. Titov, K.A. Ten, E.R. Prueel</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТАТБ ДИФРАКЦИОННЫМИ МЕТОДИКАМИ	73
<i>К.А. Тен, Э.Р. Прууэл, Л.А. Лукьянчиков, Б.П. Толочко, М.Р. Шарафутдинов, А.Н. Шмаков, Ю.А. Аминов, А.К. Музыря, О.В. Костицын, Е.Б. Смирнов</i>	
DIFFRACTION METHODS TO INVESTIGATE TATB	74
<i>К.А. Тен, Э.Р. Pрууел, Л.А. Lukuanchikov, B.P. Tolochko, M.R. Sharafutdiniv, A.N. Shmakov, Yu.A. Amonov, A.K. Muzyrya, O.V. Kostitsyn, E.B. Smirnov</i>	
СИНХРОТРОННАЯ ДИАГНОСТИКА ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИИ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ В ЗАРЯДАХ НА ОСНОВЕ ТАТБ	74
<i>К.А. Тен, Э.Р. Прууэл, А.О. Кашкаров, Л.А. Лукьянчиков, Ю.А. Аминов, Е.Б. Смирнов, А.К. Музыря, О.В. Костицын</i>	
SYNCHROTRON DIAGNOSTICS OF DETONATION INITIATION BY A SHOCK WAVE IN TATB-BASED CHARGES.	74
<i>К.А. Тен, Е.Р. Pрууел, А.О. Kashkarov, L.A. Lukuanchikov, Yu.A. Aminov, E.B. Smirnov, A.K. Muzyrya, O.V. Kostitsyn</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СМЕСЕЙ НИТРОМЕТАНА С НЕВЗРЫВЧАТЫМИ ЖИДКОСТЯМИ	75
<i>А.В. Ананьин, С.А. Колдунов, В.А. Гаранин, С.И. Торунев</i>	

INVESTIGATION OF SHOCK WAVE SENSITIVITY OF NITROMETHANE MIXTURES WITH NON-EXPLOSIVES LIQUIDS	75
<i>A.V. Ananin, S.A. Koldunov, V.A. Garanin, S.I. Torunov</i>	
БЫСТРОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ДВУХФАЗНОЙ СИСТЕМЕ	76
<i>А.П. Ершов, А.О. Кашикар, Л.А. Лукьянчиков, Э.Р. Пруэл</i>	
FAST DETONATION INITIATION IN A TWO-PHASE SYSTEM	76
<i>A.P. Ershov, A.O. Kashkarov, L.A. Lukyanchikov, E.R. Prueel</i>	
РЕЗОНАНСНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ПУЗЫРЬКОВОЙ ДЕТОНАЦИИ.	77
<i>И.И. Кочетков, А.В. Пинаев</i>	
RESONANCE INITIATION OF BUBBLE DETONATION	77
<i>I.I. Kochetkov, A.V. Pinaev</i>	
ФОРМИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ ПРИ ВРАЩЕНИИ И ДЕФОРМАЦИЯХ КАМЕР СГОРАНИЯ	77
<i>В.А. Левин, И.С. Мануйлович, В.В. Марков</i>	
FORMATION OF DETONATION BY ROTATION AND DEFORMATIONS OF COMBUSTION CHAMBERS	78
<i>V.A. Levin, I.S. Manuylovich, V.V. Markov</i>	
БЫСТРОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ ПОРОШКОВЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ	78
<i>Л.А. Лукьянчиков, А.П. Ершов, Э.Р. Пруэл, К.А. Тен, А.О. Кашикар</i>	
FAST INITIATION OF SECONDARY POWDER EXPLOSIVES	79
<i>L.A. Lukyanchikov, A.P. Ershov, E.R. Prueel, K.A. Ten, A.O. Kashkarov</i>	
ФОРМИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОТОКАХ ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ ЗА СЧЕТ ЕЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ТВЕРДЫМИ СТЕНКАМИ	79
<i>В.А. Левин, И.С. Мануйлович, В.В. Марков</i>	
FORMATION OF A DETONATION IN SUPERSONIC FLOW OF COMBUSTIBLE MIXTURE DUE TO ITS INTERACTION WITH SOLID WALLS.	79
<i>V.A. Levin, I.S. Manuylovich, V.V. Markov</i>	
ВОЗБУЖДЕНИЕ ГОРЕНИЯ АММИАЧНО-СЕЛИТРЕННЫХ СОСТАВОВ В ПОЛЕ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ	80
<i>Р.М. Вахидов, Д.А. Хадиева, В.Я. Базотов</i>	
EXCITATION OF BURNING A NITRATE OF AMMONIUM STRUCTURES IN THE FIELD OF THE MICROWAVE OVEN-RADIATIONS.	80
<i>R.M. Wahidov, D.A. Hadieva, V.Y. Bazotov</i>	
ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОСТИ НИЗКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ВВ НА ПРОЦЕСС ПЕРЕХОДА УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ДЕТОНАЦИОННУЮ	80
<i>Е.Б. Смирнов, А.Н. Аверин, Б.Г. Лобойко, О.В. Костицын, Ю.А. Беленовский, А.В. Лебедев, В.Н. Щербakov, К.В. Еганов, В.М. Волков, К.М. Просвирнин, А.Н. Киселёв, В.В. Козель</i>	
INFLUENCE OF LOW-SENSITIVITY NE POROSITY ON THE SHOCK-TO-DETONATION WAVE TRANSITION.	81
<i>E.B. Smirnov, A.N. Averin, B.G. Loboiko, O.V. Kostitsyn, Yu.A. Belenovskiy, A.V. Lebedev, V.N. Tscherbakov, K.V. Eganov, V.M. Volkov, K.M. Prosvirnin, A.N. Kiselev, V.V. Koval</i>	
ВОЗДЕЙСТВИЕ МИКРОСЕКУНДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ НА ПОЛИМЕРНЫЕ ЭНЕРГОЕМКИЕ СИСТЕМЫ, НАПОЛНЕННЫЕ ДИСПЕРСНЫМ АЛЮМИНИЕМ	81
<i>Д.Н. Садовничий, Ю.М. Милехин, С.А. Лопаткин, Д.В. Жгун, В.Ф. Важов, Е.А. Бутенко, С.А. Малинин</i>	
MICROSECOND ELECTRICAL BREAKDOWN INFLUENCE ON POLYMERIC ENERGY-INTENSIVE SYSTEMS FILLED WITH DISPERSED ALUMINUM	81
<i>D.N. Sadovnichii, Yu.M. Milekhin, S.A. Lopatkin, D.V. Zhgun, V.F. Vazhov, E.A. Butenko, S.A. Malinin</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ВЗРЫВА В ПОТОКЕ ПСЕВДОЖИДКОГО ТОПЛИВА	82
<i>А.Г. Егоров, А.С. Тизилов</i>	
INVESTIGATION OF THERMAL EXPLOSION IN A PSEUDOLIQUID FUEL	82
<i>A.G. Egorov, A.S. Tizilov</i>	
ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССАХ В СОСУДЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ С ТЕПЛОВОМ ИСТОЧНИКОМ ТИПА «БЕГУЩАЯ ТЕПЛОВАЯ ВОЛНА» ПРИ ВЫХОДЕ РАСПЛАВА ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ ИЗ ИСТОЧНИКА В ВОДНУЮ СРЕДУ	83
<i>В.П. Кобяков</i>	

PHYSICAL REPRESENTATIONS OF THE NONSTATIONARY PROCESSES IN TO THE HIGH-PRESSURE VESSEL WITH THE HEAT SOURCE OF A «RUNNING HEAT WAVE» TYPE INSIDE. OUTLET OF THE COMBUSTION PRODUCT MELT INTO THE WATER SURROUNDINGS	83
<i>V.P. Kobiakov</i>	
КРИТЕРИЙ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ	83
<i>Ю.В. Петров, Г.Г. Савенков, В.А. Морозов, В.А. Брагин</i>	
NEW CRITERION TO PREDICT IMPACT INITIATION OF CONDENSED EXPLOSIVE MEDIA	84
<i>Y.V. Petrov, G.G. Savenkov, V.A. Morozov, V.A. Bragin</i>	
ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ РАЗЛИЧНОЙ ДИСПЕРСНОСТИ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ БРИЗАНТНЫХ ВВ К ВЫСКОВольТНОМУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ РАЗРЯДУ	84
<i>В.А. Брагин, И.А. Оськин, Г.Г. Савенков, С.А. Душенок, В.Г. Куликов, Г.В. Семашкин</i>	
INFLUENCE OF VARIOUS DISPERSION METAL POWDERS ADMIXTURES ON HIGH EXPLOSIVES SENSITIVITY TO HIGH-VOLTAGE ELECTRIC DISCHARGE	85
<i>V.A. Bragin, I.A. Oskin, G.G. Savenkov, S.A. Dushenok, V.G. Kulikov, G.V. Semashkin</i>	
ВЛИЯНИЕ ФЛЕГМАТИЗАТОРА НА ДЕТОНАЦИОННЫЕ И МЕТАТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ ГЕКСОГЕНА	86
<i>Е.И. Ермолович, В.П. Ильин, А.Г. Карачев, В.Г. Кожневников, А.Н. Михайлюкова</i>	
INFLUENCE OF PHLEGMATIZER ON DETONATION AND ACCELERATION CHARACTERISTICS OF EXPLOSIVES BASED ON HEXOGEN	86
<i>Е.И. Ermolovich, V.P. Ilyin, A.G. Karachev, V.G. Kozhevnikov, A.I. Mikhailukova</i>	
К ВЛИЯНИЮ ДЭТА НА ДЕТОНАЦИОННУЮ СПОСОБНОСТЬ СМЕСЕЙ НИТРОМЕТАНА С НЕВЗРЫВЧАТЫМИ ЖИДКОСТЯМИ	86
<i>С.А. Колдунов, А.В. Ананьин</i>	
TOWARD INFLUENCE OF DETA ON DETONATION ABILITY OF NITROMETHANE MIXTURES WITH NON-EXPLOSIVE LIQUUIDS.	87
<i>S.A. Koldunov, A.V. Ananin</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОЙ СЖИМАЕМОСТИ И СТРУКТУРЫ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В ЭМУЛЬСИОННЫХ ВВ.	87
<i>В.В. Лавров, А.А. Голубев, В.С. Демидов, А.В. Канцырев, С.А. Колесников, А.А. Логвиненко, В.М. Мочалова, А.Н. Савченко, А.В. Уткин</i>	
EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SHOCK COMPRESSIBILITY AND DETONATION WAVE STRUCTURE IN EMULSION EXPLOSIVES.	88
<i>V.V. Lavrov, A.A. Golubev, V.S. Demidov, A.V. Kantsyrev, S.A. Kolesnikov, A.A. Logvynenko, V.M. Mochalova, A.N. Savchenko, A.V. Utkin</i>	
ХИМИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТНЫХ ТОПЛИВ	89
<i>М.М. Русаков, Д.А. Павлов, А.М. Козин</i>	
CHEMICAL REGULATION OF DETONATION PROPERTIES FUEL.	89
<i>М.М. Rusakov, D.A. Pavlov, A.M. Kozin</i>	
ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА НА ДЕТОНАЦИОННУЮ СПОСОБНОСТЬ ВТОРИЧНЫХ ВВ	89
<i>А.В. Пинаев, П.А. Пинаев</i>	
EFFECT OF INITIAL PRESSURE ON DETONATION CAPABILITY OF SECONDARY HE	90
<i>A.V. Pinaev, P.A. Pinaev</i>	
О ГРАДИЕНТНЫХ СООТНОШЕНИЯХ НА ДЕТОНАЦИОННОМ ФРОНТЕ В ГАЗАХ	90
<i>Е.С. Прохоров</i>	
ON GRADIENT RELATIONS AT DETONATION FRONT IN GASES.	91
<i>Е.С. Prokhorov</i>	
ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПРИ ДЕТОНАЦИИ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВВ	91
<i>Н.П. Сатонкина, Э.Р. Прууэл, А.П. Ершов, Д.И. Карпов, А.В. Пластинин</i>	
SPACE DISTRIBUTION OF THE CONDUCTIVITY AT THE DETONATION OF EMULSION EXPLOSIVES	92
<i>N.P. Satonkina, E.R. Prueel, A.P. Ershov, D.I. Karpov, A.V. Plastinin</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ФРОНТА СТАЦИОНАРНОЙ ДЕТОНАЦИИ ЖИДКИХ ВВ	92
<i>С.И. Торуннов, М.И. Кулиш, В.М. Мочалова, А.В. Уткин, В.В. Якушев</i>	

EXPERIMENTAL METHODS FOR INVESTIGATIONS OF RELIEF OF STEADY-STATE DETONATION FRONT IN LIQUID HIGH EXPLOSIVES	92
<i>S.I. Torunov, M.I. Kulish, V.M. Mochalova, A.V. Utkin, V.V. Yakushev</i>	
ВЛИЯНИЕ ДИЭТИЛЕНТРИАМИНА НА СТРУКТУРУ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В НИТРОМЕТАНЕ	93
<i>A.V. Utkin, V.M. Mochalova, S.I. Torunov</i>	
THE INFLUENCE OF DIETHYLENETRIAMINE ON THE DETONATION WAVE STRUCTURE IN NITROMETHANE	93
<i>A.V. Utkin, V.M. Mochalova, S.I. Torunov</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ, СОСТОЯНИЙ ПИКА НЕЙМАНА И ЧЕПМЕНА-ЖУГЕ В ГОМОГЕННЫХ И ГЕТЕРОГЕННЫХ ВВ	94
<i>A.V. Fedorov, A.L. Mikhailov, L.K. Antonyuk, D.V. Nazarov, S.A. Finyushin</i>	
DETERMINATION OF PARAMETERS OF CHEMICAL REACTION ZONE, NEUMANN SPIKE STATE AND SHAPMAN-JOUGUET STATE IN HOMOGENEOUS HE AND HETEROGENEOUS HE	94
<i>A.V. Fedorov, A.L. Mikhailov, L.K. Antonyuk, D.V. Nazarov, S.A. Finyushin</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МЕТАНИЯ ПЛАСТИНЫ ПЛОСКОЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНОЙ.	95
<i>I.A. Akhlyustin, E.B. Smirnov, B.G. Loboiko, O.V. Kostitsyn, Yu.A. Belenovskiy, K.M. Prosvirnin, A.N. Kiselev</i>	
INVESTIGATION OF PLATE THROWING BY A FLAT DETONATION WAVE	95
<i>I.A. Akhlyustin, E.B. Smirnov, B.G. Loboiko, O.V. Kostitsyn, Yu.A. Belenovskiy, K.M. Prosvirnin, A.N. Kiselev</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА ВВ	95
<i>A.N. Kiselev, E.B. Smirnov, B.G. Loboiko, O.V. Kostitsyn, Yu.A. Belenovskiy, K.M. Miroshkin, K.M. Prosvirnin, A.V. Koval</i>	
STUDYING THE CYLINDRICAL SHELLS MOVEMENT UNDER THE IMPACT OF HE EXPLOSION PRODUCTS	95
<i>A.N. Kiselev, E.B. Smirnov, B.G. Loboiko, O.V. Kostitsyn, Yu.A. Belenovskiy, K.M. Miroshkin, K.M. Prosvirnin, A.V. Koval</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКОСЛОЙНЫХ ЗАРЯДОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО ВВ НА ОСНОВЕ БЕНЗОТРИФУРОКСАНА.	96
<i>N.G. Bagavetdinov, A.V. Gorodnov, A.S. Deev, S.I. Karachinsky, S.V. Mytarev, E.A. Poteryaeva, I.R. Shakirov</i>	
INVESTIGATION INTO DETONATION AND ENERGY PROPERTIES OF THIN-LAYER CHARGES OF BENZOTRIFUROXAN-BASED PLASTIC EXPLOSIVES	96
<i>N.G. Bagavetdinov, A.V. Gorodnov, A.S. Deev, S.I. Karachinsky, S.V. Mytarev, E.A. Poteryaeva, I.R. Shakirov</i>	
СВЯЗЬ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ С КРИВИЗНОЙ ФРОНТА ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ	96
<i>K.M. Prosvirnin, E.B. Smirnov, B.G. Loboiko, O.V. Kostitsyn, Yu.A. Belenovskiy, A.N. Kiselev</i>	
RELATION OF DETONATION RATE TO DETONATION WAVE FRONT CURVATURE	96
<i>K.M. Prosvirnin, E.B. Smirnov, B.G. Loboiko, O.V. Kostitsyn, Yu.A. Belenovskiy, A.N. Kiselev</i>	
ВЫБОР И ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ ДЛЯ СВАРКИ ВЗРЫВОМ ЛИСТОВЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК	97
<i>N.G. Bagavetdinov, S.I. Karachinsky, E.A. Poteryaeva, O.A. Timofeev, I.R. Shakirov</i>	
IDENTIFYING AND OPTIMIZING PROPERTIES OF EXPLOSIVE COMPOSITIONS FOR EXPLOSION WELDING OF BIMETAL PLATES.	97
<i>N.G. Bagavetdinov, S.I. Karachinsky, E.A. Poteryaeva, O.A. Timofeev, I.R. Shakirov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ КОМПОНЕНТОВ В МОЩНЫХ СМЕСЕВЫХ СОСТАВАХ НА ИХ ВЗРЫВЧАТЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.	97
<i>Yu.M. Milekhin, A.A. Matveev, V.N. Kulikov, A.N. Osavfchuk, N.I. Shishov</i>	
STUDY OF THE INFLUENCE OF COMPONENTS IN HIGH-POWER MIXED COMPOSITIONS ON THEIR EXPLOSIVE AND ENERGETIC CHARACTERISTICS	98
<i>Yu.M. Milekhin, A.A. Matveev, V.N. Kulikov, A.N. Osavfchuk, N.I. Shishov</i>	
СТРУКТУРА ЗОНЫ РЕАКЦИИ ДЕТОНИРУЮЩЕГО МЕЛКОЗЕРНИСТОГО ТАТЬ. ЭКСПЕРИМЕНТ	99
<i>E.A. Kozlov, V.I. Tarzhanov, I.V. Telichko, A.V. Vorobyev, K.V. Levak, V.A. Matkin, A.V. Pavlenko, S.N. Malyugina, A.V. Dulov</i>	
STRUCTURE OF DETONATING FINE-GRAIN TATB REACTION ZONE. EXPERIMENT	99
<i>E.A. Kozlov, V.I. Tarzhanov, I.V. Telichko, A.V. Vorobyev, K.V. Levak, V.A. Matkin, A.V. Pavlenko, S.N. Malyugina, A.V. Dulov</i>	

ГОРЕНИЕ И ДЕТОНАЦИЯ ПРОПАНОВОЗДУШНЫХ СОСТАВОВ В ДЕМОНСТРАЦИОННЫХ ОПЫТАХ	100
<i>В.И. Таржанов, В.Г. Вильданов, В.И. Сдобнов, И.В. Теличко, А.Д. Зинченко, А.Е. Макаров, И.А. Литвиненко, В.А. Огарков, В.В. Власов, А.В. Воробьев, И.Г. Корецкий, С.Л. Мухин, А.Ф. Ханин, А.Н. Грачев, В.А. Маткин, В.А. Поташиников</i>	
COMBUSTION AND DETONATION OF PROPANE-AIR COMPOSITIONS IN DEMONSTRATION EXPERIMENTS	100
<i>V.I. Tarzhanov, V.G. Vildanov, V.I. Sdobnov, I.V. Telichko, A.D. Zinchenko, A.E. Makarov, I.A. Litvinenko, V.A. Ogarkov, V.V. Vlasov, A.V. Vorobyev, I.G. Koretsky, S.L. Mukhin, A.F. Khanin, A.N. Grachev, V.A. Matkin, V.A. Potashnikov</i>	
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛАЗЕРНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ: ФОТОХИМИЧЕСКИЙ И ТЕРМИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМЫ ИНИЦИИРОВАНИЯ	100
<i>Э.Д. Алукер, А.Г. Кречетов, А.Ю. Митрофанов, А.С. Зверев</i>	
EFFICIENCY OF LASER INITIATION: PHOTOCHEMICAL AND THERMAL INITIATION MECHANISM.	101
<i>E.D. Aluker, A.G. Krechetov, A.Y. Mitrofanov, A.S. Zverev</i>	
ФОТОТЕРМИЧЕСКАЯ И ФОТОФРАГМЕНТАЦИЯ МОЛЕКУЛ ТЭНА ПРИ ФОТОИНИЦИИРОВАНИИ	101
<i>Э.Д. Алукер, А.Г. Кречетов, В.Н. Швайко, Д.А. Мальцев, Н.В. Полева</i>	
PHOTOTHERMAL AND PHOTOFRAGMENTATION OF MOLECULES PETN IN PHOTOINITIATION.	102
<i>E.D. Aluker, A.G. Krechetov, V.N. Shvayko, D.A. Maltsev, N.V. Poleeva</i>	
РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕПЛООВОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ.	102
<i>Э.Д. Алукер, А.Ю. Митрофанов, А.В. Бояркина, А.С. Дулепова, Н.Н. Ильякова, А.О. Терентьева</i>	
IMPLEMENTATION OF THERMAL INITIATION EXPLOSIVES PULSED LASER RADIATION	102
<i>E.D. Aluker, A.Y. Mitrofanov, A.V. Boyarkina, A.S. Dulepova, N.N. Ilyakova, A.O. Terentyeva</i>	
ЛАЗЕРНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ТЕТРАНИТРОПЕНТАЭРИТРИТА С ДОБАВКАМИ НАНОЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ И ОКИСИ АЛЮМИНИЯ	103
<i>Б.П. Адиев, Д.Р. Нурмухаметов, Р.И. Фурега, С.Ю. Бугров</i>	
LASER INITIATION OF PENTAERYTHRITOL TETRANITRATE WITH ADDITIVES OF ALUMINIUM AND ALUMINA NANOPARTICLES	103
<i>B.P. Adiev, D.R. Nurmukhametov, R.I. Furega, S.Ju. Bugrov</i>	
РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ	103
<i>В.Г. Кригер, А.В. Каленский, А.А. Звекков, И.Ю. Зыков, Б.П. Адиев</i>	
CALCULATION OF LIGHT ABSORBANCE EFFICIENCIES OF METAL INCLUSIONS IN ENERGETIC MATERIALS	104
<i>V.G. Kriger, A.V. Kalenskiy, A.A. Zvekov, I.Yu. Zykov, B.P. Adiev</i>	
ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУР РАЗОГРЕВА ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ВКЛЮЧЕНИЙ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ	104
<i>А.В. Каленский, А.А. Звекков, И.Ю. Зыков, А.П. Никитин</i>	
ESTIMATION OF INCLUSIONS' TEMPERATURES IN ENERGETIC MATERIALS HEATED BY LASER PULSE	105
<i>A.V. Kalenskiy, A.A. Zvekov, I.Yu. Zykov, A.P. Nikitin</i>	
ИНИЦИИРОВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ ТЕТРАНИТРОПЕНТАЭРИТРИТА ИМПУЛЬСНЫМ ПУЧКОМ ЭЛЕКТРОНОВ.	105
<i>Б.П. Адиев, Г.М. Белокуров, С.С. Гречин, И.Ю. Лисков</i>	
INITIATION OF PENTAERYTHRITOL TETRANITRATE MONOCRYSTALS BY IMPULSE BEAM OF ELECTRONS.	106
<i>B.P. Adiev, G.M. Belokurov, S.S. Grechin, I.Ju. Liskov</i>	
ЛАЗЕРНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ТЕТРАНИТРОПЕНТАЭРИТРИТА С ДОБАВКАМИ МИКРОЧАСТИЦ УГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА «КЕМЕРИТ®»	106
<i>Б.П. Адиев, Д.Р. Нурмухаметов, Р.И. Фурега, Н.В. Нелюбина, Ч.Н. Барнаков</i>	
LASER INITIATION OF PENTAERYTHRITOL TETRANITRATE WITH ADDITIVES OF MICROPARTICLES OF CARBON MATERIAL «KEMERIT®»	106
<i>B.P. Adiev, D.R. Nurmukhametov, R.I. Furega, N.V. Nelyubina, Ch.N. Barnakov</i>	
АНАЛИЗ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЦЕПНОЙ РЕАКЦИИ ВЗРЫВНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	107
<i>В.Г. Кригер, А.В. Каленский, Е.А. Гришаева, А.А. Звекков</i>	

NON-ISOTHERMAL CHAIN BRANCHING REACTION OF ENERGETIC MATERIALS EXPLOSIVE DECOMPOSITION ANALYSIS	107
<i>V.G. Kriger, A.V. Kalensky, E.A. Grishaeva, A.A. Zvekov</i>	
ПЕРВОПРИНЦИПНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ АЗИДА СЕРЕБРА ПОД ДАВЛЕНИЕМ	108
<i>Ю.Н. Журавлев, В.М. Лисицын</i>	
FIRST-PRINCIPLES STUDY OF REACTIONARY ABILITY OF SILVER AZIDE UNDER PRESSURE	108
<i>Yu.N. Zhuravlev, V.M. Lisitsyn</i>	
ЛАЗЕРНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ТЭНА С ПОМОЩЬЮ НАПЛАВА	109
<i>В.И. Таржанов, В.И. Сдобнов, А.Д. Зинченко, А.И. Погребов</i>	
LASER INITIATION OF PETN USING A DEPOSIT	109
<i>V.I. Tarzhanov, V.I. Sdobnov, A.D. Zinchenko, A.I. Pogrebov</i>	
ЗАВИСИМОСТЬ ПОРОГА ВЗРЫВНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ТЕТРАНИТРОПЕНТАЭРИТРИТА И СМЕСЕВЫХ СОСТАВОВ НА ЕГО ОСНОВЕ ОТ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ИНИЦИИРОВАНИИ	109
<i>Б.П. Адыев, Д.Р. Нурмухаметов, Р.И. Фурега, Г.М. Белокуров</i>	
TEMPERATURE DEPENDENCE OF EXPLOSIVE DECOMPOSITION OF PENTAERYTHRITOL TETRANITRATE AND ITS MIXTURES UNDER IMPULSE LASER INITIATION	110
<i>B.P. Aduev, D.R. Nurmukhametov, R.I. Furega, G.M. Belokurov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗРЫВЧАТОГО РАЗЛОЖЕНИЯ СМЕСЕВЫХ СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ ТЭНА И УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ AL-C ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ	110
<i>Б.П. Адыев, Д.Р. Нурмухаметов, Р.И. Фурега, С.Ю. Бугров, В.П. Ципилев</i>	
INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS OF EXPLOSIVE DECOMPOSITION OF MIXTURES ON THE BASE OF PETN AND ULTRADISPERSED PARTICLES AL-C UNDER LASER EXPOSURE	111
<i>B.P. Aduev, D.R. Nurmukhametov, R.I. Furega, S.Ju. Bugrov, V.P. Csipilev</i>	
ПОЛУЧЕНИЕ КРУПНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО 1,3,5-ТРИАМИНО-2,4,6-ТРИНИТРОБЕНЗОЛА РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ УЛЬТРАДИСПЕРСНОГО ПРОДУКТА	111
<i>В.А. Кашаев, Ю.Г. Печенев, Г.Х. Хисамутдинов, С.И. Валецкий, В.П. Ильин, А.П. Баврина</i>	
PREPARATION OF LARGE-SIZED 1,3,5-TRIAMINO-2,4,6-TRINITROBENZENE BY RECRYSTALLIZATION OF ULTRADISPERSED PRODUCT	111
<i>V.A. Kashaev, Yu.G. Pechenev, G.Kh.Khisamutdinov, S.I. Valeshny, V.P. Ilyin, A.P. Bavrina</i>	
СВЕРХПОМЕХОУСТОЙЧИВЫЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ КАМЕРЫ НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА	112
<i>М.И. Крутик, В.П. Майоров, В.В. Попов, М.С. Семин</i>	
POWERFUL ELECTROMAGNETIC INFLUENCE STABILITY ICCD CAMERAS OF NANOSECOND RANGE	112
<i>M.I. Krutik, V.P. Mayorov, V.V. Popov, M.S. Semin</i>	
ИМПУЛЬСНО-ДЕТОНАЦИОННОЕ ГОРЕЛОЧНОЕ УСТРОЙСТВО НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ	113
<i>С.М. Фролов, Ф.С. Фролов, В.С. Аксенов, В.С. Иванов, С.Н. Медведев, В.А. Сметанюк, К.А. Авдеев</i>	
PULSE DETONATION BURNER FUELED BY NATURAL GAS	113
<i>S.M. Frolov, F.S. Frolov, V.S. Aksenov, V.S. Ivanov, S.N. Medvedev, V.A. Smetanyuk, K.A. Avdeev</i>	
КОМПАКТНОЕ ВЗРЫВНОЕ МЕТАТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕЩЕСТВА МЕТОДОМ ПРОТОННОЙ РАДИОГРАФИИ В УСЛОВИЯХ УДАРНОГО СЖАТИЯ	113
<i>В.В. Якушев, А.В. Уткин, С.А. Колдунов, М.И. Кулиш</i>	
A COMPACT EXPLOSIVE ASSEMBLY FOR RESEARCH OF MATTER UNDER SHOCK COMPRESSION USING PROTON RADIOGRAPHY	114
<i>V.V. Yakushev, A.V. Utkin, S.A. Koldunov, M.I. Kulish</i>	
РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКТА ТЕСТ-ОБРАЗЦОВ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ АППАРАТУРЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ	114
<i>В.В. Судаков, И.З. Ахметов, В.П. Ильин, Ю.Л. Коробова</i>	
DEVELOPMENT OF TEST-SAMPLES FOR CALIBRATION OF EXPLOSIVE DETECTORS	114
<i>V.V. Sudakov, I.Z. Akhmetov, V.P. Ilyin, Yu.L. Korobova</i>	
РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФТОРДИНИТРОЭТИЛМЕТИЛФУРОКСАНА	115
<i>А.Р. Хайруллин, В.Г. Никитин, А.Т. Губайдуллин, Н.С. Хайруллина, Д.И. Хамидуллин</i>	

X-RAY STUDYING OF FTORDINITROETILMETILFUROKSAN	115
<i>A.R. Khairullin, V.G. Nikitin, A.T. Gubaidullin, N.S. Khairullina, D.I. Khamidullin</i>	

ТЕРМОГАЗОГЕНЕРАТОР НА ОСНОВЕ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО СГОРАЕМОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ОБРАБОТКИ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН	115
<i>Р.Ш. Гарифуллин, А.С. Сальников, В.Я. Базотов, А.А. Мокеев</i>	

THERMOGASGENERATOR ON BASE OF THERMOPLASTIC BURNING MATERIAL FOR PROCESSING OF OIL CHINKS.	116
<i>R.Sh. Garifullin, A.S. Salnikov, V.J. Bazotov, A.A. Mokeev</i>	

СЕКЦИЯ 3. ЯВЛЕНИЯ В ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ SECTION 3. DENSE PLASMA PHENOMENA

СКОРОСТИ РЕАКЦИЙ ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА С УЧЕТОМ КВАНТОВЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ БОЛЬШИХ ПЛОТНОСТЯХ НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ.	119
<i>А.Н. Старостин, М.Г. Гладуш, Ю.В. Петрушевич</i>	

ENHANCEMENT OF FUSION RATES DUE TO QUANTUM EFFECTS IN DENSE NONIDEAL PLASMAS	119
<i>A.N. Starostin, M.G. Gladush, Yu.V. Petrushevich</i>	

ОТДАЧА ЭНЕРГИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ЭЛЕКТРОНАМ И ИОНАМ В ПЛАЗМЕ	120
<i>Д.Л. Престон, Л.С. Браун, Р.Л. Синглетон</i>	

CHARGED PARTICLE ENERGY LOSS TO ELECTRONS AND IONS IN A PLASMA.	120
<i>D.L. Preston, L.S. Brown, R.L. Singleton</i>	

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО УДАРНОМУ СЖАТИЮ АЗОТА В МЕГАБАРНОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ.	120
<i>И.Л. Иосилевский, В.К. Грязнов, В.Е. Фортвов</i>	

THERMODYNAMIC STUDY OF NEW EXERIMENTAL DATA ON SHOCK COMPRESSION OF LIQUID NITROGEN IN 1-3 MEGABAR RANGE	121
<i>I.L. Iosilevskiy, V.K. Gryaznov, V.E. Fortov</i>	

ТЕРМОДИНАМИКА ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ ВОДОРОДА И ГЕЛИЯ ПРИ УДАРНОМ И ИЗОЭНТРОПИЧЕСКОМ СЖАТИИ В МЕГАБАРНОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ	121
<i>В.К. Грязнов, И.Л. Иосилевский, В.Е. Фортвов</i>	

THERMODYNAMICS OF DENSE HYDROGEN AND HELIUM PLASMA UNDER SHOCK AND QUASIISENTROPIC COMPRESSION AT MEGABAR PRESSURE RANGE	121
<i>V.K. Gryaznov, I.L. Iosilevskiy, V.E. Fortov</i>	

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ И КИНЕТИЧЕСКИЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ МЕТАЛЛА В ДВУХТЕМПЕРАТУРНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ	122
<i>Г.Ш. Болтачев, Н.Б. Волков, Е.А. Чингина, А.П. Яловец</i>	

THERMODYNAMIC FUNCSTIONS AND KINETIC COEFFICIENTS FOR METALS WITHIN TWO-TEMPERATURE APPROACH	122
<i>G.Sh. Boltachev, N.B. Volkov, E.A. Chingina, A.P. Yalovets</i>	

ИЗУЧЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ МЕДНОЙ МИШЕНЬЮ	123
<i>П.А. Лобода, Д.О. Замураев, Н.Г. Карлыханов, А.А. Овечкин, А.В. Потанов, Н.А. Смирнов, А.С. Тищенко, А.А. Шадрин, А.Л. Шамраев</i>	

STUDIES OF ABSORPTION OF FEMTOSECOND LASER PULSES IN SOLID-DENSITY COPPER.	124
<i>P.A. Loboda, N.G. Karlykhanov, A.A. Ovechkin, A.V. Potapov, A.A. Shadrin, A.L. Shamraev, N.A. Smirnov, A.S. Tischenko, D.O. Zamuraev</i>	

РАСЧЕТ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ И УДАРНЫХ АДИАБАТ МЕТАЛЛОВ ПО ТЕОРЕТИЧЕСКИМ МОДЕЛЯМ ПЛОТНОГО ИОНИЗОВАННОГО ВЕЩЕСТВА С УЧЕТОМ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ЭФФЕКТОВ	124
<i>П.А. Лобода, А.А. Овечкин, А.А. Шадрин</i>	

CLACULATION OF EQUATION OF STATE AND SHOCK HUGONIOTS OF METALLS USING THERETICAL MODEL OF DENSE IONIZED MATTER WITH SHELL EFFECTS ACCOUNTING	125
<i>P.A. Loboda, A.A. Ovechkin, A.A. Shadrin</i>	

ЗАВИСИМОСТЬ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ОТ ИСПОЛЬЗУЕМОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ ДЛЯ ОБМЕННОГО ПОТЕНЦИАЛА В МОДЕЛЯХ СРЕДНЕГО АТОМА	125
<i>В.Г. Новиков, П.А. Лобода, А.А. Овечкин</i>	

DEPENDENCE OF THERMODYNAMIC FUNCTIONS ON THE APPROXIMATION TO REPRESENT THE EXCHANGE POTENTIAL IN AVERAGE ATOM MODELS	125
<i>V.G. Novikov, P.A. Loboda, A.A. Ovechkin</i>	
ПЕРВОПРИНЦИПНЫЕ РАСЧЕТЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ НАГРЕТЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛЕ ПОКОЯЩИХСЯ ЯДЕР НА ПРИМЕРЕ МЕДИ	126
<i>Н.А. Смирнов, П.А. Лобода, А.А. Шадрин, А.А. Овечкин</i>	
AB INITIO CALCULATIONS FOR THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF A SYSTEM OF HEATED ELECTRONS IN THE FIELD OF COLD NUCLEI: COPPER AS A PROTOTYPE	126
<i>N.A. Smirnov, P.A. Loboda, A.A. Shadrin, A.A. Ovechkin</i>	
РЕЛЕЙ-ТЕЙЛОРОВСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В ДВУХТЕМПЕРАТУРНОЙ МОДЕЛИ ПЛАЗМЫ	126
<i>В.А. Адарченко</i>	
THE RAYLEIGH-TAYLOR INSTABILITY IN TWO TEMPERATURE PLASMA MODEL	127
<i>V.A. Adarchenko</i>	
ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ В МАГНИТНЫХ ЛОВУШКАХ	127
<i>К.В. Брушлинский, А.С. Гольдич</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF PLASMA CONFINEMENT IN MAGNETIC TRAPS	128
<i>K.V. Brushlinsky, A.S. Goldich</i>	
НЕЛИНЕЙНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАЗМЫ В ТЕЧЕНИЯХ С УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ	128
<i>М.Я. Иванов, Ю.Л. Серов</i>	
NONLINEAR DYNAMIC PROPERTIES OF PLASMA IN FLOWS WITH SHOCK WAVES	129
<i>М.Я. Иванов, Ю.Л. Серов</i>	
О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПЛОТНОГО ПОТОКА БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЫ С ИСТОЧНИКОМ НАМАГНИЧЕННОСТИ И ТРЕХМЕРНОЕ КИНЕТИЧЕСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ	130
<i>В.М. Губченко</i>	
INTERACTION OF A DENSE FLOW OF COLLISIONLESS HOT PLASMA WITH A SOURCE OF MAGNETIZATION AND THE 3D KINETIC APPROACH	130
<i>V.M. Gubchenko</i>	
КОЛЛАПС И ФРАГМЕНТАЦИЯ ПРОТОЗВЕЗДНЫХ ОБЛАКОВ	131
<i>А.Е. Дудоров, С.Н. Замоздра</i>	
COLLAPSE AND FRAGMENTATION OF PROTOSTELLAR CLOUDS	131
<i>A.E. Dudorov, S.N. Zamozdra</i>	
ТРАНСПОРТ И РАЗРУШЕНИЕ ПЫЛИ В ГОРЯЧЕМ ГАЗЕ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК	131
<i>О.Л. Поликарпова</i>	
ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПЛАЗМЕННЫХ ПЕЧАХ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ	131
<i>А.Л. Мосса, В.В. Савчин</i>	
HEAT PROCESSES IN PLASMA FURNACES FOR RADIOACTIVE WASTE PROCESSING	132
<i>A.L. Mosse, V.V. Sauchyn</i>	
НЕПРЕРЫВНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ, ИЗМЕРЕНИЯХ И ТЕХНОЛОГИИ	133
<i>В.П. Зимаков, В.А. Кузнецов, Н.Г. Соловьев, А.Н. Шемякин, М.Ю. Якимов</i>	
CONTINUOUS LASER PLASMA GENERATION FOR SCIENTIFIC, METROLOGICAL AND INDUSTRIAL APPLICATIONS	133
<i>V.P. Zimakov, V.A. Kuznetsov, N.G. Solovuyov, A.N. Shemyakin, M.Yu. Yakimov</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ МЕТАЛЛОВ ПРИ СУБПИКОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСАХ	134
<i>С.В. Стариков</i>	
SIMULATION OF SUBPICOSECOND PULSE LASER ABLATION IN METALS	134
<i>S.V. Starikov</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ПРЕДЫМПУЛЬСА С ПОМОЩЬЮ ТОНКОЙ ФОЛЬГИ, УСТАНОВЛЕННОЙ ПЕРЕД МИШЕНЬЮ	134
<i>М.Е. Поварницын, Н.Е. Андреев, П.П. Левашов, К.В. Хищенко, О.Н. Розмей</i>	

SIMULATION OF LASER PREPULSE REDUCTION BY A THIN SHIELDING FOIL PLACED IN FRONT OF THE TARGET	135
<i>M.E. Povarnitsyn, N.E. Andreev, P.R. Levashov, K.V. Khishchenko, O.N. Rosmej</i>	
3D3V МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПИКОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ С ПОДКРИТИЧЕСКИМ ПЛАЗМЕННЫМ СЛОЕМ	135
<i>В.Д. Левченко, А.Ю. Перепёлкина</i>	
3D3V SIMULATION OF THE INTERACTION OF PICOSECOND LASER IMPULSES WITH SUBCRITICAL PLASMA LAYER	135
<i>V.D. Levchenko and A.Yu. Perepelkina</i>	
30-TBт ПИКОСЕКУНДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ УСТАНОВКА СОКОЛ-П.	136
<i>Д.С. Гаврилов, Д.А. Дмитров, А.Г. Какшин, И.А. Капустин, Е.А. Лобода</i>	
30-TW PICOSECOND LASER FACILITY SOKOL-P	136
<i>D.S. Gavrilo, D.A. Dmitrov, A.G. Kakshin, I.A. Kapustin, E.A. Loboda</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СПЕКТРОВ ОБРАТНО РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА 30-TBт ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ СОКОЛ-П	136
<i>Д.С. Гаврилов, А.Г. Какшин, Е.А. Лобода</i>	
INVESTIGATION AND INTERPRETATION OF BACKSCATTERED RADIATION SPECTRA IN THE EXPERIMENTS ON 30-TW SOKOL-P LASER FACILITY	137
<i>D.S. Gavrilo, A.G. Kakshin, E.A. Loboda</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСКОРЕНИЯ ПРОТОНОВ ИЗ ТОНКИХ ФОЛЬГ, ОБЛУЧАЕМЫХ ПИКОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ С КРУГОВОЙ И ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ	137
<i>К.В. Сафронов, Д.А. Вихляев, Д.С. Гаврилов, С.А. Горохов, А.Г. Какшин, А.В. Липин, Е.А. Лобода, В.А. Лыков, Е.С. Мокичева, С.Н. Пахомов, А.В. Потапов, П.А. Толстоухов, Д.В. Торшин</i>	
EXPERIMENTAL STUDIES OF PROTON ACCELERATION FROM THIN FOILS IRRADIATED BY PICOSECOND LASER PULSES WITH CIRCULAR AND LINEAR POLARIZATION	138
<i>K.V. Safronov, D.A. Vikhlyayev, D.S. Gavrilo, S.A. Gorokhov, A.G. Kakshin, A.V. Lipin, E.A. Loboda, V.A. Lykov, E.S. Mokicheva, S.N. Pakhomov, A.V. Potapov, P.A. Tolstoukhov, D.V. Torshin</i>	
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ГЕНЕРАЦИИ МОЩНОГО СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВАКУУМНЫМИ ФОТОЭЛЕМЕНТАМИ	138
<i>Е.В. Заволоков, Д.О. Замураев, А.А. Зубков, А.А. Кондратьев, В.Ю. Кузьминых, Н.В. Купырин, А.В. Потапов, Ю.О. Романов, И.А. Сорокин, А.С. Тищенко, Н.Н. Хавронин, А.Л. Шамраев</i>	
RESULTS OF EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS INTO GENERATION OF THE HIGH-POWER ULTRA-WIDEBAND ELECTROMAGNETIC RADIATION BY VACUUM FOTOCELLS	139
<i>E.V. Zavolokov, D.O. Zamuraev, A.A. Zubkov, A.A. Kondratiev, V.Y. Kuzminykh, N.V. Kupyurin, A.V. Potapov, Y.O. Romanov, I.A. Sorokon, A.S. Tischenko, N.N. Khavronin, A.L. Shamraev</i>	
ЛИУ-2 – РЕАЛИЗАЦИЯ НОВОГО ПОДХОДА В СОЗДАНИИ ЛИНЕЙНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ	139
<i>А.В. Акимов, П.А. Бак, М.А. Батазова, А.М. Батраков, О.В. Беликов, Ю.М. Боймельштейн, Д.Ю. Болховитянов, А.А. Елисеев, Ф.А. Еманов, Г.А. Фаткин, А.А. Корепанов, А.Н. Косарев, Я.В. Куленко, Г.И. Кузнецов, П.В. Логачев, И.В. Николаев, А.В. Оттмар, А.А. Пачков, А.Н. Панов, О.А. Павлов, Д.Н. Пурескин, Е.С. Рувинский, Д.А. Старостенко, С.О. Суворов, Ю.Ф. Токарев, А.П. Торшин, С.В. Тур, О.А. Никитин, М.Ю. Столбиков, А.Р. Ахметов, П.С. Базаров, Д.А. Железкин, С.Д. Хренков, А.А. Каргин, К.С. Шубин, Д.В. Сысков</i>	
LIA-2 AS A RESULT OF NEW APPROACH IN LINEAR INDUCTION ACCELERATORS DESIGN	140
<i>P.V. Logachev et al.</i>	
ЭМИР-2 – ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ	140
<i>Б.Н. Лаврентьев, Р.Н. Мунасыпов, В.В. Перешитов, Р.В. Протас, Р.Р. Хафизов</i>	
EMIR-2 - PULSED SOURCE OF IONIZING RADIATION	140
<i>B.N. Lavrentiev, R.N. Munasypov, V.V. Pereshitov, R.V. Protas, R.R. Khafizov</i>	
ОТКРЫТАЯ ЛОВУШКА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ В ИЯФ	141
<i>А.Д. Беклемишев, А.В. Бурдаков, А.А. Иванов, И.А. Иванов, В.В. Поступаев, С.Л. Синуцкий</i>	
OPEN TRAP OF NEW GENERATION IN BINP	141
<i>A.D. Beklemisev, A.V. Burdakov, A.A. Ivanov, I.A. Ivanov, V.V. Postupaev, S.L. Sinitky</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЕ С ИСТОЧНИКОМ НЕЙТРОНОВ НА БАЗЕ ПЛАЗМЕННОЙ ЛОВУШКИ ОТКРЫТОГО ТИПА	142
<i>А.В. Аникеев, П.А. Багрянский, С.А. Бреднихин, С.И. Лежнин, Н.А. Прибатурин, В.В. Приходько, С.А. Фролов, Ю.А. Цидулко, Д.В. Юров</i>	

УДЕРЖАНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В МАГНИТОПЛАЗМЕННОЙ ЛОВУШКЕ	142
<i>А.Н. Залялов, Н.В. Иванов, В.А. Стародубцев, Р.Р. Сунгатуллин, А.Е. Широков</i>	
HIGH-ENERGY ELECTRON CONFINEMENT IN A MAGNETOPLASMA TRAP	143
<i>A.N. Zalyalov, N.V. Ivanov, V.A. Starodubtsev, R.R. Sugatullin, A.E. Shirokov</i>	
ДИНАМИКА ДЕЙТЕРИЕВОГО ГАЗОВОГО ЛАЙНЕРА И ВЫХОД НЕЙТРОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ГЕНЕРАТОРЕ ГИТ-12	143
<i>А.В. Шишилов, Б.М. Ковальчук, В.А. Кокиенев, Н.Е. Курмаев, А.Ю. Лабетский, Н.А. Ратахин, Ф.И. Фурсов, Д. Клир, Ж. Краварик, Р. Кубес, К. Резак</i>	
DEUTERIUM GAS-PUFF DYNAMICS AND NEUTRON PRODUCTION IN EXPERIMENTS ON THE GIT-12 GENERATOR	144
<i>A.V. Shishlov, B.M. Kovalchuk, V.A. Kokshenev, N.E. Kurmaev, A.Yu. Labetsky, N.A. Ratakhin, F.I. Fursov, D. Klir, J. Kravarik, P. Kubes, K. Rezac</i>	
РАЗЛИЧНЫЕ СЦЕНАРИИ ФОРМИРОВАНИЯ КОРОНЫ И ПЛОТНОГО КЕРНА В РАЗРЯДНОМ КАНАЛЕ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ ПРОВОЛОЧЕК	144
<i>С.И. Ткаченко, В.В. Жаховский, С.А. Пикуз, Т.А. Шелковенко</i>	
DIFFERENT SCENARIOS OF FORMATION OF THE CORONA AND DENSE CORE IN THE DISCHARGE CHANNEL DURING WIRE EXPLOSION	144
<i>S.I. Tkachenko, V.V. Zhakhovsky, S.A. Pikuz, T.A. Shelkovenko</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ДВУХКАСКАДНЫМИ ГАЗОВЫМИ ЛАЙНЕРАМИ НА ГЕНЕРАТОРЕ МИГ	145
<i>С.А. Сорокин</i>	
DOUBLE SHELL GAS-PUFF LINER EXPERIMENTS ON MIG.	145
<i>S.A. Sorokin</i>	
ДВУХСТУПЕНЧАТЫЙ КОММУТАТОР ДЛЯ ИМПУЛЬСНОГО ГЕНЕРАТОРА НА ИНДУКТИВНОМ НАКОПИТЕЛЕ ПРИ РАБОТЕ НА ПРОИЗВОЛЬНУЮ НАГРУЗКУ	145
<i>О.Г. Егоров</i>	
TWO-STAGE OPENING SWITCH FOR THE PULSE GENERATOR BASED ON INDUCTIVE STORAGE AT WORK ON AN ARBITRARY LOAD.	146
<i>О.Г. Егоров</i>	
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ И КОНВЕРСИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ В ГЕНЕРАТОРАХ НА ПЛАЗМЕННОМ ФОКУСЕ	146
<i>Б.Д. Лемешко, Д.И. Юрков, А.К. Дулатов, А.Н. Селифанов</i>	
ENERGY RATIOS AND CONVERSION EFFICIENCY IN PLASMA FOCUS DEVICES	147
<i>B.D. Lemeshko, D.I. Yurkov, A.K. Dulatov, A.N. Selifanov</i>	
ТРЕХМЕРНАЯ ПОЛНОСТЬЮ КИНЕТИЧЕСКАЯ ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЫ КАНАЛА ХОЛЛОВСКОГО ДВИГАТЕЛЯ.	147
<i>И.А. Горячев, В.Д. Левченко, А.Ю. Перепёлкина</i>	
3D FULLY KINETIC NUMERICAL MODEL OF MAGNETIZED PLASMA OF HALL ENGINE CHANNEL.	148
<i>I.A. Goryachev, V.D. Levchenko, A.Yu. Perepyolkina</i>	
ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ С ПРИМЕРАМИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ И АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	148
<i>Л.В. Терентьева, М.Я. Иванов</i>	
THE EXACT SOLUTIONS OF THE HYDRODYNAMIC EQUATIONS OF CONSISTENT PLASMA WITH EXAMPLES OF SIMULATION SOME PHYSICAL AND ASTROPHYSICAL PROCESSES	149
<i>L.V. Terentyeva, M.Ya. Ivanov</i>	
ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ МИКРОПРОВОДНИКОВ И ГЕНЕРАЦИИ ПЛАЗМЫ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ВДОЛЬ ИХ ПОВЕРХНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ С СУБНАНОСЕКУНДНЫМ ФРОНТОМ	149
<i>С.В. Барахвостов, М.Б. Бочкарев, Н.Б. Волков, К.А. Нагаев, В.П. Тараканов, О.Р. Тимошенкова, С.И. Ткаченко, Е.А. Чингина</i>	
MICROWIRES DESTRUCTION AND PLASMA GENERATION FEATURES DURING SUBNANOSECOND FRONT HIGH-VOLTAGE PULSES PROPAGATING ALONG THEIR SURFACE	150
<i>S.V. Barakhvostov, M.B. Bochkaev, N.B. Volkov, K.A. Nagayev, V.P. Tarakanov, O.R. Timoshenkova, S.I. Tkachenko, E.A. Chingina</i>	

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ВЕРТИКАЛЬНУЮ СТРУКТУРУ АККРЕЦИОННЫХ ДИСКОВ МОЛОДЫХ ЗВЕЗД	151
<i>А.Е. Дудоров, С.А. Хайбрахманов</i>	
INFLUENCE OF MAGNETIC FIELD ON VERTICAL STRUCTURE OF ACCRETION DISKS OF YOUNG STARS	151
<i>A.E. Dudorov, S.A. Khaibrakhmanov</i>	
ИСПАРЕНИЕ МЕТАЛЛА ПРИ МОЩНОМ ЭЛЕКТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ И КОНДЕНСАЦИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ	151
<i>П.Н. Майер, А.Е. Дудоров, К.В. Хищенко, П.Р. Левашов, А.Е. Майер</i>	
EVAPORATION OF METALS UNDER THE POWERFUL ELECTRON IRRADIATION AND CONDENSATION OF METAL NANOPARTICLES	151
<i>P.N. Mayer, A.E. Dudorov, K.V. Khishchenko, P.R. Levashov, A.E. Mayer</i>	
ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ КВАЗИРАВНОВЕСИЯ ПЛАЗМЫ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЛОВУШКЕ-ГАЛАТЕЕ – «ПОЯС»	152
<i>Н.А. Чмыхова</i>	
NUMERICAL MODEL OF FORMATION OF PLASMA AND MAGNETIC FIELD QUASI-EQUILIBRIUM IN THE GALATHEA-TRAP «BELT»	152
<i>N.A. Chmykhova</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ EUV-ИЗЛУЧЕНИЯ С УЧЕТОМ ДЕТАЛЬНОЙ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ПОУРОВНЕВОЙ КИНЕТИКИ, ВКЛЮЧЕННОЙ IN-LINE В Г/Д РАСЧЕТ	153
<i>Д.А. Ким, В.Г. Новиков, Г.В. Долголева, А.Д. Соломянная</i>	
DETAILED NONSTATIONARY LEVEL KINETICS IN-LINE INCLUDED INTO GASDYNAMIC CALCULATIONS AND EUV-SOURCES MODELING.	153
<i>D.A. Kim, V.G. Novikov, G.V. Dolgoleva, A.D. Solomyannaya</i>	
РАСЧЕТ СЕЧЕНИЙ ФОТОИОНИЗАЦИИ МНОГОЭЛЕКТРОННЫХ ИОНОВ МЕТОДОМ ИСКАЖЕННЫХ ВОЛН	153
<i>А.С. Королев, П.А. Лобода</i>	
CALCULATION OF PHOTOIONIZATION CROSS-SECTIONS OF MULTI-ELECTRON IONS BY USING THE DISTORTED-WAVE APPROXIMATION	154
<i>A.S. Korolev, P.A. Loboda</i>	
РЕГИСТРАЦИЯ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ФРОНТА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ С ТЕОРЕТИЧЕСКИМ ОБОСНОВАНИЕМ И ДЕМОНСТРАЦИОННЫМИ ПРИМЕРАМИ	154
<i>Ю.И. Малахов, М.Я. Иванов, Н.К. Ши, В.В. Щаулов</i>	
REGISTRATION OF TEMPERATURE DEPENDENCE FOR ELECTROMAGNETIC FRONT VELOCITY WITH THEORETICAL SUPPORT AND DEMONSTRATION EXAMPLES	155
<i>Y.I. Malakhov, M.Ja. Ivanov, N.Q. Shi, V.V. Schaulov</i>	
ВОЗДЕЙСТВИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ	155
<i>Н.А. Скоркин, Н.Р. Садыков</i>	
EFFECT OF STATIONARY ELECTRIC FIELD TO CARBON NANOTUBES	155
<i>N.A. Scorkin, N.R. Sadykov</i>	
ПОТОК ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ, ТОК СМЕЩЕНИЯ И ЯВЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ В ФИЗИЧЕСКОМ ВАКУУМЕ С НЕНУЛЕВОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ	155
<i>В.К. Мамаев, М.Я. Иванов</i>	
ELECTROMAGNETIC ENERGY FLUX, DISPLACEMENT CURRENT AND POLARIZATION IN PHYSICAL VACUUM WITH NON ZERO TEMPERATURE	156
<i>V.K. Mamaev, M.Ja. Ivanov</i>	
УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УСКОРЕННЫХ ИОНОВ ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРНЫХ МИШЕНЕЙ	156
<i>Е.А. Говрас, В.Ю. Быченков</i>	
OPTIMIZATION OF TWO-COMPONENT LASER TARGETS PARAMETERS LEADING TO THE IMPROVEMENT OF ACCELERATED IONS CHARACTERISTICS	157
<i>E.A. Govras, V.Yu. Bychenkov</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРОВ ПРОТОНОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ТОНКИХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МИШЕНЕЙ НА УСТАНОВКЕ СОКОЛ-II	157
<i>О.Г. Котова, И.В. Глазырин, А.В. Карпеев, С.Н. Щербакова</i>	

NUMERICAL SIMULATION OF PROTON SPECTRA FROM THIN SOLID TARGET ON SOKOL-P LASER	157
<i>O.G. Kotova, I.V. Glazyrin, A.V. Karpeev, S.N. Shcherbakova</i>	
ОПТИМИЗАЦИЯ ГАЗОВЫХ МИШЕНЕЙ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ И ПРОТОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА 20 ТВт ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ СОКОЛ-П	158
<i>Г.В. Байдин, В.А. Лыков, Д.В. Торшин</i>	
OPTIMIZATION OF GAS TARGETS FOR ACCELERATION OF ELECTRONS AND PROTONS IN EXPERIMENTS ON THE 20 TW SOKOL -P LASER FACILITY	158
<i>G.V. Baidin, V.A. Lykov, D.V. Torshin</i>	
ИЗМЕРЕНИЕ ВЫХОДА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МИШЕНЕЙ, ОБЛУЧАЕМЫХ УЛЬТРАКОРОТКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ С ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ДО 10^{19} Вт/см ²	159
<i>Д.А. Вихляев, В.И. Афонин, Д.С. Гаврилов, А.Г. Какшин, Е.А. Лобода, А.В. Потапов, К.В. Сафронов, П.А. Толстоухов</i>	
MEASUREMENT OF X-RAY RADIATION OF THE TARGETS IRRADIATED BY ULTRA-SHORT LASER PULSES WITH INTENSITY UP TO 10^{19} W/cm ²	159
<i>D.A. Vikhlyayev, V.I. Afonin, D.S. Gavrilov, A.G. Kakshin, E.A. Loboda, A.V. Potapov, K.V. Safronov, P.A. Tolstoukhov</i>	
ИЗМЕРЕНИЕ ВЫХОДА НЕЙТРОНОВ РЕАКЦИИ $Li^7(p, n)Be^7$ В LiF МИШЕНИ, ОБЛУЧАЕМОЙ ПУЧКОМ ПРОТОНОВ, УСКОРЕННЫХ УЛЬТРАКОРОТКИМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ	160
<i>П.А. Толстоухов, Д.А. Вихляев, Д.С. Гаврилов, С.А. Горохов, А.Г. Какшин, А.В. Липин, Е.А. Лобода, В.А. Лыков, Е.С. Мокичева, С.Н. Пахомов, А.В. Потапов, К.В. Сафронов, Д.В. Торшин</i>	
NEUTRON YIELD MEASUREMENTS AT $Li^7(p, n)Be^7$ REACTION IN LiF TARGET IRRADIATED BY PROTON BEAM ACCELERATED BY ULTRA-SHORT LASER PULSE	160
<i>P.A. Tolstoukhov, D.A. Vikhlyayev, D.S. Gavrilov, S.A. Gorokhov, A.G. Kakshin, A.V. Lipin, E.A. Loboda, V.A. Lykov, E.S. Mokicheva, S.N. Pakhomov, A.V. Potapov, K.V. Safronov, D.V. Torshin</i>	
ЛАЗЕР НА ОСНОВЕ ПЛАСТИНЧАТОГО АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА С ЗИГЗАГОБРАЗНЫМ ХОДОМ ПУЧКА С ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТЬЮ БОЛЕЕ 100 Вт	161
<i>А.Д. Ляшедько, В.Ф. Серегин, В.Б. Цветков</i>	
ZIGZAG SLAB LASER WITH OUTPUT POWER MORE THAN 100 W	161
<i>A.D. Lyashedko, V.F. Seregin, V.B. Tsvetkov</i>	
СИСТЕМА КОГЕРЕНТНОГО СЛОЖЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ИТТЕРБИЕВЫХ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ	161
<i>А.И. Трикушев, А.С. Курков, В.Б. Цветков, Ю.Н. Пырков, Е.М. Шолохов</i>	
COHERENT BEAM COMBINATION OF YTTERBIUM-DOPED FIBER LASERS	162
<i>A.I. Trikshev, A.S. Kurkov, V.B. Tsetkov, Y.N. Pyrkov, E.M. Sholokhov</i>	
НЕПРЕРЫВНЫЕ И ИМПУЛЬСНЫЕ ГОЛЬМИЕВЫЕ ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ, РАБОТАЮЩИЕ В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ ОТ 2 ДО 2,1 МКМ.	162
<i>Е.М. Шолохов, А.С. Курков, А.В. Маракулин</i>	
CONTINUOUS AND PULSED HOLMIUM FIBER LASERS MEDIUM POWER OPERATING IN THE TWO MICRON SPECTRAL RANGE (2–2.1 MM)	163
<i>Е.М. Шолохов, А.С. Курков, А.В. Маракулин</i>	
ФОРМИРОВАНИЕ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАЗМОПОЛНЕННОМ СТЕРЖНЕВОМ ПИНЧ-ДИОДЕ	163
<i>С.А. Сорокин</i>	
FORMATION OF A POINT-LIKE X-RAY SOURCE IN A PLASMA-FILLED ROD-PINCH DIODE.	164
<i>S.A. Sorokin</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ С ВЕЩЕСТВОМ	164
<i>А.Я. Лейви, А.П. Яловец</i>	
THE SIMULATION OF THE COMPRESSION PLASMA FLOW INTERACTION WITH SUBSTANCE	164
<i>A.Ya. Leyvi, A.P. Yalovets</i>	
ДИНАМИКА ЗАРЯДА В ДИЭЛЕКТРИКЕ ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ	165
<i>А.А. Эбель, А.Е. Майер, А.П. Яловец</i>	
DYNAMICS OF CHARGE IN DIELECTRIC UNDER THE ELECTRON IRRADIATION.	165
<i>A.A. Ebel, A.E. Mayer, A.P. Yalovetz</i>	

СТРУКТУРА И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЕННОГО КАНАЛА, ОБРАЗОВАННОГО ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ВДОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ МИКРОПРОВОДНИКОВ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИМПУЛЬСА НАПРЯЖЕНИЯ С СУБНАНОСЕКУНДНЫМ ФРОНТОМ	166
<i>С.В. Баракхвостов, М.Б. Бочкарев, Н.Б. Волков, К.А. Нагаев, В.П. Тараканов, С.И. Ткаченко, Е.А. Чингина</i>	
STRUCTURE AND OPTICAL CHARACTERISTICS OF PLASMA CHANNEL, GENERATED BY HIGH-VOLTAGE PULSE WITH SUBNANOSECOND FRONT PROPAGATING ALONG MICROCONDUCTOR SURFACE	166
<i>S.V. Barakhvostov, M.B. Bochkaev, N.B. Volkov, K.A. Nagayev, V.P. Tarakanov, S.I. Tkachenko, E.A. Chingina</i>	
РЕГИСТРАЦИЯ ОБЛАСТИ ГЕНЕРАЦИИ НЕЙТРОНОВ В КАМЕРЕ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТРИЧНОГО СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА	167
<i>Н.Г. Игнатьев, Б.Д. Лемешко, А.К. Дулатов, П.С. Крапива</i>	
REGISTRATION OF AREA OF NEUTRONS GENERATION IN THE PLASMA FOCUS CHAMBER WITH USE MATRIX OF SCINTILLATION DETECTOR	167
<i>N.G. Ignatyev, B.D. Lemeshko, A.K. Dulatov, P.S. Krapiva</i>	
ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ТРИТИЕВЫХ МИШЕНЕЙ В СОСТАВЕ ВАКУУМНЫХ НЕЙТРОННЫХ ТРУБОК.	167
<i>А.А. Коробейников, Б.Д. Лемешко, С.А. Саратулов, Ю.К. Пресняков</i>	
CONDITION DIAGNOSTICS TRITIUM TARGETS AS A PART OF VACUUM NEUTRON TUBES	168
<i>A.A. Korobeinikov, B.D. Lemeshko, S.A. Sarapulov, Yu.K. Presnyakov</i>	
СИСТЕМА ИМПУЛЬСНОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПИТАНИЯ ЛИУ-2	168
<i>А.В. Акимов</i>	
HIGH VOLTAGE PULSED POWER SYSTEM OF LIA-2 ACCELERATOR.	168
<i>A.V. Akimov</i>	
ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ИНЖЕКТОРЕ ЛИУ (ЛИУ-2)	168
<i>О.А. Никитин, М.Ю. Столбиков, А.Р. Ахметов, П.С. Базаров, Д.А. Железкин, С.Д. Хренков, А.А. Каргин, К.С. Шубин, Д.В. Сысков, А.В. Акимов, П.А. Бак, М.А. Батазова, А.М. Батраков, О.В. Беликов, Ю.М. Боймелштейн, Д.Ю. Болховитянов, А.А. Елисеев, Ф.А. Еманов, Г.А. Фатькин, А.А. Корепанов, А.Н. Косарев, Я.В. Куленко, Г.И. Кузнецов, П.В. Логачев, И.В. Николаев, А.В. Оттмар, А.А. Пачков, А.Н. Панов, О.А. Павлов, Д.Н. Пурескин, Е.С. Рувинский, Д.А. Старостенко, С.О. Суворов, Ю.Ф. Токарев, А.П. Торшин, С.В. Тур</i>	
MEASUREMENT OF ELECTRON BEAM PARAMETERS IN LIU INJECTOR (LIU-2)	169
<i>O.A. Nikitin, M.Yu. Stolbikov, A.R. Akhmetov, P.S. Bazarov, D.A. Zhelezkin, S.D. Khrenkov, A.A. Kargin, K.S. Shubin, D.V. Syskov, A.V. Akimov, P.A. Bak, M.A. Batazova, A.M. Batrakov, O.V. Belikov, Yu.M. Boimelshtein, D.Yu. Bolkhovityanov, A.A. Eliseev, F.A. Emanov, G.A. Fat'kin, A.A. Korepanov, A.N. Kosarev, Ya.V. Kulenko, G.I. Kuznetsov, P.V. Logachev, I.V. Nikolaev, A.V. Ottmar, A.A. Pachkov, A.N. Panov, O.A. Pavlov, D.N. Pureskin, E.S. Ruvinsky, D.A. Starostenko, S.O. Suvorov, Yu.F. Tokarev, A.P. Torshin, S.V. Tur</i>	
ПОДГОТОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ИНЖЕКТОРЕ ЛИУ (ЛИУ-2)	169
<i>О.А. Никитин, М.Ю. Столбиков, А.Р. Ахметов, П.С. Базаров, Д.А. Железкин, С.Д. Хренков, А.А. Каргин, К.С. Шубин, Д.В. Сысков, А.В. Акимов, П.А. Бак, М.А. Батазова, А.М. Батраков, О.В. Беликов, Ю.М. Боймелштейн, Д.Ю. Болховитянов, А.А. Елисеев, Ф.А. Еманов, Г.А. Фатькин, А.А. Корепанов, А.Н. Косарев, Я.В. Куленко, Г.И. Кузнецов, П.В. Логачев, И.В. Николаев, А.В. Оттмар, А.А. Пачков, А.Н. Панов, О.А. Павлов, Д.Н. Пурескин, Е.С. Рувинский, Д.А. Старостенко, С.О. Суворов, Ю.Ф. Токарев, А.П. Торшин, С.В. Тур</i>	
PREPARATION AND CONDUCTING RADIOGRAPHIC EXPERIMENTS ON INJECTOR LIU (LIU-2).	170
<i>O.A. Nikitin, M.Yu. Stolbikov, A.R. Akhmetov, P.S. Bazarov, D.A. Zhelezkin, S.D. Khrenkov, A.A. Kargin, K.S. Shubin, D.V. Syskov, A.V. Akimov, P.A. Bak, M.A. Batazova, A.M. Batrakov, O.V. Belikov, Yu.M. Boimelshtein, D.Yu. Bolkhovityanov, A.A. Eliseev, F.A. Emanov, G.A. Fatkin, A.A. Korepanov, A.N. Kosarev, Ya.V. Kulenko, G.I. Kuznetsov, P.V. Logachev, I.V. Nikolaev, A.V. Ottmar, A.A. Pachkov, A.N. Panova, O.A. Pavlov, D.N. Pureskin, E.S. Ruvinsky, D.A. Starostenko, S.O. Suvokov, Yu.F. Tokarev, A.P. Torshin, S.V. Tur</i>	
ОТРАБОТКА КАТОД-АНОДНОЙ ПАРЫ РЕНТГЕНОВСКОЙ УСТАНОВКИ РФЯЦ – ВНИИТФ ИГУР-3,5 ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РЕГИСТРАЦИИ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ	170
<i>П.С. Базаров, А.М. Василенко, М.Ю. Столбиков, О.А. Никитин, В.Е. Черемазов</i>	
FURTHER DEVELOPMENT OF CATHODE-ANODE PAIR OF IGUR-3,5 X-RAY FACILITY (RFNC – VNIITF) TO OPTIMIZE HIGH-SPEED PROCESS REGISTRATION	171
<i>P.S. Bazarov, A.M. Vasilenko, M.Y. Stolbikov, O.A. Nikitin, V.E. Chermazov</i>	

РАЗРЯДНИК ТРИГАТРОННОГО ТИПА ДЛЯ УСКОРИТЕЛЯ РАПИД-2.	171
<i>А.М. Гафаров, Н.М. Вагина, А.В. Власова</i>	
TRIGATRON TYPE DISCHARGER FOR RAPID-2 ACCELERATOR	171
<i>A.M. Gafarov, N.M. Vagina, A.V. Vlasova</i>	
ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР С ЛАЗЕРНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ ДЛЯ ПИТАНИЯ ВАКУУМНЫХ ФОТОЭЛЕМЕНОВ СШП – ГЕНЕРАТОРОВ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ	171
<i>А.А. Зубков, Р.Н. Мунасуров, Н.Н. Хавронин</i>	
HIGH-VOLTAGE PERIODIC GENERATOR WITH LASER SYNCHRONIZATION TO POWER VACUUM PHOTOCELLS OF ULTRA-WIDEBAND MICROWAVE GENERATORS	172
<i>A.A. Zubkov, R.N. Munasurov, N.N. Khavronin</i>	
СЕКЦИЯ 4. СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ПРОЦЕССАХ	
SECTION 4. PROPERTIES OF MATTER AT HIGH-INTENSITY PROCESSES	
КВАЗИИЗЭНТРОПИЧЕСКОЕ И УДАРНО-ВОЛНОВОЕ СЖАТИЕ ПЛОТНОГО ГАЗООБРАЗНОГО ДЕЙТЕРИЯ В ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ ДО 500 ГПа.	175
<i>М.В. Жерноклетов, В.А. Аринин, В.Н. Бузин, Н.Б. Давыдов, С.И. Киришанов, А.Б. Межевов, М.Г. Новиков, В.Д. Орлов, В.В. Хрусталева</i>	
QUASI-ISENTROPIC AND SHOCK-WAVE COMPRESSION OF DENSE GASEOUS DEUTERIUM IN PRESSURE RANGE UP TO 500 GPa.	175
<i>M.V. Zernokletov, V.A. Arinin, V.N. Buzin, N.B. Davydov, S.I. Kirshanov, A.B. Mezhenov, M.G. Novikov, V.D. Orlov, V.V. Khrustaleva</i>	
МНОГОФАЗНОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ДЕЙТЕРИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ	176
<i>К.В. Хищенко</i>	
MULTIPHASE EQUATION OF STATE FOR DEUTERIUM AT HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES	176
<i>K.V. Khischenko</i>	
ПЕРВОПРИНЦИПНЫЕ РАСЧЕТЫ УПРУГИХ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОЦТ И ОЦК СТРУКТУР ОЛОВА	176
<i>Н.А. Смирнов</i>	
AB INITIO CALCULATIONS FOR THE ELASTIC AND THERMODYNAMIC PROPERTIES OF BCT AND BCC TIN	176
<i>N.A. Smirnov</i>	
МОДЕЛЬ ПОГРУЖЕННОГО АТОМА И КРУПНОМАСШТАБНОЕ МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ ОЛОВА	176
<i>Ф.А. Сапожников, Г.В. Ионов, В.В. Дрёмов, Л. Сулар</i>	
EMBEDDED ATOM MODEL AND LARGE-SCALE MOLECULAR DYNAMICS SIMULATION OF SHOCK LOADING OF TIN	177
<i>F.A. Sapozhnikov, G.V. Ionov, V.V. Dremov, L. Soulard</i>	
НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ОСТОВНЫХ ПСЕВДОПОТЕНЦИАЛОВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СПЕКТРОВ СОЕДИНЕНИЙ АКТИНИДОВ ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ	178
<i>А.В. Зайцевский, А.В. Титов, Н.С. Мосягин</i>	
NEW GENERATION OF RELATIVISTIC CORE PSEUDOPOTENTIALS AND FIRST-PRINCIPLE BASED MODELING OF STRUCTURES AND SPECTRA OF ACTINIDE COMPOUNDS	178
<i>A.V. Zaitsevskiy, A.V. Titov, N.S. Mosyagin</i>	
ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ЗВУКА В ТИТАНЕ И ЕГО СПЛАВЕ В ОБЛАСТИ ПОЛИМОРФНОГО ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ДО ДАВЛЕНИЙ 150 ГПа	179
<i>Л.И. Канунова, С.И. Киришанов, А.Е. Ковалев, А.Б. Межевов, М.Г. Новиков</i>	
MEASUREMENT OF SOUND VELOCITIES IN TITANIUM AND IN ITS ALLOY VT-20 IN AREA OF POLYMORPHIC PHASE TRANSITION UP TO PRESSURES OF 150 GPa	179
<i>M.V. Zhernokletov, L.I. Kanunova, A.E. Kovalev, S.I. Kirshanov, A.B. Mezhevo, M.G. Novikov, M.E. Shavrin</i>	
ПОВЕРХНОСТНАЯ СВОБОДНАЯ ЭНЕРГИЯ ЗАРОДЫШЕЙ НОВОЙ ФАЗЫ В ОБЛАСТИ СИЛЬНОЙ МЕТАСТАБИЛЬНОСТИ	180
<i>В.Г. Байдаков, К.С. Бобров, А.О. Тупеев</i>	
SURFACE FREE ENERGY OF NEW-PHASE NUCLEI IN A REGION OF HIGH METASTABILITY	180
<i>V.G. Baidakov, K.S. Bobrov, A.O. Tureev</i>	

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦЫ ДОСТИЖИМОГО ПЕРЕСЫЩЕНИЯ ЖИДКОЙ И КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ФАЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ НУКЛЕАЦИИ В ОЛОВЕ И БЕРИЛЛИИ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	180
<i>Г.В. Ионов, В.В. Дрёмов, А.В. Караваяев, С.П. Проценко, В.Г. Байдаков, А.О. Тупеев</i>	
EVALUATION OF METASTABLE REGION BOUNDARIES FOR LIQUID AND SOLID STATES IN MD SIMULATIONS	181
<i>G.V. Ionov, V.V. Dremov, A.V. Karavaev, S.P. Protsenko, V.G. Baidakov, A.O. Tipsev</i>	
КОЭФФИЦИЕНТЫ САМОДИФФУЗИИ, СДВИГОВОЙ И ОБЪЕМНОЙ ВЯЗКОСТИ В МЕТАСТАБИЛЬНЫХ СОСТОЯНИЯХ ПРОСТОГО ФЛЮИДА	181
<i>С.П. Проценко, В.Г. Байдаков, З.Р. Козлова</i>	
COEFFICIENTS OF SELF-DIFFUSION, SHEAR AND BULK VISCOSITY IN METASTABLE STATES OF A SIMPLE FLUID	182
<i>S.P. Protsenko, V.G. Baidakov, Z.R. Kozlova</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ В ИМПУЛЬСНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ С ПРОВОЛОЧНЫМ ЗОНДОМ	182
<i>В.И. Горбатов, А.Д. Ямпольский, А.А. Смотрицкий, А.А. Старостин, П.В. Скрипов</i>	
АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ДЕФЕКТОВ В МОЛИБДЕНЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОБЛУЧЕНИЯ	183
<i>А.В. Янилкин, А.Ю. Куксин, Г.Э. Норман, В.В. Стегайлов</i>	
ATOMISTIC SIMULATION OF DEFECT EVOLUTION UNDER IRRADIATION IN MOLYBENUM.	183
<i>A.V. Yanilkin, A.Yu. Kuxsin, G.E. Norman, V.V. Stegailov</i>	
ВЛИЯНИЕ $\alpha' - \epsilon - \alpha'$ И $\alpha' - \epsilon - \gamma$ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ 30ХГСА HRC 35...40 НА ПРОТЕКАНИЕ В ОБРАЗЦАХ ОТКОЛЬНЫХ РАЗРУШЕНИЙ	184
<i>Е.А. Козлов, С.А. Бричков, Д.М. Шалковский, А.А. Брагин</i>	
THE INFLUENCE OF $\alpha' - \epsilon - \alpha'$ AND $\alpha' - \epsilon - \gamma$ PHASE TRANSITIONS IN QUENCHED STEEL 30KHGSA HRC 35...40 ON SPALLATION SAMPLES	184
<i>E.A. Kozlov, S.A. Brichikov, D.M. Shalkovsky, A.A. Bragin</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОФИЛЕЙ ВОЛН РАЗГРУЗКИ В СТАЛИ 30ХГСА, ПРЕТЕРПЕВАЮЩЕЙ ϵ - α ПРЕВРАЩЕНИЕ	184
<i>А.С. Майорова, А.В. Павленко, С.И. Балабин, А.В. Дулов, О.Е. Козелков</i>	
INVESTIGATION INTO RAREFACTION WAVE POFILES IN 30NHGSA STEEL UNDERGOING THE ϵ - α TRANSFORMATION	185
<i>A.S. Mayorova, A.V. Pavlenko, S.I. Balabin, A.V. Dulrov, O.E. Kozelkov</i>	
СВОЙСТВА ФИБРОБЕТОНА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ	185
<i>А.М. Брагов, А.Ю. Константинов, Д.А. Ламзин, А.К. Ломунов</i>	
PROPERTIES OF FIBER REINFORCED CONCRETE UNDER DYNAMIC LOADING	185
<i>A.M. Bragov, A.Yu. Konstantinov, D.A. Lamzin, A.K. Lomunov</i>	
СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ВОЛЬФРАМА В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СОУДАРЕНИЯ	186
<i>С.А. Афанасьева, Н.Н. Белов, А.Н. Ищенко, А.Н. Табаченко, М.В. Хабибуллин, Н.Т. Югов</i>	
PROPERTIES OF TUNGSTEN-BASED COMPOSITE MATERIALS IN THE CONDITIONS OF HIGH-SPEED IMPACT.	186
<i>S.A. Afanasyeva, N.N. Belov, A.N. Ishchenko, A.N. Tabachenko, M.V. Habibullin, N.T. Yugov</i>	
ПРОЧНОСТЬ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ Ti-Al ₃ Ti ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ.	186
<i>А.М. Пацелов, В.В. Рыбин, Б.А. Гринберг</i>	
STRENGTH OF Ti-Al ₃ Ti LAMINATED COMPOSITES UNDER STATIC AND DINAMIC LOAD	187
<i>A.M. Patselov, V.V. Rybin, B.A. Greenberg</i>	
ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДИССИПАЦИИ УПРУГОЙ ЭНЕРГИИ В УМК АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ ПРИ СЖАТИИ ПО МЕТОДИКЕ КОЛЬСКОГО	187
<i>А.Н. Петрова, И.Г. Бродова, О.А. Плехов, О.Б. Наймарк, Е.В. Шорохов</i>	
THE FEATURES OF DEFORMATION BEHAVIOR AND REGULARITIES OF ENERGY DISSIPATION IN ULTRAFINEGRAINED ALUMINUM ALLOYS DURING COMPRESSION BY KOLSKY METHOD	188
<i>A.N. Petrova, I.G. Brodova, O.A. Plekhov, O.B. Naimark, E.V. Shorokhov</i>	

ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ: АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	188
<i>А.Ю. Куксин, А.В. Янилкин</i>	
PLASTIC DEFORMATION UNDER SHOCK WAVE LOADING: ATOMISTIC SIMULATIONS	189
<i>A.Yu. Kuksin, A.V. Yanilkin</i>	
ОБРАТНЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА-ПЕТЧА В УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ МЕТАЛЛАХ ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ	189
<i>И.Н. Бородин, А.Е. Дудоров, А.Е. Майер</i>	
INVERSE HALL-PETCH RELATION IN ULTRAFINE GRAINED METALS AT HIGH STRAIN RATES	190
<i>E.N. Borodin, A.E. Dudorov, A.E. Mayer</i>	
РАЗВИТИЕ МАКСВЕЛЛОВСКОГО ПОДХОДА В МОДЕЛЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРОВ	190
<i>Л.А. Мерзиевский, М.С. Воронин, А.Н. Корчагина</i>	
DEVELOPMENT OF THE MAKSVELL APPROACH IN MODELS OF THE DYNAMIC DEFORMATIONS OF POLYMERS	190
<i>L.A. Merzhievsky, M.S. Voronin, A.N. Korchagina</i>	
ШИРОКОДИАПАЗОННЫЕ ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ УРАВНЕНИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ	191
<i>О.Б. Наймарк</i>	
WIDE-RANGE CONSTITUTIVE EQUATIONS, EXPERIMENTAL VERIFICATION AND MATERIAL MODELING UNDER INTENSE LOADING	191
<i>O.B. Naimark</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТИТАНА МАРКИ ВТ1-0 И СТАЛИ 30ХГСА В РАЗЛИЧНЫХ ПОЛИМОРФНЫХ МОДИФИКАЦИЯХ	192
<i>А.В. Павленко, А.Н. Папгозин</i>	
DYNAMIC PROPERTIES OF VT1-0 TITANIUM AND 30NHGSA STEEL IN VARIOUS POLYMORPHIC MODIFICATIONS	192
<i>A.V. Pavlenko, A.N. Paigozin</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВА В ОБЛАСТИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЙ, СОЗДАВАЕМЫХ ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА ПИКОВОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ	193
<i>С.А. Абросимов, А.П. Бажулин, В.В. Воронов, И.К. Красюк, П.П. Пащинин, А.Ю. Семенов, И.А. Стучебрюхов, К.В. Хищенко</i>	
INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF MATTER IN THE FIELD OF NEGATIVE PRESSURES CREATED BY MEANS OF PICOSECOND LASER PULSE	193
<i>I.K. Krasnyuk, S.A. Abrosimov, A.P. Bazhulin, V.V. Voronov, P.P. Pashinin, A.Yu. Semenov, I.A. Stuchebruykhov, K.V. Khishchenko</i>	
ОСОБЕННОСТИ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ БЕРИЛЛИЯ.	193
<i>В.А. Аринин, Д.В. Крючков, А.Н. Мальшев, В.А. Огородников, К.Н. Панов, В.В. Пешков, В.А. Раевский, В.И. Скоков</i>	
PECULIARITIES OF SPALL FRACTURE OF BERYLLIUM	194
<i>V.A. Arinin, D.V. Kryuchkov, A.N. Malyshev, V.A. Ogorodnikov, K.N. Panov, V.V. Peshkov, V.A. Raevsky, V.I. Skokov</i>	
НЕУСТОЙЧИВОСТЬ И ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ПРОБИВАНИИ КАК РЕЗУЛЬТАТ СТРУКТУРНО-КИНЕТИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ В АНСАМБЛЯХ МИКРОСДВИГОВ.	194
<i>М.А. Соковиков, В.В. Чудинов, С.В. Уваров, О.А. Плехов, Е.А. Ляпунова, Ю.В. Баяндин, О.Б. Наймарк</i>	
INSTABILITY AND LOCALIZATION OF PLASTIC DEFORMATION UNDER HIGH-SPEED PERFORATION DUE TO STRUCTURAL-KINETIC TRANSITIONS IN MICROSHEAR ENSEMBLES	195
<i>M.A. Sokovikov, V.V. Chudinov, S.V. Uvarov, O.A. Plekhov, E.A. Lyapunova, Yu.V. Bayandin, O.B. Naimark</i>	
НЕКОТОРЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗРУШЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ	195
<i>Ху Хайбо, Тан Тьеган, Чен Йонтао, Ван Янпин, Ли Кинжон</i>	
SOME EXPERIMENTAL ASPECTS ON FRACTURE MODELLING OF CYLINDRICAL METAL SHELLS UNDER EXPLOSIVE LOADING	196
<i>Hu Haibo, Tang Tiegang, Chen Yongtao, Wang Yanping, Li Qinzong</i>	
ПЛАСТИЧНОСТЬ СТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК, НАГРУЖЕННЫХ ВЗРЫВОМ	196
<i>М.М. Бойко, Е.Ф. Грязнов, Е.В. Никитина</i>	

PLASTICITY OF CYLINDRICAL SHELLS, LOADED EXPLOSION	196
<i>M.M. Boiko, E.F. Gryaznov, E.V. Nikitina</i>	
ДИНАМИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ	197
<i>A.E. Mayer, V.S. Krasnikov</i>	
DYNAMIC FRACTURE OF METALS IN WIDE RANGE OF STRAIN RATE	197
<i>A.E. Mayer, V.S. Krasnikov</i>	
ОБ ОДНОЙ МОДЕЛИ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ	197
<i>В.Ф. Куропатенко, И.В. Лавренюк</i>	
ABOUT ONE MODEL OF SPALL DESTRUCTION	198
<i>V.F. Kuropatenko, I.V. Lavrenyuk</i>	
О СИНЕРГЕТИЧЕСКИХ И АТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ В ДИНАМИЧЕСКИХ ДЕСТРУКТИВНЫХ ЯВЛЕНИЯХ	198
<i>А.Я. Учаев, В.Т. Пунин, Н.И. Сельченкова, Е.В. Кошелева</i>	
ON SYNERGETIC AND ATHERMIC PROCESSES IN THE DYNAMIC FAILURE PHENOMENA	199
<i>A.Ya. Uchaev, V.T. Punin, N.I. Sel'chenkova, E.V. Kosheleva</i>	
ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ДОЛГОВЕЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ В ЯВЛЕНИИ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ	199
<i>А.Я. Учаев, В.Т. Пунин, С.С. Соколов, Н.И. Сельченкова, Е.В. Кошелева, Л.В. Жабька</i>	
PHYSICAL NATURE OF METALS LONGEVITY IN THE DYNAMIC FAILURE PHENOMENON	200
<i>A.Ya. Uchaev, S.S. Sokolov, N.I. Sel'chenkova, E.V. Kosheleva, L.V. Zhabyka</i>	
КРУПНОМАСШТАБНЫЕ МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ВЫБРОСА МАТЕРИАЛА	200
<i>Оливер Дюран, Лоран Солар</i>	
LARGE SCALE MOLECULAR DYNAMICS SIMULATIONS OF SHOCK-INDUCED EJECTA PRODUCTION	200
<i>Olivier Durand, Laurent Soulard</i>	
ФАЗОВЫЕ, СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ОТКОЛЬНЫХ РАЗРУШЕНИЙ ПЛАСТИН И ОБОЛОЧЕК ИЗ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ 30ХГСА И СТАЛИ 12Х18Н10Т ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ	201
<i>Е.А. Козлов, В.И. Таржанов, И.В. Теличко, С.А. Бричков, Д.С. Боярников, Д.П. Кучко, А.В. Ольховский, В.Н. Ногин, А.В. Петровцев, Д.М. Шалковский, А.В. Добромыслов, Н.И. Талуц</i>	
PHASE, STRUCTURAL TRANSFORMATIONS, AND PECULIARITIES OF SPALL FRACTURE OF PLATES AND SHELLS OF QUENCHED STEEL 30KHGSA AND STEEL 12KH18N10T UNDER EXPLOSIVE LOADING	201
<i>Е.А. Козлов, В.И. Таржанов, И.В. Теличко, С.А. Бричков, Д.С. Боярников, Д.П. Кучко, А.В. Ольховский, В.Н. Ногин, А.В. Петровцев, Д.М. Шалковский, А.В. Добромыслов, Н.И. Талуц</i>	
ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ МЕДИ В УСЛОВИЯХ НАГРУЖЕНИЯ СФЕРИЧЕСКИ СХОДЯЩИМИСЯ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ	202
<i>А.В. Добромыслов, Н.И. Талуц, Е.А. Козлов</i>	
DEFORMATION BEHAVIOUR OF COPPER LOADED BY SPHERICAL CONVERGING SHOCK WAVES	202
<i>А.В. Добромыслов, Н.И. Талуц, Е.А. Козлов</i>	
ФАЗОВОЕ α - ϵ ПРЕВРАЩЕНИЕ И ОСОБЕННОСТИ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ ВЫСОКОЧИСТОГО НЕЛЕГИРОВАННОГО ЖЕЛЕЗА ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ.	203
<i>Е.А. Козлов, В.И. Таржанов, И.В. Теличко, Д.Г. Панкратов, А.В. Петровцев, И.Г. Бродова, А.В. Добромыслов, Н.И. Талуц, Дж.Т. Грэй III, М.А. Зохер</i>	
PHASE α - ϵ TRANSITION AND PECULIARITIES OF SPALL FRACTURE OF HIGH-PURITY UNALLOYED IRON UNDER EXPLOSIVE LOADING	203
<i>Е.А. Козлов, В.И. Таржанов, И.В. Теличко, Д.Г. Панкратов, А.В. Петровцев, И.Г. Бродова, А.В. Добромыслов, Н.И. Талуц, Дж.Т. Грэй III, М.А. Зохер</i>	
ЧИСЛЕННОЕ 2D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКОЛЬНЫХ РАЗРУШЕНИЙ В ОБРАЗЦАХ ИЗ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ 30ХГСА НРС 35...40 ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ В ОБЛАСТИ ПРОТЕКАНИЯ ОБРАТИМОГО α - ϵ -ФАЗОВОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ	204
<i>Е.А. Козлов, О.В. Ольхов, С.С. Соколов, М.А. Аношин, Л.Я. Габзетдинова, Н.С. Жилиева, Л.В. Хардина, Д.М. Шалковский, Е.В. Шувалова</i>	

NUMERICAL 2D SIMULATION OF SPALL DAMAGE IN SAMPLES OF QUENCHED STEEL 30KHGSA HRC 35...40 AT EXPLOSIVE LOADING IN REGION OF REVERSIBLE α - ϵ -PHASE TRANSITION	204
<i>E.A. Kozlov, O.V. Olkhov, S.S. Sokolov, M.A. Anoshin, L.Ya. Gabeztdinova, N.S. Zhilyayeva, L.V. Khardina, D.M. Shalkovsky, E.V. Shuvalova</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРУШЕННОЙ СРЕДЫ ОСЕВЫМ СЖАТИЕМ	205
<i>С.Н. Косоруков, А.А. Шахов</i>	
DETERMINING THE DESTRUCTION CHARACTERISTICS FOR THE AXIALLY COMPRESSED MEDIUM	205
<i>S.N. Kosorukov, A.A. Shakhov</i>	
САМООРГАНИЗОВАННАЯ КРИТИЧНОСТЬ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ПЛАВЛЕННОГО КВАРЦА	206
<i>С.В. Уваров, М.М. Давыдова</i>	
SELF-ORGANIZED CRITICALITY IN THE MECHANOLUMINESCENCE OF SHOCKED QUARZ ROD	206
<i>S.V. Uvarov, M.M. Davydova</i>	
СТРУКТУРНЫЕ И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СПЛАВЕ Al - 5%Fe ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КВАЗИСФЕРИЧЕСКИХ УДАРНЫХ ВОЛН	206
<i>И.Г. Бродова, Е.А.Козлов, В.В. Астафьев, Т.И. Яблонских</i>	
STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS IN Al – 5% Fe ALLOY UNDER LOADING OF QUASISPHERICAL SHOCK WAVES	207
<i>I.G. Brodova, E.A. Kozlov, V.V. Astafyev, T.I. Yablonskikh</i>	
УДАРНО-ИНИЦИИРОВАННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕТЕОРИТНОГО ЖЕЛЕЗА С СИЛИКАТАМИ	207
<i>Д.Д. Бадюков, В.С. Русаков</i>	
SHOCK-INDUCED REACTION OF METEORITE IRON WITH SILICATES.	207
<i>D.D. Badyukov, V.S. Rusakov</i>	
ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНЫХ И ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В КВАРЦЕ И СМЕСИ ПОРОШКОВ КВАРЦА И МЕДИ ПРИ НАГРУЖЕНИИ СФЕРИЧЕСКИ СХОДЯЩИМИСЯ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ	208
<i>Н.И. Талуц, А.В. Добромыслов, Е.А. Козлов, В.М. Гундырев, Ю.С. Поносос</i>	
PECULIARITIES OF STRUCTURE AND PHASE TRANSFORMATIONS IN QUARTZ AND IN THE MIXTURE OF QUARTZ AND COPPER POWDERS UNDER LOADING BY SPHERICAL CONVERGING SHOCK WAVES	208
<i>N.I. Taluts, A.V. Dobromyslov, E.A. Kozlov, V.M. Gundyreb, Yu.S. Ponosov</i>	
ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО И КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ВАЛЕНТНОСТЬ ИОНОВ, СТРУКТУРУ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ОКСИДОВ КАК МОДЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ МИНЕРАЛОВ	209
<i>Б.А. Гижевский, В.Р. Галахов, Е.А. Козлов</i>	
EFFECT OF DYNAMIC AND QUASI-STATIC DEFORMATIONS ON VALENCY OF IONS, STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF OXIDES AS MODEL OBJECTS OF MINERALS	209
<i>B.A. Gizhevskii, V.R. Galakhov, E.A. Kozlov</i>	
УДАРНОЕ СЖАТИЕ ДВУСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК	210
<i>В.В. Милявский, М. Mases, J. Waldbock, M. Dossot, X. Devaux, E. Mrae, A.B. Солдатов</i>	
SHOCK COMPRESSION OF DOUBLE WALLED CARBON NANOTUBES	210
<i>V.V. Milyavsky, M. Mases, J. Waldbock, M. Dossot, X. Devaux, E. Mrae³, A.V. Soldatov</i>	
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ГИДРИДОВ ЛЕГКИХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЯХ	210
<i>Д.В. Шахрай</i>	
ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF LIGHT METAL HYDRIDES AT HIGH DYNAMIC PRESSURE	211
<i>D.V. Shakhrai, A.M. Molodets, V.E. Fortov</i>	
ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО УДАРНО-ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СУБСТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ α -, β - И γ -ФАЗ НИТРИДА КРЕМНИЯ	211
<i>А.Н. Жуков, В.В. Якушев, А.И. Рогачёва, В.А. Кудакина</i>	
THE EFFECT OF HIGH TEMPERATURE SHOCK WAVE COMPRESSION ON α -, β -, AND γ -SILICON NITRIDE SUBSTRUCTURE	211
<i>A.N. Zhukov, V.V. Yakushev, A.I. Rogacheva, V.A. Kudakina</i>	
СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СВАРКИ ВЗРЫВОМ.	212
<i>И.А. Батаев, А.А. Батаев, В.И. Мали, Д.В. Павлюкова, П.С. Ярцев, А.С. Гонтаренко</i>	

STRUCTURE AND PROPERTIES OF MULTILAYER COMPOSITES PRODUCED BY EXPLOSIVE WELDING	212
<i>I.A. Bataev, A.A. Bataev, V.I. Mali, D.V. Pavlyukova, P.S. Yartsev, A.S. Gontarenko</i>	
СТРУКТУРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ДИНАМИЧЕСКИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН	213
<i>И.А. Батаев, А.А. Батаев, В.И. Мали, М.А. Есиков, В.С. Ложкин</i>	
STRUCTURAL CHANGES IN THE SURFACE LAYERS OF DYNAMICALLY INTERACTING METAL SHEETS	213
<i>I.A. Bataev, A.A. Bataev, V.I. Mali, M.A. Esikov, V.S. Lozhkin</i>	
ВЛИЯНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ТИТАНА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТАБИЛЬНОСТЬ СТРУКТУРЫ ПРИ НАГРЕВЕ	214
<i>Н.Ю. Фролова, В.И. Зельдович, А.Э. Хейфец, Е.В. Шорохов, И.В. Хомская, П.А. Насонов</i>	
INFLUENCE OF COMBINED TREATMENT OF TITANIUM FOR MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE STABILITY DURING HEATING	214
<i>N.Yu. Frolova, V.I. Zel'dovich, A.E. Kheifets, E.V. Shorokhov, I.V. Khomsкая, P.A. Nasonov</i>	
ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ ЖАРОПРОЧНЫХ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ.	215
<i>Н.В. Казанцева, Е.В. Шорохов, Н.И. Виноградова, Н.Н. Степанова</i>	
DEFORMATION BEHAVIOR OF THE HEAT- RESISTANT INTERMETALLIC COMPOUNDS UNDER THE SHOCK WAVE LOADING	215
<i>N.V. Kazantseva, E.V. Shorokhov, N.I. Vinogradova, N.N. Stepanova</i>	
ФАЗОВЫЕ И СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА И МЕДИ ПРИ НАГРУЖЕНИИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ.	215
<i>И.В. Хомская, В.И. Зельдович</i>	
PHASE AND STRUCTURAL TRANSFORMATIONS IN ALLOYS BASED ON IRON AND COPPER DURING LOADING SHOCK WAVES	216
<i>I.V. Khomsкая, V.I. Zel'dovich</i>	
МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ИМПУЛЬСНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ	216
<i>Г.Г. Савенков, В.А. Морозов, И.А. Оськин, В.А. Брагин</i>	
ALUMINIUM ALLOY SURFACE MODIFYING BY PULSE ELECTRONIC BUNCHES	217
<i>G.G. Savenkov, V.A. Morozov, I.A. Oskin, V.A. Bragin</i>	
ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ.	218
<i>С.А. Бордзиловский, С.М. Караханов, К.В. Хищенко</i>	
TEMPERATURE MEASUREMENTS AND EQUATION OF STATE OF EPOXY RESIN AT SHOCK COMPRESSION	218
<i>S.A. Bordzilovsky, S.M. Karakhanov, K.V. Khischenko</i>	
МОДЕЛЬ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОВ С ЭФФЕКТИВНЫМ УЧЕТОМ ИОНИЗАЦИИ. УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ CD, PB	218
<i>А.А. Каякин, Д.Г. Гордеев, Л.Ф. Гударенко, В.Г. Куделькин</i>	
EOS MODEL FOR METALS WITH IMPLICIT ACCOUNTING FOR IONIZATION. EQUATIONS OF STATE FOR CD, PB	218
<i>A.A. Kayakin, D.G. Gordeev, L.F. Gudarenko, V.G. Kudelkin</i>	
МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СМЕСИ С РАЗЛИЧНЫМИ СВОЙСТВАМИ КОМПОНЕНТОВ.	219
<i>К.К. Маевский, С.А. Кинеловский</i>	
MODEL OF DYNAMIC EFFECTS ON THE MIXTURE COMPONENTS WITH DIFFERENT PROPERTIES	219
<i>K.K. Maevskij, S.A. Kinelovskij</i>	
СКОРОСТЬ ЗВУКА В МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СМЕСИ.	219
<i>В.Ф. Куропатенко</i>	
SOUND VELOCITY IN MULTI-COMPONENT MIXTURE.	220
<i>V.F. Kuropatenko</i>	
ПОСТРОЕНИЕ МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ЗАВИСИМОСТЯМ $D(U)$	220
<i>В.Ф. Куропатенко, С.Ю. Филатов</i>	

МЕЖДУНАРОДНАЯ БАЗА ДАННЫХ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ	220
<i>I.V. Lomonosov, K.V. Khishchenko, P.R. Levashov, D.V. Minakov, A.S. Zakharenkov, J.B. Aidun</i>	
INTERNATIONAL SHOCK-WAVE DATABASE	221
<i>I.V. Lomonosov, K.V. Khishchenko, P.R. Levashov, D.V. Minakov, A.S. Zakharenkov, J.B. Aidun</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТЕРМОСТАТОВ БЕРЕНДСЕНА И НОЗЕ-ХУВЕРА В ЗАДАЧАХ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ	221
<i>V.S. Rykovanov, G.V. Ionov</i>	
INVESTIGATION INTO BERENDSEN AND NOSE-HOOVER THERMOSTAT PROPERTIES IN MOLECULAR DYNAMICS SIMULATIONS	222
<i>V.S. Rykovanov, G.V. Ionov</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ МОЛЕКУЛ ОКСИДОВ ПЛУТОНИЯ ПРИ ПОМОЩИ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ТЕОРИИ ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ	222
<i>S.S. Mal'kov, A.V. Zaitsevskiy, A.V. Titov, Yu.M. Kiselev</i>	
RELATIVISTIC DENSITY FUNCTIONAL MODELING OF PLUTONIUM OXIDE MOLECULES.	223
<i>S.S. Mal'kov, A.V. Zaitsevskiy, A.V. Titov, Yu.M. Kiselev</i>	
ОПТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗРЫВНОГО ВСКИПАНИЯ ПЕРЕГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ	223
<i>A.L. Gurashkin, A.D. Yampol'skiy, A.A. Starostin, P.V. Skripov</i>	
OPTICAL INVESTIGATION OF SUPERHEATED LIQUID EXPLOSIVE BOILING.	224
<i>A.L. Gurashkin, A.D. Yampol'skiy, A.A. Starostin, P.V. Skripov</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПЕРЕОХЛАЖДЕННОЙ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ.	224
<i>V.G. Baidakov, A.O. Tureev</i>	
DETERMINATION OF CRYSTALLIZATION PARAMETERS OF A SUPERCOOLED LIQUID BY MOLECULAR DYNAMICS	225
<i>V.G. Baidakov, A.O. Tureev</i>	
УСТОЙЧИВОСТЬ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ГИДРИДА ТИТАНА (TiH ₂) ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ УДАРНОГО СЖАТИЯ.	225
<i>A.A. Golyshchev, D.V. Shakhrai, A.M. Molodets, V.E. Fortov</i>	
STABILITY OF CRYSTAL STRUCTURE OF TITANIUM HYDRIDE (TiH ₂) AT HIGH PRESSURES OF SHOCK COMPRESSION	226
<i>A.A. Golyshchev, D.V. Shakhrai, A.M. Molodets, V.E. Fortov</i>	
ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СЖАТИЯ НА ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД В НИТРИДЕ КРЕМНИЯ	226
<i>V.A. Kudakina, V.V. Yakushev, A.N. Zhukov, A.I. Rogacheva</i>	
THE INFLUENCE OF HIGH TEMPERATURE SHOCK COMPRESSION ON SILICON NITRIDE PHASE TRANSFORMATION.	226
<i>V.A. Kudakina, V.V. Yakushev, A.N. Zhukov, A.I. Rogacheva</i>	
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОРИСТОСТИ ГРАФИТА НА КОНЕЧНЫЙ ВЫХОД АЛМАЗА ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ.	227
<i>R.K. Belkheeva</i>	
NUMERICAL INVESTIGATION OF POROSITY GRAPHITE ON DIAMOND YIELD BY SHOCK COMPRESSION	227
<i>R.K. Belkheeva</i>	
ПРИМЕНЕНИЕ КОНТИНУАЛЬНОЙ ДИСЛОКАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПЛАСТИЧНОСТИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ТОНКИХ АЛЮМИНИЕВЫХ МИШЕНЯХ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ	228
<i>V.S. Krasnikov, A.E. Mayer, A.P. Yalovets</i>	
APPLICATION OF DISLOCATION BASED CONTINUAL MODEL TO CALCULATIONS OF LASER DRIVEN SHOCK IN ULTRA THIN ALUMINUM TARGET.	228
<i>V.S. Krasnikov, A.E. Mayer, A.P. Yalovets</i>	
ПОЛИМЕРЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОЙ НАГРУЗКИ	228
<i>M.A. Zocher</i>	
POLYMERS SUBJECTED TO IMPULSE LOADING	228
<i>M.A. Zocher</i>	

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПОВЕДЕНИЯ ГРУНТОВЫХ СРЕД ПРИ УДАРЕ И ПРОНИКАНИИ	229
<i>В.В. Баландин, А.М. Брагов, В.Л. Котов, В.В. Баландин</i>	
EXPERIMENTALLY AND THEORETICALLY INVESTIGATING THE BEHAVIOR OF SOILS UNDER IMPACT AND PENETRATION	229
<i>V.V. Balandin, A.M. Bragov, V.L. Kotov, V.V. Balandin</i>	
РАСЧЕТНАЯ ИЕРАРХИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ	230
<i>А.Я. Учаев, В.Т. Пунин, С.С. Соколов, Н.И. Сельченкова, Е.В. Кошелева, Л.В. Жабыка</i>	
CALCULATION HIERARCHY MODEL OF DYNAMIC METALS FAILURE PROCESS	230
<i>A.Ya. Uchaev, S.S. Sokolov, N.I. Sel'chenkova, E.V. Kosheleva, L.V. Zhabyka</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОБИВАНИИ ОБРАЗЦОВ ИЗ АЛЮМИНИЯ 6061	231
<i>В.В. Чудинов, М.А. Соковиков, О.А. Плехов, С.В. Уваров, Е.А. Ляпунова, Ю.В. Баяндин, О.Б. Наймарк</i>	
INVESTIGATION OF PLASTIC STRAIN INSTABILITY AND LOCALIZATION IN AL-6061 ALLOY SAMPLES SUBJECTED TO PERFORATION	231
<i>V.V. Chudinov, M.A. Sokovikov, O.A. Plekhov, S.V. Uvarov, E.A. Lyapunova, Yu.V. Bayandin, O.B. Naimark</i>	
ОТКОЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 12Х18Н10Е В ТЕМПЕРАТУРНОМ ИНТЕРВАЛЕ 24–450°С	232
<i>А.В. Павленко, А.Н. Григорьев, Е.И. Карнаухов, Д.Н. Казаков, В.Б. Бычков</i>	
SPALL STRENGTH OF AUSTENITE STEEL 12KH18N10E IN TEMPERATURE RANGE 24–450°С	232
<i>A.V. Pavlenko, A.N. Grigoriev, E.I. Karnaykhov, D.N. Kazakov, V.B. Bychkov</i>	
ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ОТКОЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МАГНИЕВОГО СПЛАВА МА14Т1	232
<i>А.В. Павленко, С.Н. Малюгина, Д.Н. Казаков, В.В. Бычков</i>	
TEMPERATURE DEPENDENCE OF MA14T1 MAGNESIUM ALLOY SPALL STRENGTH	232
<i>A.V. Pavlenko, S.N. Malyugina, D.N. Kazakov, V.V. Bychkov</i>	
СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРАМИ HET-PDV И VISAR ПРОФИЛЕЙ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ЛЕГКОГАЗОВОЙ ПУШКЕ	233
<i>А.В. Павленко, А.А. Тяктев, С.Н. Малюгина, С.С. Мокрушин, И.Л. Бугаенко, А.В. Дулов, С.И. Балабин, О.Е. Козелков</i>	
ПОСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТА ПО РЕГИСТРАЦИИ МНОЖЕСТВЕННЫХ ОТКОЛЬНЫХ РАЗРУШЕНИЙ В ПЛАСТИНЕ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т С РЕГИСТРАЦИЕЙ ПРОФИЛЕЙ ПРОДОЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРЕГРАДЕ ИЗ МРАМОРА ПО МНОГОКАНАЛЬНОЙ МЕТОДИКЕ МАНГАНИНОВЫХ ДАТЧИКОВ	233
<i>А.О. Борщевский, Е.А. Козлов, А.В. Петровцев, Д.Т. Юсупов</i>	
SETUP AND RESULTS OF EXPERIMENT AIMED TO REGISTER MULTIPLE SPALL FRACTURES IN THE AUSTENITIC 12CR18N10T STEEL PLATE WITH REGISTRATION OF LONGITUDINAL STRESS PROFILES IN THE MARBLE BARRIER USING MULTICHANNEL MANGANITE-GAUGES TECHNIQUE	234
<i>А.О. Borschevsky, E.A. Kozlov, A.V. Petrovtsev, D.T. Yusupov</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВСЕСТОРОННЕГО СЖАТИЯ РАЗРУШЕННОЙ СРЕДЫ	234
<i>С.Н. Косоруков, А.А. Шахов</i>	
EXPERIMENTAL STUDY OF ALL-ROUND COMPRESSION OF DESTRUCTED MEDIUM	234
<i>S.N. Kosorukov, A.A. Shakhov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОМ ПОЗИТРОННОЙ АННИГИЛЯЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД С САМОИЗЛУЧЕНИЕМ	235
<i>В.И. Графутин, Е.П. Прокопьев</i>	
RESEARCH BY METHOD POSITRON ANNIHILATION SPECTROSCOPY OF CONDENSED MATTER WITH ITS OWN RADIATION.	235
<i>V.I. Grafutin, E.P. Prokorev</i>	
ВЗРЫВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ В ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ПОСТАНОВКЕ В ИНТЕРЕСАХ ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ СДВИГОВОЙ И ОТКОЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ. ПАМЯТИ В.А. БЫЧЕНКОВА	236
<i>Е.А. Козлов, А.Т. Сапожников, Н.С. Жилева, Л.В. Хардина, Л.П. Брезгина, А.А. Дегтярев, О.А. Никитин, Е.О. Ковалев, П.С. Базаров</i>	
EXPLOSIVE EXPERIMENTS IN AXISYMMETRIC SETUP TO VERIFY MODELS OF SHEAR AND SPALL STRENGTH OF METALS AND ALLOYS – IN MEMORY OF V.A. BYCHENKOV	236
<i>Е.А. Kozlov, A.T. Sapozhnikov, N.S. Zhilyayeva, L.V. Khardina, L.P. Brezgina, A.A. Degtyarov, O.A. Nikitin, E.O. Kovalyov, P.S. Bazarov</i>	

ОПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ И ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ОКСИДОВ МЕДИ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ ИНТЕНСИВНЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ	237
<i>Б.А. Гижевский, Л.В. Номерованная, А.А. Махнев, Е.И. Мостовщикова, В.Р. Галахов, А. И. Потеряев, С.И. Наумов</i>	
OPTICAL SPECTRA AND ELECTRONIC STRUCTURE OF NANOSTRUCTURED COPPER OXIDES PREPARED BY METHODS OF SEVERE PLASTIC DEFORMATIONS	237
<i>В.А. Gizhevskii, L.V. Nomerovannaya, A.A. Makhnev, E.V. Mostoshchikova, V.R. Galakhov, A.I. Poterayev, S.V. Naumov</i>	
ЗАРЯДОВЫЕ СОСТОЯНИЯ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА В НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ $Y_3Fe_5O_{12}$ И $FeVO_3$	238
<i>В.В. Месилов, В.Р. Галахова, Б.А. Гижевский, Н.А. Овечкина, Н.И. Лобачевская</i>	
VALENCE STATES OF IRON IONS IN NANOSTRUCTURED $Y_3Fe_5O_{12}$ AND $FeVO_3$	238
<i>V.V. Mesilov, V.R. Galakhov, B.A. Gizhevsky, N.A. Ovechkina, N.I. Lobachevskaya</i>	
ВЛИЯНИЕ МАСШТАБА ЗАГОТОВКИ НА ПАРАМЕТРЫ СТРУКТУРЫ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМЦ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ КАНАЛЬНО-УГЛОВОМ ПРЕССОВАНИИ.	239
<i>А.Н. Петрова, И.Г. Ширинкина, В.В. Астафьев, Т.И. Яблонских, И.Г. Бродова, П.А. Насонов, Е.В. Шорохов, И.В. Минаев</i>	
THE EFFECT OF THE BILLET SIZE ON STRUCTURAL PARAMETERS OF ALUMINUM ALLOY A3003 UPON DYNAMIC CHANNEL ANGULAR PRESSING	239
<i>A.N. Petrova, I.G. Shirinkina, V.V. Astafiev, T.I. Yablonskikh, I.G. Brodova, P.A. Nasonov, E.V. Shorokhov, I.V. Minaev</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ МЕДИ И БРОНЗЫ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО КАНАЛЬНО-УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ	240
<i>И.В. Хомская, В.И. Зельдович, Е.В. Шорохов Н.Ю. Фролова, А.Э. Хейфец, П.А. Насонов</i>	
STUDY OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF NANOSTRUCTURED COPPER AND BRONZE, OBTAINED BY DYNAMIC CHANNEL-ANGULAR PRESSING.	240
<i>I.V. Khomskaaya, V.I. Zeldovich, E.V. Shorokhov, N.Yu. Frolova, A.E. Kheifets, P.A. Nasonov</i>	
СЕКЦИЯ 5. НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И РАДИАЦИОННОЙ МЕДИЦИНЫ	
SECTION 5. SCIENTIFIC BASED OF NUCLEAR POWER ENGINEERING AND NUCLEAR MEDICINE	
АНАЛИЗ ПРОЕКТОВ ГИБРИДНЫХ РЕАКТОРОВ НА БАЗЕ МАГНИТНОГО УТС ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ОЯТ	243
<i>Э.А. Азизов, Г.Г. Гладуш</i>	
ANALYSIS OF PROJECTS OF HYBRID REACTOR BASED ON CONTROLLED MAGNETIC FUSION FOR WASTE MANAGEMENT	243
<i>E.A. Azizov, G.G. Gladush</i>	
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ЖИДКОСОЛЕВОГО РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ	244
<i>Г.П. Швейкин, В.А. Симоненко, С.П. Распопин, Н.Н. Алексеенко, Н.М. Барышева, А.Р. Бекетов, Б.Д. Васин, Ю.С. Долгирев, Ю.П. Зайков, П.Г. Зыков, Е.В. Поляков</i>	
THE STATE OF THE ART AND PROBLEMS IN THE DEVELOPEMNT OF THE MOLTEN-SALT FAST REACTOR	244
<i>G.P. Shveykin, V.A. Simonenko, S.P. Raspopin, N.N. Alexeyenko, N.M. Barysheva, A.R. Beketov, B.D. Vasin, Y.S. Loggirev, Y.P. Saykov, P.G. Zykov, E.V. Polyakov</i>	
ВЫДЕЛЕНИЕ ТОРИЙСОДЕРЖАЩИХ ПРОДУКТОВ ИЗ СМЕСИ ОКСИДОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ	245
<i>В.Г. Бамбуров, Ю.П. Зайков, В.А. Хохлов</i>	
EXTRACTION OF THORIUM AND ITS RARE-EARTH ALLOYS FROM THEIR OXIDES BY HALOGENIDE MELT ELECTROLYSIS	245
<i>V.G. Bamburov, Y.P. Zaykov, V.A. Khohlov</i>	
ВОДОРОДНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ АЭС С ВВЭР	246
<i>В.А. Симоненко</i>	
HYDROGEN SAFETY OF NPP WITH WWER	246
<i>V.A. Simonenko</i>	
О МЕХАНИЗМЕ ДЕФЛАГРАЦИИ И ДЕТОНАЦИИ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ ПАРО-ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ	247
<i>О.В. Шульц, В.А. Симоненко</i>	
ABOUT DEFLAGRATION AND DETONATION MECHANISM OF HYDROGEN-AIR-VAPOR MIXTURES	247
<i>O.V. Shultz, V.A. Simonenko</i>	

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСШИРЕННОГО РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ С ПОМОЩЬЮ КОМПЛЕКСА АТЭК	248
<i>И.Р. Макеева, И.А. Доровских</i>	
STUDY OF EXPANDED DEVELOPMENT OF NUCLEAR POWER ENGINEERING USING ATEK CODE	248
<i>I.R. Makeeva, I.A. Dorovskikh</i>	
РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАСЧЕТА КАМПАНИИ РЕАКТОРА	249
<i>Д.Г. Модестов</i>	
DEVELOPMENT OF A CODE PACKAGE FOR REACTOR CAMPAIGN CALCULATIONS	249
<i>D.G. Modestov</i>	
РАЗРАБОТКА БЕТА-ЭМИССИОННЫХ ДАТЧИКОВ ПАРСОДЕРЖАНИЯ, ПЛОТНОСТИ, УРОВНЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ДЛЯ ЯЭУ	249
<i>С.И. Александров, А.А. Большов, А.В. Корниенко, И.В. Новиков, В.В. Постников, Г.В. Юркин, В.А. Ямпольский</i>	
DEVELOPMENT OF BETA-EMISSION DETECTORS FOR MEASURING COOLANT VOID FRACTION, DENSITY AND LEVEL IN NUCLEAR POWER FACILITY.	249
<i>S.I. Alexandrov, A.A. Bolshov, A.V. Kornienko, I.V. Novikov, V.V. Postnikov, G.V. Yurkin, V.A. Yampolsky</i>	
НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ВЫГОРАНИЯ ОТВС РЕАКТОРОВ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ.	250
<i>О.В. Анфалова, В.Г. Казеев, В.С. Краев, С.И. Стрельцов, Д.В. Хмельницкий, А.В. Терехин, Ю.И. Чернухин</i>	
NEUTRON-ACTIVATION METHOD TO CONTROL BURNUP OF THERMAL REACTOR FUEL ASSEMBLIES	250
<i>O.V. Anfalova, V.G. Kazeev, V.S. Kraev, S.I. Streltsov, D.V. Khmelnitsky, A.V. Terekhin, Yu.I. Chernukhin</i>	
ВЫГОДНАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ОКСИДОВ ОБЕДНЕННОГО УРАНА	251
<i>Т.В. Казаковская, В.И. Шаповалов, С.Г. Ермичев, В.З. Матвеев, Э.Ю. Горячев, А.М. Горелов</i>	
BENEFICIAL UTILIZATION OF DEPLETED URANIUM OXIDES	252
<i>T.V. Kazakovskaya, V.I. Sharovalov, S.G. Ermichev, V.Z. Matveev, E.Yu. Goryachev, A.M. Gorelov</i>	
О ЯДЕРНОМ ТОПЛИВНОМ ЦИКЛЕ РЕАКТОРОВ ТИПА БРЕСТ	254
<i>И.А. Волков, В.А. Симоненко</i>	
ON THE NUCLEAR FUEL CYCLE OF BREST REACTORS	254
<i>I.A. Volkov, V.A. Simonenko</i>	
ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЗАМЫКАНИЯ ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА РЕАКТОРОВ ТИПА БН.	254
<i>Н.Д. Дырда, Д.Г. Модестов</i>	
APPROACHES TO MODELING OF CLOSING THE FUEL CYCLE OF THE BN REACTORS.	255
<i>N.D. Dyrda, D.G. Modestov</i>	
ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА В ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЯХ КОМПЛЕКСА АТЭК	255
<i>О.В. Вербицкая, Л.Н. Дарина, И.А. Доровских, В.Г. Дубосарский, И.Р. Макеева, С.В. Пчелинцева, И.Ю. Силантьева, В.А. Симоненко, В.П. Соколов</i>	
REPRESENTATION OF A NUCLEAR POWER COMPLEX OBJECTS IN INFORMATION MODELS OF SOFTWARE CODE ATEK	255
<i>O.V. Verbitskaya, L.N. Darina, I.A. Dorovskikh, V.G. Dubosarskiy, I.R. Makeeva, S.V. Pchelintseva, I.J. Silantjeva, V.A. Simonenko, V.P. Sokolov</i>	
ЭКОНОМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ АТЭК	256
<i>С.В. Пчелинцева, О.В. Вербицкая, Л.Н. Дарина, И.А. Доровских, И.Р. Макеева, И.Ю. Силантьева, В.П. Соколов</i>	
ECONOMIC MODELING IN SOFTWARE CODE ATEK	256
<i>S.V. Pchelintseva, O.V. Verbitskaya, L.N. Darina, I.A. Dorovskikh, I.R. Makeeva, I.J. Silantjeva, V.P. Sokolov</i>	
ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ЗАВЕРШАЮЩЕЙ СТАДИИ ЯДЕРНО-ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА	257
<i>В.П. Соколов, О.В. Вербицкая, Л.Н. Дарина, И.А. Доровских, В.Г. Дубосарский, И.Р. Макеева, С.В. Пчелинцева, И.Ю. Силантьева, В.А. Симоненко</i>	
DYNAMIC SIMULATION OF TECHNOLOGIES ATNUCLEAR FUEL CYCLE TERMINAL STAGE.	257
<i>V.P. Sokolov, O.V. Verbitskaya, L.N. Darina, I.A. Dorovskikh, V.G. Dubosarskiy, I.R. Makeyeva, S.V. Pchelintseva, I.Yu. Silantiyeva, V.A. Simonenko</i>	
АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ В КОМПЛЕКСЕ АТЭК ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЗАДАЧ ТОПЛИВНЫХ ЦИКЛОВ	258
<i>Н.Ю. Романова, И.Р. Макеева</i>	

UNCERTAINTY ANALYSIS IN COMPLEX ATEK AT RESEARCH OF PROBLEMS OF FUEL CYCLES	258
<i>N.Yu. Romanova, I.R. Makeeva</i>	
ИНФОРМАЦИОННАЯ СРЕДА ПОДДЕРЖКИ РАБОТ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ АЭПК И ТЕХНОЛОГИЙ ЯТЦ	258
<i>Л.Н. Дарина, Н.Г. Жерноклева, Е.В. Козырева, Л.М. Пономарева, С.Н. Романовская</i>	
INFORMATION ENVIRONMENT FOR SUPPORT OF WORKS ON MODELING NEIC AND NFC TECHNOLOGIES	259
<i>L.N. Darina, N.G. Zhernokleva, E.V. Kozyreva, L.M. Ponomareva, S.N. Romanovskaya</i>	
ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ НА ПРИМЕРЕ ОБРАЩЕНИЯ С НЕКОНДИЦИОННЫМ ОЯТ РБМК-1000	259
<i>В.Г. Дубосарский, О.В. Вербицкая, С.В. Пчелинцева, В.П. Соколов</i>	
DYNAMIC SIMULATION SOFTWARE TOOLS FOR MODELING TRANSPORTATION-TECHNOLOGICAL SCHEMES ON THE EXAMPLE OF UNCONDITIONED RBMK-1000 SPENT FUEL TREATMENT TASK	260
<i>V.G. Dubosarskiy, O.V. Verbitskaya, S.V. Pchelinceva, V.P. Sokolov</i>	
ИЗУЧЕНИЕ УСКОРЕННЫХ РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В PuO ₂ И СТАБИЛИЗИРОВАННОМ КУБИЧЕСКОМ ДИОКСИДЕ ЦИРКОНИЯ (Zr, Gd, Pu)O ₂ , ДОПИРОВАННЫХ Pu-238.	260
<i>Б.Е. Бураков, М.А. Яговкина</i>	
A STUDY OF ACCELERATED RADIATION DAMAGE IN PuO ₂ AND STABILIZED CUBIC ZIRCONIA (Zr, Gd, Pu)O ₂ , DOPED WITH ²³⁸ Pu	261
<i>В.Е. Burakov, M.A. Yagovkina</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ УРАНСОДЕРЖАЩИХ ЯДЕРНЫХ ТОПЛИВ МЕТОДАМИ АТОМИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	262
<i>Д.Е. Смирнова</i>	
INVESTIGATION OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF URANIFEROUS NUCLEAR FUELS VIA ATOMISTIC SIMULATION TECHNIQUES	262
<i>D.E. Smirnova</i>	
РАЗВИТИЕ АСПЕКТОВ МИКРОПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАТЕРИАЛОВ ОБОЛОЧЕК ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ	262
<i>Е.И. Курбатова, А.И. Ксенофонтов, В.М. Демин, В.С. Трошин, И.Н. Фридляндер, Л.С. Гузей</i>	
THE DEVELOPMENT OF MICROPLASMA TECHNOLOGY ASPECTS FOR OPERATION SAFETY INCREASE OF MATERIALS OF FUEL ELEMENTS SHELLS	263
<i>E.I. Kurbatova, A.I. Ksenofontov, V.M. Dyomin, V.S. Trochin, I.N. Friedlyander, L.S. Guzey</i>	
ДЕФЕКТОСКОПИЯ МЕТАЛЛОБЕТОННОГО ХРАНИЛИЩА ДЛЯ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА	263
<i>И.Г. Вавилова, Я.А. Касман, М.Р. Колхидашвили, В.В. Марченков, А.М. Пирогов, В.А. Соловей, И.В. Шока, Н.Д. ЩигOLEV</i>	
FLAW DETECTION OF METAL AND CONCRETE CASK FOR SPENT NUCLEAR FUEL.	263
<i>I.G. Vavilova, N.Ya. Kasman, M.R. Kolhidashvili, V.V. Marchenkov, A.M. Pirogov, V.A. Solovei, I.V. Shoka, N.D. Shchigolev</i>	
К ПРИНЦИПАМ ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙСМОЗАЩИТЫ КРУПНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ	264
<i>Ф.Х. Каримов</i>	
TO THE PRINCIPLES OF ENGINEERING SEISMIC PROTECTION OF LARGE POWER PLANTS	264
<i>Ф.Н. Каримов</i>	
АДАПТИВНЫЙ НЕЙРОСЕТЕВОЙ РЕГУЛЯТОР	265
<i>М.А. Трапезников, Н.Н. Алексеенко, П.Г. Зыков, П.В. Волобуев</i>	
AN ADAPTIVE NEURAL NETWORK CONTROLLER	265
<i>М.А. Трапезников, N.N. Alexeyenko, P.G. Zykov, P.V. Volobuyev</i>	
РАДИОХИМИЧЕСКОЕ И РЕНТГЕНСПЕКТРАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИНЕРАЛА БРИТОЛИТА КАК ПРИРОДНОГО АНАЛОГА СИНТЕТИЧЕСКИХ МАТРИЦ ДЛЯ ИММОБИЛИЗАЦИИ АКТИНИДОВ	265
<i>А.А. Петрунин, М.И. Скриплев, Э.В. Фомин, А.В. Тутов, Р.В. Богданов</i>	
RADIOCHEMICAL AND X-RAY STUDY OF THE MINERAL AS A NATURAL ANALOGUE OF BRITHOLITE SYNTHETIC MATRICES FOR IMMOBILIZATION OF ACTINIDES	265
<i>A.A. Petrunin, M.I. Skriplev, E.V. Fomin, A.V. Titov, R.V. Bogdanov</i>	

АЛЮМОСИЛИКОФОСФАТНАЯ МОДЕЛЬ ПОЛИФАЗНЫХ МАТРИЦ ДЛЯ ИММОБИЛИЗАЦИИ SR-CS-ФРАКЦИИ ВЫСОКОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА	266
<i>P.V. Bogdanov, R.A. Kuznetsov, E.E. Prudnikov, A.V. Titov</i>	
ALUMINOSILICATE-PHOSPHATE MODEL OF POLYPHASE MATRICES FOR IMMOBILIZATION OF SR-CS-FRACTIONS OF NUCLEAR FUEL CYCLE HLRW	266
<i>R.V. Bogdanov, R.A. Kuznetsov, E.E. Prudnikov, A.V. Titov</i>	
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОРБЕНТОВ КЛАССА ДВОЙНЫХ СИЛИКАТОВ	266
<i>Г.Г. Михайлов, Н.М. Барышева, Т.М. Лонзингер, А.Г. Морозова, Е.В. Поляков</i>	
DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF NEW INORGANIC BISILICATE SORBENTS	267
<i>G.G. Mikhaylov, N.M. Barysheva, T.M. Lozinger, A.G. Morozova, E.V. Polyakov</i>	
РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СУБЛИМАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ МОЛИБДЕНА-99.	267
<i>Ю.А. Занора, И.А. Истомин, С.В. Степанов, Г.В. Савватимов</i>	
DEVELOPMENT OF EQUIPMENT FOR MO-99 PURIFICATION BY SUBLIMATION	268
<i>Yu.A. Zanora, I.A. Istomin, S.V. Stepanov, G.V. Savvatimov</i>	
ХИМИЧЕСКИЕ СДВИГИ ЖЕСТКИХ РЕНТГЕНОВСКИХ ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЙ: НОВЫЙ НЕЭМПИРИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА	268
<i>А.В. Титов, Ю.В. Ломачук, А.В. Зайцевский, Р.В. Богданов</i>	
CHEMICAL SHIFTS OF HARD X-RAY EMISSION LINES: A NEW AB INITIO COMPUTATIONAL METHOD	268
<i>A.V. Titov, Yu.V. Lomachuk, A.V. Zaitsevskii, R.V. Bogdanov</i>	
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫХОДА КСЕНОНА ПОД ОБОЛОЧКУ ТВЭЛА РЕАКТОРА ВВЭР С УЧЕТОМ ОБРАЗОВАНИЯ ПУЗЫРЬКОВ.	269
<i>В.М. Алюшин</i>	
УЧЕТ И ВЕРИФИКАЦИЯ ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ПРОГРАММЕ ITHMC	269
<i>В.И. Костюченко, О.Б. Рязанцев, С.И. Самарин, А.С. Углов</i>	
NUCLEAR INTERACTIONS IN THE ITHMC CODE: IMPLEMENTATION AND VERIFICATION	270
<i>V.I. Kostyuchenko, O.B. Ryazantsev, S.I. Samarin, A.S. Uglov</i>	
САМООРГАНИЗАЦИЯ МОЛЕКУЛ В СМЕСЯХ ВОДА–ЛЕЦИТИН ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАДИАЦИИ.	270
<i>В.В. Зайцев, Н.Б. Зайцева, О.Г. Польский, Д.Ю. Шакин</i>	
SELF-ORGANIZING OF MOLECULES IN MIXES WATER–LECITHIN UNDER ACTION OF RADIATION	271
<i>V.V. Zaytsev, N.B. Zaytseva, O.G. Polsky, D.Yu. Shakin</i>	
ВНЕДРЕНИЕ СТЕРЕОТАКСИЧЕСКОЙ РАДИОХИРУРГИИ НА РОБОТИЗИРОВАННОМ ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ «СИБЕР КНИФЕ» В ЛЕЧЕНИЕ МЕЛАНОМЫ ХОРИОИДЕИ В ЧЕЛЯБИНСКОМ ОБЛАСТНОМ КЛИНИЧЕСКОМ ОНКОЛОГИЧЕСКОМ ДИСПАНСЕРЕ.	271
<i>И.Е. Панова, А.В. Важенин, Е.И. Гютнер, Л.Е. Семенова, Е.Ю. Лукина, Ю.В. Галямова, Е.В. Новиков, И.А. Важенин</i>	
INTRODUCTION OF STEREOTAKSICHESKY RADIOSURGERY ON THE ROBOTIZED LINEAR ACCELERATOR «CYBERKNIFE» IN TREATMENT OF UVEAL MELANOMA IN CHELYABINSK THE REGIONAL ONCOLOGICAL CLINIC.	272
<i>I.E. Panova, A.V. Vagenin, Y.I. Gytner, L.E. Semenova, Y.Y. Lukina, Y.V. Galyamova, E.V. Novikov, I.A. Vagenin</i>	
РАДИАЦИОННАЯ МЕДИЦИНА В ЧЕЛЯБИНСКОМ ОБЛАСТНОМ КЛИНИЧЕСКОМ ОНКОЛОГИЧЕСКОМ ДИСПАНСЕРЕ.	272
<i>А.В. Важенин, Е.В. Новиков</i>	
RADIATION MEDICINE IN CHELYABINSK REGIONAL ONCOLOGY CLINIC.	273
<i>A.V. Vagenin, E.V. Novikov</i>	
РАДИОНУКЛИДНАЯ ТЕРАПИЯ – ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЫ НА ЮЖНОМ УРАЛЕ	274
<i>Е.Б. Васильева, Е.А. Сырчикова</i>	
RADIONUKLIDNAYA THERAPY – AS PERSPECTIVE DIRECTION OF NUCLEUS MEDICINE ON SOUTH URAL	274
<i>E.B. Vasilieva, E.A. Syrchikova</i>	

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ЧЕЛЯБИНСКОГО ЦЕНТРА ПОЗИТРОННОЙ ЭМИССИОННОЙ ТОМОГРАФИИ.	274
<i>A.V. Vazhenin, N.G. Afanasjeva, D.A. Vazhenina, A.S. Zotova, N.V. Supronchuk, N.V. Vaganov, D.B. Kalantaev, D.N. Chashchuhin, D.V. Trofimov, A.A. Varennikova, E.A. Ozerov</i>	
THE FIRST RESULTS OF THE WORK REGIONAL PET-CENTER IN THE RUSSIAN FEDERATION	275
<i>A.V. Vazhenin, N.G. Afanasjeva, D.A. Vazhenina, A.S. Zotova, N.V. Supronchuk, N.V. Vaganov, D.B. Kalantaev, D.N. Chashchuhin, D.V. Trofimov, A.A. Varennikova, E.A. Ozerov</i>	
АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ДОЗОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ДЛЯ НЕЙТРОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ТОНКОГО ЛУЧА	275
<i>A.H. Moiseev, V.A. Klimanov</i>	
DOSE CALCULATION ALGORITHM FOR NEUTRON RADIOTHERAPY BASED ON PENCIL BEAM METHOD	276
<i>A.N. Moiseev, V.A. Klimanov</i>	
ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ РОБОТИЗИРОВАННОЙ РАДИОХИРУРГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «СИБЕРНОЖ» («КИБЕРНОЖ») В УСЛОВИЯХ ЧЕЛЯБИНСКОГО ОКРУЖНОГО КЛИНИЧЕСКОГО ОНКОЛОГИЧЕСКОГО ДИСПАНСЕРА.	276
<i>A.V. Vazhenin, Ю.В. Галямова, Е.Ю. Лукина, Е.Я. Мозерова, Е.В. Новиков, Н.В. Калыганова, I.A. Vazhenin, O.N. Chernova, E.A. Ozerov</i>	
ROBOTIZED RADIOSURGERY SYSTEM «CYBERKNIFE» («CYBERKNIFE») AT THE CHELYABINSK REGIONAL ONCOLOGICAL CENTER. FIRST RESULTS	277
<i>A.V. Vazhenin, Yu.V. Galyamova, E.Yu. Lukina, E.Ya. Mosezerova, E.V. Novikov, N.V. Kalyganova, I.A. Vazhenin, O.N. Chernova, E.A. Ozerov</i>	
РЕЗУЛЬТАТЫ HDR-БРАХИТЕРАПИИ НА АППАРАТЕ «MULTISOURCE» ОПУХОЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ЛОКАЛИЗАЦИЙ	277
<i>T.M. Sharabura, A.V. Vazhenin, A.A. Lozhkov, A.G. Zhumabayeva, A.V. Turbina, E.Ya. Mosezerova</i>	
RESULTS OF HDR-BRACHYTHERAPY WITH «MULTISOURCE» OF DIFFERENT TUMORS	278
<i>T.M. Sharabura, A.V. Vazhenin, A.A. Lozhkov, A.G. Zhumabayeva, A.V. Turbina, E.Ya. Mosezerova</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ НАКОПЛЕНИЯ ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРА РАДАХЛОРИН В БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЯХ	278
<i>A.V. Lappa, A.S. Zarezina, N.N. Kulikovskiy, R.N. Kulikovskiy</i>	
DYNAMIC OF RADACHLORIN PHOTOSENSITIZER ACCUMULATION IN BIOLOGICAL TISSUES	279
<i>A.V. Lappa, A.S. Zarezina, N.N. Kulikovskiy, R.N. Kulikovskiy</i>	
СЕКЦИЯ 6. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ, ПРОГРАММЫ И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ	
SECTION 6. NUMERICAL METHODS, ALGORITHMS, CODE AND ACCURATE SOLUTIONS	
ЭФФЕКТИВНЫЙ ТРЕХМЕРНЫЙ МЕТОД ALE С НЕСКОЛЬКИМИ МАТЕРИАЛАМИ НА НЕРЕГУЛЯРНЫХ СЕТКАХ, ОСНОВАННЫЙ НА MOF-ВОССТАНОВЛЕНИИ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА, ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ СЖИМАЕМЫХ СРЕД.	283
<i>Жиа Зупень, Лью Жун, Жань Шудао</i>	
AN EFFECTIVE THREE-DIMENSIONAL MULTI-MATERIAL ALE METHOD ON UNSTRUCTURED GRIDS BASED ON MOF INTERFACE RECONSTRUCTION FOR COMPRESSIBLE FLUID DYNAMICS	283
<i>Jia Zupeng, Liu Jun, Zhang Shudao</i>	
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШИТЕЛЬНЫХ ПРИРОДНЫХ ВОСХОДЯЩИХ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ	283
<i>С.П. Баутин, Е.Д. Белова, И.Ю. Крутова, А.Г. Обухов</i>	
MATHEMATICAL SIMULATION OF DEVASTATING NATURAL RISING SWIRLING FLOWS	284
<i>S.P. Bautin, E.D. Belova, I.Yu. Krutova, A.G. Obuhov</i>	
О ЧИСЛЕННОМ АНАЛИЗЕ ДИНАМИКИ НЕЛИНЕЙНОЙ УПРАВЛЯЕМОЙ СИСТЕМЫ.	284
<i>И.Н. Кандоба, В.Б. Костюсов, Е.К. Костюсова, И.В. Козьмин, А.Б. Ложников, В.И. Починский</i>	
ON THE NUMERICAL ANALYSIS OF NONLINEAR CONTROL SYSTEM DYNAMICS	285
<i>I.N. Kandoba, V.B. Kostousov, E.K. Kostousova, I.V. Kozmin, A.B. Lozhnikov, V.I. Pochinskii</i>	
ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ОБОБЩЕННЫХ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ТИПА ГАМИЛЬТОНА-ЯКОБИ	285
<i>A.A. Успенский, П.Д. Лебедев</i>	

ANALYTICAL AND NUMERICAL METHODS FOR GENERALIZED SOLUTIONS OF HAMILTON-JACOBI PDE CONSTRUCTUION	286
<i>A.A. Uspenskiy, P.D. Lebedev</i>	
КОРРЕКТНОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ВИНЕРА-ХОПФА В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ ВЗРЫВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.	287
<i>Г.В. Орлов</i>	
CORRECT SOLUTION OF THE WIENER-HOPF EQUATION FOR EXPERIMENTAL EXPLOSION DATA PROCESSING.	287
<i>G.V. Orlov</i>	
АНАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭВОЛЮЦИОННЫХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ВОЛН В ЖИДКОСТИ С ПУЗЫРЬКАМИ ГАЗА	287
<i>Н.А. Кудряшов, Д.И. Синельщиков</i>	
ANALYTICAL PROPERTIES AND EXACT SOLUTIONS OF NONLINEAR EVOLUTION EQUATIONS FOR DESCRIPTION OF WAVES IN LIQUID WITH GAS BUBBLES.	288
<i>N.A. Kudryashov, D.I. Sinelschikov</i>	
НОВЫЕ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В МЕХАНИКЕ МНОГОФАЗНЫХ СРЕД	288
<i>В.С. Суров</i>	
NEW HYPERBOLIC MODELS IN A MECHANICS OF MULTIPHASE MEDIUMS	288
<i>V.S. Surov</i>	
КОД ЭГАЗ-КД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ 3D ТЕЧЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕТОЧНЫХ И ДИСКРЕТНЫХ ПОДХОДОВ	289
<i>Ю.В. Янилкин, С.П. Беляев, В.Н. Софронов, В.А. Шмелев, К.С. Мокина, Е.В. Потехина, Л.И. Дегтяренко, А.С. Разумков, Н.Р. Антипина, А.Л. Потехнин, М.В. Черенкова, В.Н. Пискунов, И.А. Давыдов</i>	
EGAK-KD CODE FOR SIMULATION OF 3D FLOWS USING GRID AND DISCRETE APPROACHES	289
<i>Yu.V. Yanilkin, S.P. Belyaev, V.N. Sofronov, V.A. Shmelev, K.S. Mokina, E.V. Potekhina, L.I. Degtyarenko, A.S. Razumkov, N.R. Antipina, A.L. Potekhnin, M.V. Cherenkova, V.N. Piskunov, I.A. Davydov</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СРЕДЫ	290
<i>П.П. Захаров, И.С. Меньшов</i>	
NUMERICAL MODELING OF MULTIMATERIAL MEDIUM FLUIDS	290
<i>P.P. Zakharov, I.S. Men'shov</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ	290
<i>А.А. Кулешов, Е.Е. Мышецкая</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF FOREST FIRE SPREAD	291
<i>A.A. Kuleshov, E.E. Myshetskaya</i>	
ПРОГРАММА ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СПИРАЛЬНЫХ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ.	291
<i>А.С. Пикарь, П.В. Королёв</i>	
CODE FOR NUMERICAL SIMULATION OF HELICAL MAGNETO-CUMULATIVE GENERATORS	292
<i>A.S. Pikar, P.V. Korolev</i>	
СПОСОБЫ РЕАЛИЗАЦИИ ДВУМЕРНОЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ МЕТОДИКИ Д НА ГИБРИДНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ.	292
<i>Е.Е. Чупраков</i>	
METHODS TO IMPLEMENT A 2D HYDRODYNAMIC CODE ON A HYBRID-ARCHITECTURE COMPUTING SYSTEM	293
<i>Е.Е. Чупраков</i>	
РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОГО ПАРАЛЛЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «TIS_P» ДЛЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ГИБРИДНОЙ АРХИТЕКТУРЫ	293
<i>М.И. Климов</i>	
THE DEVELOPMENT OF PARALLEL PACKAGE «TIS_P»	293
<i>M.I. Klimov</i>	
МОДЕЛЬ АНИЗОТРОПНОГО УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ГИДРОКОДА FLAG.	294
<i>А. Хантер, Т.Р. Кэнфилд, Ф.Л. Аддессо</i>	

ANISOTROPIC ELASTIC-PLASTIC MATERIAL MODEL FOR THE FLAG HYDROCODE	295
<i>A. Hunter, T.R. Canfield, F.L. Addessio</i>	
РАСЧЕТ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ В КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ НАГРУЖЕНИЯХ	294
<i>В.В. Погорелко, А.П. Яловец</i>	
CALCULATION OF STRESS FIELDS IN COMPOSITE AT INTENSIVE LOADINGS	294
<i>V.V. Pogorelko, A.P. Yalovets</i>	
ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ С МЕЗОСКОПИЧЕСКИМИ ДЕФЕКТАМИ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ	295
<i>Ю.В. Баяндин, О.Б. Наймарк, Н.В. Савельева</i>	
TREE-DIMENSIONAL SIMULATION OF DEFORMATION AND FAILURE OF SOLIDS WITH MESOSCOPIC DEFECTS UNDER INTENSIVE LOADING	295
<i>Yu.V. Bayandin, O.B. Naimark, N.V. Saveleva</i>	
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПАКЕТА ПРОГРАММ УРС-ОФ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ	296
<i>Д.Г. Гордеев, Е.Ф. Голубкова, Л.Ф. Гударенко, В.Г. Куделькин, О.В. Сапронова</i>	
THE CURRENT STATE OF URS-OF SOFTWARE PACKAGE FOR SIMULATION OF THERMODYNAMIC AND MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS	296
<i>D.G. Gordeev, E.F. Golubkova, L.F. Gudarenko, V.G. Kudelkin, O.V. Saproнова</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТИТАНОВЫХ ОБРАЗЦОВ ПО ЧЕТЫРЕМ СХЕМАМ ДКУП	297
<i>С.А. Зелепугин, А.Н. Шипачев, А.С. Зелепугин, Е.В. Ильина</i>	
SIMULATION OF PLASTIC DEFORMATION OF TITANIUM SAMPLES FOR DIFFERENT DCAP SCHEMES	297
<i>S.A. Zelepugin, A.N. Shipachev, A.S. Zelepugin, E.V. Ilina</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛОС АДИАБАТИЧЕСКОГО СДВИГА В МАТЕРИАЛАХ ПРИ ДЕФОРМАЦИЯХ	298
<i>Н.А. Кудряшов, П.Н. Рябов</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF ADIABATIC SHEAR BAND FORMATION IN MATERIALS AFTER DEFORMATIONS	298
<i>N.A. Kudryashov, P.N. Ryabov</i>	
ЧИСЛЕННОЕ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКОЛЬНЫХ И СДВИГОВЫХ РАЗРУШЕНИЙ В ОБОЛОЧКАХ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т, FE И СТАЛИ 30ХГСА ПРИ ИХ СФЕРИЧЕСКОМ И КВАЗИСФЕРИЧЕСКОМ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ	299
<i>Е.А. Козлов, О.В. Ольхов, Е.В. Шувалова</i>	
NUMERICAL 3D SIMULATION OF SPALL AND SHEAR DAMAGE IN SHELLS OF AUSTENITIC STEEL 12KH18N10T, FE AND STEEL 30KHGSA AT SPHERICAL AND QUASISPHERICAL EXPLOSIVE LOADING	299
<i>Е.А. Kozlov, O.V. Olkhov, E.V. Shuvalova</i>	
ТРЕХМЕРНАЯ ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ.	300
<i>А.Г. Жилкин, Д.В. Бисикало</i>	
THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL MODEL OF FLOW STRUCTURE IN CLOSE BINARIES WITH MAGNETIC FIELD	300
<i>A.G. Zhilkin, D.V. Bisikalo</i>	
РАСЧЕТ ТРЕХМЕРНЫХ ЗАДАЧ СПЕКТРАЛЬНОГО ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ ПО МЕТОДИКЕ МИМОЗА-НДЗД	301
<i>А.В. Бабанов, С.А. Бельков, С.В. Бондаренко, В.В. Ватулин, О.А. Винокуров, И.Н. Гречишкينا, В.В. Змушко, Т.Б. Измайлова, Е.И. Митрофанов, Н.А. Рябикина, Б.Н. Шамраев</i>	
3D SIMULATION OF SPECTRAL RADIATION TRANSFER USING MIMOZA-ND3D CODE	302
<i>A.V. Babanov, S.A. Bel'kov, S.V. Bondarenko, V.V. Vatulin, O.A. Vinokurov, I.N. Grechishkina, V.V. Zmushko, T.B. Izmailova, E.I. Mitrofanov, N.A. Raybikina, B.N. Shamraev</i>	
ДВУХКАСКАДНАЯ КОНСТРУКЦИЯ ТЕРМОЯДЕРНОЙ МИКРОМИШЕНИ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО ТЯЖЕЛОИОННОГО СИНТЕЗА	302
<i>Г.В. Долголева</i>	
ANALYTICAL AND NUMERICAL CONSTRUCTION OF TWO-STAGE CYLINDRICAL TARGETS BASED ON SHOCK-FREE AND SHOCK COMPRESSION	303
<i>G.V. Dolgoleva</i>	

РАСЧЕТ ВОЛНОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ МИШЕНЕЙ ПРИ ОДНОМЕРНОМ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ ДО 150 ГПа.	303
<i>V.V. Kim, A.A. Golyshov, D.V. Shakhrai, A.M. Molodets</i>	
CALCULATION OF WAVE INTERACTIONS AND THERMO-DYNAMIC STATE OF MULTILAYER TARGETS AT ONE-DIMENSIONAL SHOCK LOADING UP TO 150 GPa	304
<i>V.V. Kim, A.A. Golyshov, D.V. Shakhrai, A.M. Molodets</i>	
УЧЕТ ЭНЕРГОБАЛАНСА ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ.	304
<i>O.N. Ulyanov, L.I. Rubina, M.A. Chaschin</i>	
TAKING INTO ACCOUNT ENERGY BALANCE EQUATION FOR NUMERICAL MODELING OF INTERACTION OF RADIATION WITH A SUBSTANCE	305
<i>O.N. Ulyanov, L.I. Rubina, M.A. Chaschin</i>	
ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА В ЗАДАЧАХ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ.	305
<i>S.A. Ulyanov</i>	
APPLICATION OF ANALYTICAL METHODS FOR THE DESIGN OF THREE-DIMENSIONAL OBJECT MODEL IN PROBLEMS OF OPTICAL RADIATION TRANSFER.	306
<i>S.A. Ulyanov</i>	
РАСЧЕТНЫЙ КОМПЛЕКС «TIS_1D». ОПИСАНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ НА ОДНОМЕРНЫХ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ	306
<i>A.V. Mischenko, A.A. Serzhezhkin, I.S. Menshov, A.B. Kiselev</i>	
COMPUTING COMPLEX «TIS-1D». DESCRIPTION AND TESTING ON ONE-DIMENSIONAL ELASTOPLASTIC PROBLEMS	306
<i>A.V. Mischenko, A.A. Serzhezhkin, I.S. Menshov, A.B. Kiselev</i>	
АНАЛИТИЧЕСКИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ТИПА НЕСТАЦИОНАРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ	306
<i>A.L. Kazakov</i>	
МЕТОД ТРЕХУРОВНЕВОГО РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ МЕТОДИКИ ТИМ-2D	307
<i>A.A. Voropinov</i>	
METHOD OF THREE-LEVEL PARALLELIZATION IN THE TIM-2D CODE	307
<i>A.A. Voropinov</i>	
КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДГОТОВКИ И РАСЧЕТА ДАННЫХ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВУМЕРНЫХ ЗАДАЧ. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «БАЗИС»	307
<i>O.V. Belomestnykh, S.V. Gagarin, A.V. Galinova, N.V. Galitskaya, L.M. Zueva, S.I. Kuzmina, O.A. Lisina, D.V. Mogilenskikh, A.A. Syskova, A.A. Ushkova, E.Yu. Yazova</i>	
COMPREHENSIVE APPROACH AND METHODS OF EFFICIENCY ENHANCEMENT OF DATA PREPARATION AND CALCULATION FOR NUMERICAL SIMULATION OF 2D PROBLEMS. PROGRAM COMPLEX «BASIS»	308
<i>O.V. Belomestnykh, S.V. Gagarin, A.V. Galinova, N.V. Galitskaya, L.M. Zueva, S.I. Kuzmina, O.A. Lisina, D.V. Mogilenskikh, A.A. Syskova, A.A. Ushkova, E.Yu. Yazova</i>	
ПОСТРОЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ОБЪЕМНЫХ СЕТОК ВАРИАЦИОННЫМ МЕТОДОМ С АДАПТАЦИЕЙ К КРИВИЗНЕ ПОВЕРХНОСТИ	308
<i>V.A. Garanja, L.N. Kudryavtseva, S.V. Utyuzhnikov</i>	
ПОСТРОЕНИЕ ТЕТРАЭДРАЛЬНЫХ СЕТОК ПРИ НЕТОЧНОМ И ПРОТИВОРЕЧИВОМ ЗАДАНИИ ВХОДНЫХ ДАННЫХ.	309
<i>A.I. Belokrysov-Fedotov, V.A. Garanja, L.N. Kudryavtseva</i>	
ПАКЕТ ПРОГРАММ ЛОГОС. МЕТОДЫ ГРАФИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ЗАДАЧ	309
<i>A.L. Potekhin, V.A. Nikitin, I.V. Loginov, M.G. Kuznetsov, A.I. Lopatkin, V.V. Zhirnov, P.V. Cherenkov, A.V. Lomtev</i>	
LOGOS CODE SYSTEM: METHODS FOR GRAPHICALLY PROCESSING RESULTS OF ENGINEERING PROBLEM SIMULATIONS	309
<i>A.L. Potekhin, V.A. Nikitin, I.V. Loginov, M.G. Kuznetsov, A.I. Lopatkin, V.V. Zhirnov, P.V. Cherenkov, A.V. Lomtev</i>	

МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ И РАСЧЕТА НАЧАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ РАЗВИТИЯ ПЛАТФОРМЫ SALOME	310
<i>В.Л. Александров, Т.М. Егорова, Л.М. Зуева, С.Е. Исмагулова, Д.В. Могиленских, А.И. Тайнов, Н.Л. Фролова, Ю.В. Шувалева</i>	
TECHNIQUES OF MODELS CONSTRUCTION AND INITIAL DATA CALCULATION FOR NUMERICAL SIMULATION BASED ON SALOME PLATFORM DEVELOPMENT	310
<i>V.L. Aleksandrov, T.M. Egorova, L.M. Zueva, S.E. Ismagulova, D.V. Mogilenskikh, A.I. Tainov, N.L. Frolova, Yu.V. Shuvaeva</i>	
ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ИСКАЖЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ В СЛОЖНЫХ МЕТЕОУСЛОВИЯХ	310
<i>А.А. Пахомов, А. А. Потапов</i>	
DIGITAL PROCESSING OF THE CORRUPTED IMAGES OBTAINED IN THE COMPLEX WEATHER CONDITIONS	311
<i>А.А. Pakhotov, А.А. Potarov</i>	
ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ФРАКТАЛОВ И ЭФФЕКТОВ СКЕЙЛИНГА ПРИ ОБРАБОТКЕ МАЛОКОНТРАСТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И СВЕРХСЛАБЫХ СИГНАЛОВ В ИНТЕНСИВНЫХ ПОМЕХАХ.	311
<i>А.А. Потапов</i>	
APPLICATION OF THE FRACTAL THEORY AND SCALING EFFECTS DURING PROCESSING OF LOW-CONTRAST IMAGES AND SUPER WEAK SIGNALS IN THE PRESENCE OF INTENSIVE NOISE	312
<i>А.А. Potarov</i>	
ВИЗУАЛЬНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФИЗИКИ ВЗРЫВА И УДАРА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ MASTER PROFESSIONAL НА СОВРЕМЕННЫХ КОМПЬЮТЕРАХ.	312
<i>В.В. Руденко</i>	
VISUAL NUMERICAL MODELING OF DETONATION AND SHOCK PHYSICS PROCESSES IN THE MASTER PROFESSIONAL SUITE ON MODERN COMPUTERS	313
<i>V.V. Rudenko</i>	
О НЕВЫРОЖДЕННОСТИ ТРЕХМЕРНЫХ СЕТОК	313
<i>О.В. Ушакова</i>	
ON NONDEGENERACY OF THREE-DIMENSIONAL GRIDS	313
<i>O.V. Ushakova</i>	
РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ РАДИАЦИОННОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИЭТИЛЕНОВ	314
<i>Д.В. Алявдин</i>	
DEVELOPMENT OF IRRADIATION MODIFICATION EQUIPMENT	314
<i>D.V. Aljavin</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ К УДАРУ	314
<i>И.Д. АХМАДИЕВ, В.Я. Базотов, Л.Х. Бадретдинова, А.Н. Анисимов</i>	
MODELING OF IMPACT SENSITIVITY TEST OF EXPLOSIVE COMPOUNDS	314
<i>I.D. Akhmadiev, V.Y. Bazotov, L.H. Badretdinova, A.N. Anisimov</i>	
РАВНОВЕСИЕ ТРУБЫ В ПОЛЕ СИЛ ТЯЖЕСТИ	315
<i>В.В. Башуров, Н.А. Ваганова, А.И. Кропотов, М.В. Пчелинцев, Н.А. Скоркин, М.Ю. Филимонов</i>	
THE EQUILIBRIUM OF THE PIPE IN A GRAVITY FIELD.	315
<i>V.V. Bashurov, N.A. Vaganova, A.I. Kropotov, M.V. Pchelintsev, N.A. Skorkin, M.Y. Filimonov</i>	
КОМПЛЕКС ПРОГРАММ «ВОЛНА»: МОДЕЛИ И МЕТОДЫ	315
<i>Д.А. Варфоломеев, В.Ф. Куропатенко, М.Н. Якимова</i>	
VOLNA CODE PACKAGE: MODELS AND METHODS	316
<i>D.A. Varfolomeev, V.F. Kuropatenko, M.N. Yakimova</i>	
О МЕТОДАХ РАСЧЕТА ОТКОЛОВ	316
<i>Д.А. Варфоломеев, В.Ф. Куропатенко</i>	
SPALL SIMILATION METHODS	316
<i>D.A. Varfolomeev, V.F. Kuropatenko</i>	
ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТОВ ГАЗОДИНАМИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ПРОТОННОЙ РАДИОГРАФИИ	317
<i>И.В. Храмов, С.Ю. Седов, Р.С. Вахмистров, К.Л. Михайлюков, В.Б. Титова, Ю.В. Янилкин, И.Н. Павлуша, Т.В. Семенова, С.В. Потапов, И.А. Страбыкина, Е.Ю. Храмова, В.Р. Крутько, М.В. Вершинин, Е.А. Маврина, Г.С. Фирсова, Р.И. Козлова, В.А. Аринин, Б.И. Ткаченко</i>	

VERIFICATION OF FLOW DYNAMICS SIMULATIONS USING RESULTS OF PROTON RADIOGRAPHY EXPERIMENTS	317
<i>I.V. Khramov, S.Yu. Sedov, R.S. Vakhmistrov, K.L. Mikhaylyukov, V.B. Titova, Yu.V. Yanilkin, I.N. Pavlusha, T.V. Semenova, S.V. Potapov, I.A. Strabykina, E.Yu. Khramova, V.R. Krut'ko, M.V. Vershinin, E.A. Mavrina, G.S. Firsova, R.I. Kozlova, V.A. Arinin, B.I. Tkachenko</i>	
ОБ АЛГОРИТМЕ РЕШЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ЗАДАЧИ ПОТЕНЦИАЛА ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	317
<i>А.В. Горшков</i>	
ABOUT THE ALGORITHM DECISION OF A THREE-DIMENSIONAL PROBLEM OF POTENTIAL NUMERICALLY-ANALYTICAL METHOD OF BOUNDARY ELEMENTS	318
<i>A.V. Gorshkov</i>	
ДВИЖЕНИЕ РОТОРА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ.	318
<i>О.Н. Дементьев</i>	
THE ROTOR'S MOTION IN A CYLINDRICAL CHAMBER	318
<i>O.N. Dementyev</i>	
ДВУМЕРНЫЕ ТЕЧЕНИЯ МЕЛКОЙ ВОДЫ, ПРИМЫКАЮЩИЕ К ГРАНИЦЕ УРЕЗА	318
<i>С.Л. Дерябин, А.П. Садов</i>	
TWODIMENTIONAL SMALL WATER FLOWS BORDERED ON CUTTING FRONTIER	319
<i>S.L. Deryabin, A.P. Sadov</i>	
РАВНОВЕСИЕ ТРУБЫ, ЗАПОЛНЕННОЙ ДВИЖУЩЕЙСЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТЬЮ, В ПОЛЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ	319
<i>В.В. Башуров, А.С. Дорошев, М.В. Пчелинцев, Н.Д. Скоринова, Н.А. Скоркин</i>	
BALANCE OF PIPE, FILLED WITH MOVING VISCOUS LIQUID, IN THE GRAVITY FIELD	319
<i>V.V. Bashurov, A.S. Dorosev, M.V. Pchelintsev, N.D. Scorinova, N.A. Scorkin</i>	
РЕШЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТОДОМ УСРЕДНЕННЫХ КОСИНУСОВ	320
<i>А.С. Егорова, Н.Г. Карлыханов</i>	
THE SOLUTION OF KINETIC RADIATIVE TRANSFER EQUATION BY THE METHOD OF AVERAGE COSINES	320
<i>A.S. Egorova, N.G. Karlykhanov</i>	
ПЕРВОПРИНЦИПНЫЕ РАСЧЕТЫ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ С ГОРЯЧИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ	320
<i>П.А. Жиляев, В.В. Стегайлов</i>	
AB-INITIO CALCULATIONS OF THE THERMAL CONDUCTIVITY METALS WITH HOT ELECTRONS	320
<i>P.A. Zhilyaev, V.V. Stegailov</i>	
АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ИСКУССТВЕННОЙ ДИССИПАЦИИ В МЕТОДАХ СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ SPH ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ	321
<i>А.Д. Зубов, М.А. Зубов</i>	
THE ANALYSIS OF USE OF VARIOUS TYPES ARTIFICIAL DISSIPATIONIN METHODS OF SMOOTHED PARTICLES SPH FOR THE NUMERICAL SOLUTION OF GAS-DYNAMIC PROBLEMS	321
<i>A.D. Zubov, M.A. Zubov</i>	
ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СРЕД В КОЛЬЦЕВЫХ СОПЛАХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	322
<i>А.Л. Карташев, М.А. Карташева</i>	
RESEARCHES OF FLOWS OF MULTICOMPONENT MEDIUMS IN AN ANNULAR NOZZLES OF AIRCRAFTS	322
<i>A.L. Kartashev, M.A. Kartasheva</i>	
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО КОЛЬЦЕВОГО СОПЛА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С МНОГОКОМПОНЕНТНЫМ РАБОЧИМ ТЕЛОМ	323
<i>С.Д. Ваулин, А.Л. Карташев, М.А. Карташева</i>	
DESIGNING OF THE OPTIMUM ANNULAR NOZZLE OF AIRCRAFT WITH MULTICOMPONENT WORKING MEDIUM	323
<i>S.D. Vaulin, A.L. Kartashev, M.A. Kartasheva</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И КОМБИНИРОВАННОГО МИКРОРАЗРУШЕНИЯ ТЕРМОУПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ.	324
<i>Д.К. Ильницкий, А.Б. Киселев</i>	

MATHEMATICAL MODELLING OF DYNAMICAL DEFORMING AND COMBINED MICROFRACTURE OF THERMOELASTOVISCOPLASTIC MEDIUM	324
<i>D.C. Ilitskiy, A.B. Kiselev</i>	
РАВНОВЕСИЕ ТРУБЫ, ЗАПОЛНЕННОЙ ДВИЖУЩЕЙСЯ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТЬЮ, В ПОЛЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ	324
<i>B.V. Bashurov, D.A. Koshutin, Z.Yu. Matveenko, M.V. Pchelintsev, N.A. Skorin</i>	
BALANCE OF PIPE, FILLED WITH MOVING IDEAL LIQUID, IN THE GRAVITY FIELD	324
<i>V.V. Bashurov, D.A. Coshutin, Z.U. Matveenko, M.V. Pchelintsev, N.A. Scorin</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯВЛЕНИЙ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО УДАРА И ВЗРЫВА В СКАЛЬНОМ ГРУНТЕ.	324
<i>A.V. Gorodnichev, A.G. Ioylev, A.A. Krayukhin</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF HIGH-SPEED IMPACT AND BURST IN ROCKY GROUND	325
<i>A.V. Gorodnichev, A.G. Ioylev, A.A. Krayukhin</i>	
АНАЛИТИЧЕСКОЕ РАССМОТРЕНИЕ РАЗВИТИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ ПЛОТНОСТИ, В СХОДЯЩЕЙСЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ.	325
<i>K.E. Gorodnichev</i>	
ANALYTICAL CONSIDERATION OF INHOMOGENEITIES EVOLUTION IN COLLAPSING SPHERE SHELL.	326
<i>K.E. Gorodnichev</i>	
ЯВНЫЕ И НЕЯВНЫЕ РАЗНОСТНЫЕ СХЕМЫ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ	326
<i>Н.Я. Моисеев</i>	
HIGH-ORDER ACCURATE EXPLICIT AND IMPLICIT DIFFERENCE SCHEMES FOR SOLVING LINEAR ADVECTION EQUATIONS	326
<i>N.Ya. Moiseev</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ ВАНАДИЯ	326
<i>Н.В. Савельева, Ю.В. Баяндин, О.Б. Наймарк</i>	
NUMERICAL SIMULATION OF SPALL FRACTURE IN VANADIUM	327
<i>N.V. Savelieva, Yu.V. Bayandin, O.B. Naimark</i>	
МЕТОД РАЗДЕЛЕНИЯ ПО ФИЗИЧЕСКИМ ПРОЦЕССАМ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ.	328
<i>A.A. Serëzhkin</i>	
METHOD OF SEPARATING PHYSICAL PROCESSES FOR MODELING OF DEFORMATION AND FRACTURE OF SOLIDS	328
<i>A.A. Serezhkin</i>	
КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ТРЕНЕР ДЛЯ МАССОВО-ПАРАЛЛЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОМЕРНЫХ ЗАДАЧ ПЕРЕНОСА НЕЙТРОНОВ	328
<i>С.Б. Серов</i>	
TRENER MASSIVELY PARALLEL DETERMINISTIC MULTIDIMENSIONAL NEUTRON TRANSPORT CODE SYSTEM	328
<i>S.B. Serov</i>	
РЕШЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ	329
<i>О.Н. Ульянов, Л.И. Рубина</i>	
SOLVING NONLINEAR PARTIAL DIFFERENTIAL EQUATIONS USING GEOMETRIC METHOD.	329
<i>O.N. Ulyanov, L.I. Rubina</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ ПРИ НАЛИЧИИ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ	329
<i>Н.А. Ваганова, М.Ю. Филимонов</i>	
SIMULATION OF THERMAL FIELDS IN PERMAFROST WITH PRESENCE OF ENGINEERING CONSTRUCTIONS.	330
<i>N.A. Vaganova, M.Yu. Filimonov</i>	
РАЗДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВА КАК СПОСОБ ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПЕРЕНОСА ЧАСТИЦ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО	330
<i>С.А. Фролов, С.А. Бреднихин, С.И. Лежнин</i>	

OPTIMIZATION OF MONTE-CARLO PARTICLE TRANSPORT GEOMETRIC CALCULATIONS WITH SPACE PARTITION	331
<i>S.A. Frolov, S.A. Brednikhin, S.I. Lezhnin</i>	
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХФАЗНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ОПИСАНИЯ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОВЗВЕСЯХ С УЧЕТОМ МЕЖЧАСТИЧНЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ	331
<i>T.A. Khmel, A.V. Fedorov</i>	
MATHEMATICAL MODEL OF TWO-PHASE MEDIUM FOR DESCRIBING SHOCK-WAVE PROCESSES IN GAS SUSPENSIONS WITH REGARD FOR PARTICLE COLLISIONS	332
<i>T.A. Khmel, A.V. Fedorov</i>	
ОБОСНОВАНИЕ ВЕСОВЫХ МЕТОДОВ МОНТЕ-КАРЛО ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ НЕБОЛЬЦМАНОВСКИХ ФУНКЦИОНАЛОВ	332
<i>E.A. Tsvetkov</i>	
PROOF OF THE VARIANCE REDUCTION TECHNIQUES FOR ESTIMATING OF NON-BOLTZMANN TALLIES	333
<i>E.A. Tsvetkov</i>	
СЕДЬМАЯ ЗАДАЧА ФЛЕКА	333
<i>A.A. Shestakov</i>	
SEVENTH FLECK PROBLEM	334
<i>A.A. Shestakov</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В НАПОЛНЕННЫХ ГАЗОМ НЕЙТРОННЫХ ТРУБКАХ	334
<i>D.K. Shestakov</i>	
NUMERICAL MODELING OF PHYSICAL PROCESS IN THE GAS FILLED NEUTRON TUBES (GNT)	334
<i>D.K. Shestakov</i>	
ПРИБЛИЖЕНИЕ ВПЕРЕД-НАЗАД НЕЙТРОНЫ	334
<i>V.M. Shmakov</i>	
NEUTRONS: BACK AND FORTH APPROXIMATION	335
<i>V.M. Shmakov</i>	
БИБЛИОТЕКА ЕФР ДЛЯ МАСШТАБИРУЕМОГО ДОСТУПА К ФАЙЛОВЫМ ДАННЫМ НА МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ ЭВМ	335
<i>K.K. Olesnitskaya, I.A. Antipin, M.A. Shubina</i>	
АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ДИРАКА ДЛЯ СОСТОЯНИЯ 0+ УГЛЕРОДОПОДОБНЫХ ИОНОВ ТРАНСУРАНОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	336
<i>A.A. Sadovoy, A.S. Ulyanov</i>	
ANALYTICAL SOLUTION OF THE DIRAC EQUATION FOR STATE 0+ OF CARBON-LIKE IONS OF TRANSURANIUM ELEMENTS	337
<i>A.A. Sadovoy, A.S. Ulyanov</i>	
ТРЕХУДАРНЫЕ КОНФИГУРАЦИИ ПРИ ОТРАЖЕНИИ УДАРНЫХ ВОЛН В РЕАЛЬНЫХ ГАЗАХ	337
<i>L.G. Gvozdeva, S.A. Gavrenkov</i>	
THREE SHOCK WAVE CONFIGURATIONS AT THE REFLECTION OF SHOCK WAVES IN REAL GASES	337
<i>L.G. Gvozdeva, S.A. Gavrenkov</i>	
АНАЛИЗ ДВУХДИАПАЗОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТЕПЛОВОЙ СТРУКТУРЫ ПРОТОЗВЕЗДНЫХ ОБЛАКОВ	338
<i>P.B. Isakova, A.G. Zhilkin, Ya.N. Pavlyuchenkov</i>	
ANALYSIS OF THE TWO-WAVELENGTH MODEL DEVELOPED TO SIMULATE THE THERMAL STRUCTURE OF PROTOSTELLAR CLOUDS	338
<i>P.B. Isakova, A.G. Zhilkin, Ya.N. Pavlyuchenkov</i>	
ПАКЕТ ПРОГРАММ ЛОГОС. МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ПАРАЛЛЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ	338
<i>I.V. Loginov, A.L. Potekhin, V.A. Nikitin</i>	
LOGOS SOFTWARE PACKAGE. PARALLEL IMAGING METHODS	339
<i>I.V. Loginov, A.L. Potekhin, V.A. Nikitin</i>	

ЛУЧШИЕ СТУДЕНЧЕСКИЕ НАУЧНЫЕ РАБОТЫ
THE BEST RESEARCH PAPERS BY UNDERGRADUATE STUDENTS

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ	343
<i>И.В. Лавренко</i>	
ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ СКЛЕЙКИ КИНЕТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ С P_1 ПРИБЛИЖЕНИЕМ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ.	343
<i>Н.Г. Карлыханов, Н.В. Селиванова</i>	
ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СЖАТИЯ НА ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД В НИТРИДЕ КРЕМНИЯ	343
<i>В.А. Кудакина, В.В. Якушев, А.Н. Жуков, А.И. Рогачёва</i>	
THE INFLUENCE OF HIGH TEMPERATURE SHOCK COMPRESSION ON SILICON NITRIDE PHASE TRANSFORMATION	343
<i>V.A. Kudakina, V.V. Yakushev, A.N. Zhukov, A.I. Rogacheva</i>	
СВАРКА ВЗРЫВОМ: ПРОЦЕССЫ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ, НЕ ИМЕЮЩИХ ВЗАИМНОЙ РАСТВОРИМОСТИ (ЖЕЛЕЗО-СЕРЕБРО).	344
<i>А.Ю. Волкова, Б.А. Гринберг, А.В. Иноземцев</i>	
EXPLOSION WELDING: THE MIXING PROCESS METALS NOT HAVE MUTUAL SOLUBILITY (IRON-SILVER).	344
<i>A.Yu. Volkova, B.A. Greenberg, A.V. Inozemtsev</i>	
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ	346
INDEX	354

Забабахинские научные чтения:

Сборник тезисов докладов XI Международной конференции 16–20 апреля 2012. –
РФЯЦ – ВНИИТФ, Снежинск

Тезисы докладов публикуются в авторском изложении без корректорской правки.

Оригинал-макет подготовили: Г.В. Казаченова, Н.И. Потеряхина, Т.Б. Пряхина, Н.В. Шувалова, И.Е. Ядринцева

Подписано в печать 23.03.2012
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 47,2
Тираж 450 экз. Заказ № 000

Печать выполнена с оригинал-макета,
подготовленного информационно-издательской группой РФЯЦ–ВНИИТФ.
Адрес издающей организации:
456770, г. Снежинск Челябинской обл., а. я. 245, ул. Васильева 13,
ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»,
тел.: (351-46) 5-23-50, 5-24-90.

Тираж отпечатан в печатном салоне «Колибри»
456770, г. Снежинск Челябинской обл., ул. Ленина, 19